

# Osnovi hidrogeologije

Petar Dokmanović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Osnovi hidrogeologije | Petar Dokmanović | | 2021 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005082>

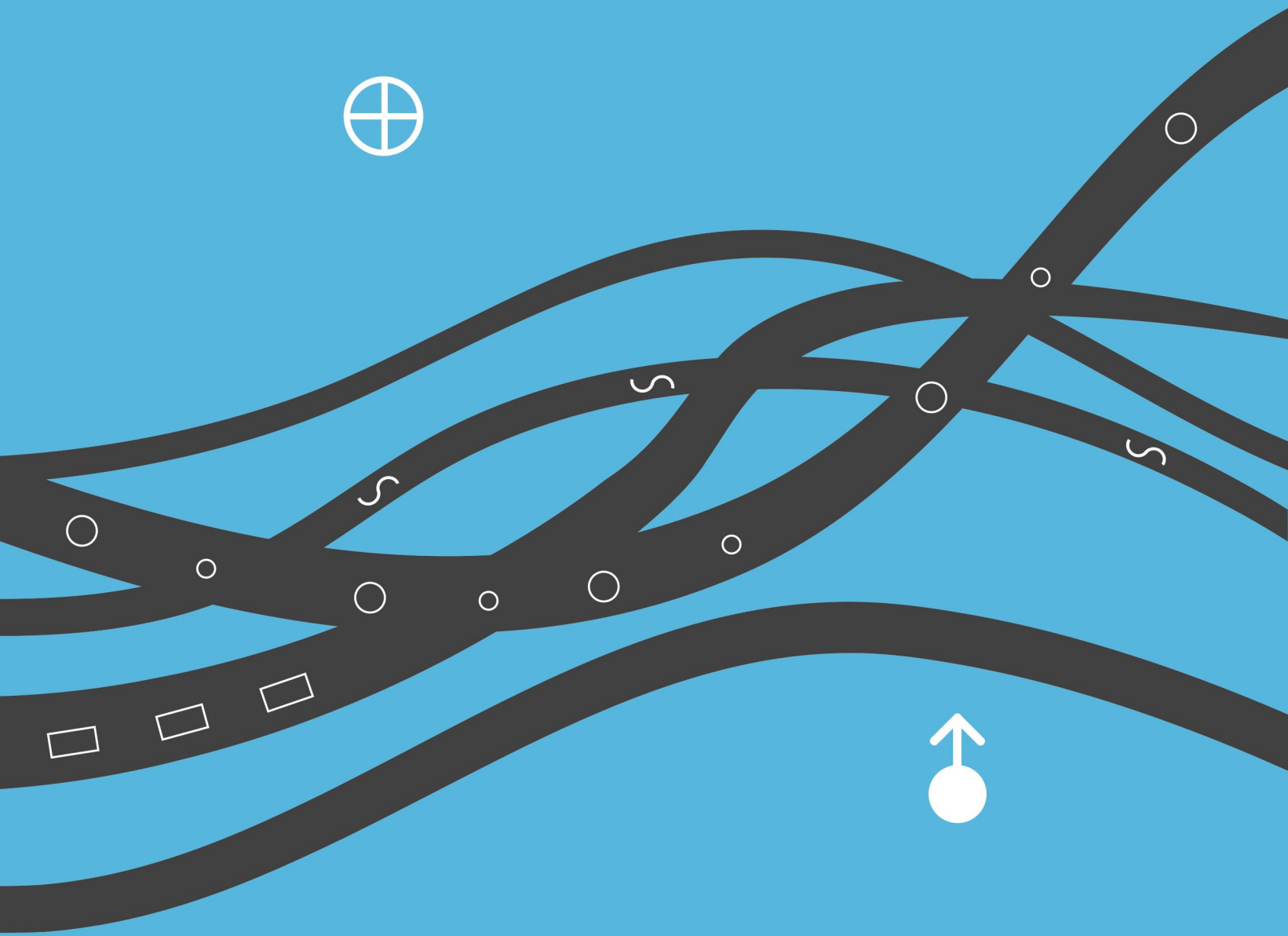
Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET



Petar Dokmanović  
Osnovi hidrogeologije



**UNIVERZITET U BEOGRADU**  
**RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET**

**Petar Dokmanović**

**OSNOVI HIDROGEOLOGIJE**

Beograd, 2021

Dr Petar Dokmanović  
OSNOVI HIDROGEOLOGIJE

\*

RECENZENTI:

Dr Zoran Nikić

Dr Slobodan Vujašinić

---

Odlukom Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta br. 8/84 od 21.09.2021. godine, usvojen je konačni izveštaj Uređivačkog odbora Fakulteta za rukopis "Osnovi hidrogeologije", autora Dr Petra Dokmanovića i odobreno je publikovanje ovog rukopisa.

---

IZDAVAČ

**Rudarsko-geološki fakultet**

Beograd, Đušina 7

\*

ZA IZDAVAČA

Dr Zoran Gligorić

\*

UREDNIK IZDANJA

Dr Olivera Krunić

\*

TEHNIČKI UREDNIK

Dr Petar Dokmanović

**ISBN-978-86-7352-374-3**

# SADRŽAJ

	str.
<i>PREDGOVOR</i>	<i>1</i>
<i>STRUKTURA UDŽBENIKA</i>	<i>3</i>
<b><u>I DEO: U V O D</u></b>	<b>10</b>
<b><u>1. POJAM, PREDMET IZUČAVANJA I PRAKTIČNI ZNAČAJ HIDROGEOLOGIJE</u></b>	<b>11</b>
<b><u>2. KRAĆI ISTORIJAT RAZVOJA HIDROGEOLOGIJE</u></b>	<b>12</b>
<b><u>3. VODA NA ZEMLJI</u></b>	<b>14</b>
3.1. ATMOSFERSKA VODA	14
3.2. POVRŠINSKE VODE	14
3.3. PODZEMNE VODE	16
3.3.1. Građa Zemlje	16
3.3.2. Podzemne vode u litosferi	16
3.3.3. Vidovi podzemnih voda	18
3.3.4. Poreklo podzemnih voda	21
<b><u>II DEO: KRUŽENJE I BILANS VODA NA ZEMLJI</u></b>	<b>22</b>
<b><u>4. KRUŽENJE VODE NA ZEMLJI</u></b>	<b>23</b>
<b><u>5. VODNI BILANS</u></b>	<b>25</b>
5.1. POJAM I OPŠTE ODREDBE	25
5.2. ELEMENTI VODNOG BILANSA	26
5.2.1. Padavine	27
5.2.2. Isparavanje	29
5.2.3. Oticaj	30
5.2.4. Podzemne vode u vodnom bilansiranju	32

<b><u>III DEO: POROZNOST STENA</u></b>	<b>35</b>
<b><u>6.POROZNOST STENA</u></b>	<b>36</b>
6.1. TIPOVI POROZNOSTI STENA	36
6.2. GLAVNI STRUKTURNI TIPOVI POROZNOSTI	39
6.3. MEĐUZRNSKA POROZNOST	40
6.3.1. Osnovni pojmovi	40
6.3.2. Granulometrijski sastav	40
6.4. PUKOTINSKA POROZNOST	43
6.4.1. Osnovni pojmovi	43
6.4.2. Klasifikacije pukotina	44
6.4.3. Ispitivanje i interpretacija ispucalosti	45
6.5. KAVERNOZNA POROZNOST	46
6.5.1. Nastanak i razvoj karstnog procesa	47
6.5.2. Oblici i tipovi karstnog reljefa	48
6.6. OSTALI STRUKTURNI TIPOVI POROZNOSTI	49
6.6.1. Sundečasta (šupljikava) poroznost	49
6.6.2. Crevasta poroznost	49
6.7. ODREĐIVANJE VELIČINE POROZNOSTI	50
<b><u>IV DEO: HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA; KRETANJE PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>53</b>
<b><u>7. HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA</u></b>	<b>54</b>
7.1. VLAŽNOST	54
7.2. KAPILARNOST	55
7.3. VODOPROPUSNOST	57
7.4. IZDAŠNOST	58
7.5. RETENCIJA	59

<b><u>8. KRETANJE PODZEMNE VODE</u></b>	<b>60</b>
8.1. INFILTRACIJA	60
8.2. FILTRACIJA	61
8.2.1. Laminarni režim filtracije	61
8.2.2. Turbulentni režim filtracije	63
8.2.3. Filtracioni parametri	63
<b><u>V DEO: IZDANI (1)</u></b>	<b>66</b>
<b><u>9. VERTIKALNI RASPORED PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>67</b>
9.1. ZONA AERACIJE (NADIZDANASKA ZONA)	67
9.2. ZONA ZASIĆENJA (IZDANSKA ZONA)	69
<b><u>10. IZDANI</u></b>	<b>69</b>
10.1. KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU HIDRODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA NIVOA	70
10.1.1. Izdani sa slobodnim nivoom	71
10.1.2. Izdani sa nivoom pod pritiskom	76
<b><u>VI DEO: IZDANI (2)</u></b>	<b>80</b>
10.2. KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU STRUKTURNOG TIPRA POROZNOSTI	81
10.2.1. Zbijene izdani	81
10.2.2. Pukotinske izdani	85
10.2.3. Karstne izdani	86
10.3. OSTALI VIDOVI HIDROGEOLOŠKIH KARAKTERIZACIJA (TIPIZACIJA) TERENA	89
10.3.1. Uslovno bezvodni tereni	89
10.3.2. Hidrogeološke strukture	90

<b><u>VII DEO: HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI</u></b>	<b>93</b>
<b><u>11. HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI</u></b>	<b>94</b>
<b>11.1. HRANJENJE IZDANI</b>	<b>94</b>
11.1.1. Prirodno hranjenje izdani	94
11.1.2. Veštačko prihranjivanje izdani	96
<b>11.2. DRENIRANJE IZDANI</b>	<b>96</b>
11.2.1. Izvori	97
11.2.2. Evapotranspiracija	103
11.2.3. Ostali vidovi skrivenog dreniranja izdani	104
11.2.4. Veštačko dreniranje izdani	104
<b><u>VIII DEO: HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA; UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA</u></b>	<b>105</b>
<b><u>12. HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>106</b>
<b><u>13. UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA</u></b>	<b>107</b>
13.1. ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA U KONTINENTALNIM OBLASTIMA	107
13.2. ODNOS IZDANI I POVRŠINSKIH VODA U PRIMORJU	110
<b><u>IX DEO: KVALITET PODZEMNIH VODA (1)</u></b>	<b>113</b>
<b><u>14. UVODNE NAPOMENE</u></b>	<b>114</b>
<b><u>15. FIZIČKA SVOJSTVA PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>115</b>
<b><u>16. HEMIJSKI SASTAV PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>116</b>
16.1. POREKLO RASTVORENIH MATERIJA U PODZEMNIM VODAMA	116
16.2. FORMIRANJE HEMIJSKOG SASTAVA PODZEMNIH VODA	118
16.2.1. Osnovne hemijske reakcije u sistemu voda-stena	118
16.2.2. Hidro-geohemijska zonalnost	119



16.3. OSNOVNI POKAZATELJI HEMIZMA PODZEMNIH VODA	120
16.4. KOMPONENTE HEMIJSKOG SASTAVA PODZEMNIH VODA	122
16.4.1. Glavne komponente	122
16.4.2. Sporedne komponente	124

## **X DEO: KVALITET PODZEMNIH VODA (2)** **127**

16.4.3. Mikrokomponente u podzemnim vodama	128
16.4.4. Organske materije u podzemnim vodama	128
16.4.5. Gasovi u podzemnim vodama	128
16.4.6. Izotopski sastav i radioaktivnost podzemnih voda	129
<b><u>17. MIKROORGANIZMI U PODZEMNIM VODAMA</u></b>	<b>133</b>
<b><u>18. KLASIFIKACIJE PODZEMNIH VODA NA OSNOVU HEMIJSKOG SASTAVA</u></b>	<b>134</b>
<b><u>19. MINERALNE I TERMALNE VODE</u></b>	<b>135</b>

## **XI DEO: REŽIM PODZEMNIH VODA; OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA** **138**

<b><u>20. REŽIM PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>139</b>
20.1. FAKTORI REŽIMA PODZEMNIH VODA	139
20.2. TIPOVI REŽIMA PODZEMNIH VODA	144
20.3. OSMATRANJA REŽIMA PODZEMNIH VODA – HIDROGEOLOŠKI MONITORING	145
<b><u>21. OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>146</b>
21.1. PODZEMNE VODE KAO INTEGRALNI DEO ŽIVOTNE SREDINE	146
21.2. OSNOVNI POJMOVI IZ OBLASTI ZAŠTITE KVALITETA PODZEMNIH VODA	147
21.3. SADRŽAJ I CILJEVI ZAŠTITE PODZEMNIH VODA	149
21.4. ZONE SANITARNE ZAŠTITE	150

<b>XII DEO: ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA</b>	<b>153</b>
<b><u>22. ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA</u></b>	<b>154</b>
<b>22.1. ZAHVATI PODZEMNIH VODA</b>	<b>154</b>
22.1.1. Kaptaze izvora	154
22.1.2. Bunari	155
22.1.3. Horizontalne vodozahvatne konstrukcije	157
<b>22.2. REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA</b>	<b>159</b>
22.2.1. Povećanje kapaciteta izvorišta podzemnih voda	159
22.2.2. Odvodnjavanje rudarskih radova	161
22.2.3. Odvodnjavanje poljoprivrednog zemljišta	164
 <b>LITERATURA</b>	 <b>166</b>

## PREDGOVOR

Rukopis "**Osnovi hidrogeologije**" je osnovni udžbenik za istoimeni predmet, koji je, od strane Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, ustanovljen kao obavezni ili izborni predmet za studente ovog fakulteta, kojima hidrogeologija nije matična strukovna (uža naučna) oblast.

Osnovni cilj ovog predmeta je definisanje i razumevanje osnovnih pojmova i načela hidrogeologije, što bi, budućim stručnjacima iz oblasti geologije i rudarstva, trebalo da bude od koristi u bavljenju njihovim matičnim strukama ili užim naučnim oblastima.

Hidrogeološka delatnost je izuzetno kompleksna i "razgranata", a osnovni razlog za to je njen neposredni predmet izučavanja – **podzemne vode**, koje su u prisnoj vezi i aktivnoj koegzistenciji sa svim ostalim komponentama životne sredine. Zajedno sa površinskim i atmosferskim vodama, one učestvuju u sveukupnom kruženju vode u prirodi i formiranju vodnog bilansa naše planete i njenih regiona. Na svom putu ka podzemlju ostvaruju kompleksnu interakciju sa zemljištem, vegetacijom, mikroorganizmima. U zemljinoj kori (geološkoj sredini), podzemne vode su, verovatno, njena najdinamičnija komponenta, koja uzima učešće u nizu geoloških procesa. One rastvaraju stene i minerale, a potom, kao prirodni rastvori, svojim kretanjem određuju migraciju rastvorenih materija, njihovo iznošenje u površinske tokove i akumulacije ili odlaganje u zemljinoj kori. Brojna fizička i hemijska svojstva stena generisana su upravo prisustvom i delovanjem podzemnih voda. Svojim rastvaračkim i transportnim radom, one doprinose i oblikovanju nekih savremenih formi reljefa.

Praktični značaj podzemnih voda, kao resursa, je ogroman. Koristimo ih kao pijaće vode, za navodnjavanje poljoprivrednih površina, u prehrambenoj industriji, kao komunalne i tehničke vode. Mineralne i termalne podzemne vode se, zavisno od hemijskog sastava i temperature, koriste u lečenju (balneoterapiji), rekreaciji, kao termo-energenti ili za dobijanje korisnih sirovina. Pored brojnih koristi, podzemne vode mogu da predstavljaju i smetnju za obavljanje određenih delatnosti: plavljenje rudnika, poljoprivrednih površina, urbanih zona, saobraćajnica i dr. Zagađivanje i zagađenost svih elemenata životne sredine: vazduha, zemljišta, vegetacije, voda, jedan je od najvećih problema savremene civilizacije, a posledica je intenzivne (i nekontrolisane) eksploatacije resursa, energetske potrošnje, industrijalizacije, intenzivne poljoprivredne delatnosti, urbanizacije i dr. U tom kontekstu, i problemi zaštite podzemnih voda od zagađivanja, ali i od prekomerne eksploatacije, veoma su aktuelni.

Upravo svi navedeni aspekti manipulisanja podzemnim vodama predstavljaju polje delovanja (primenjene) hidrogeologije, kao samostalne discipline, ili integrisane u multidisciplinarne naučne i stručne projekte. Uspešno rešavanje svih navedenih i navedenih slučajeva "ovladavanja" i održivog upravljanja podzemnim vodama iziskuje, na prvom mestu, već pomenuto poznavanje osnovnih zakonitosti i načela hidrogeologije: kako se podzemne vode formiraju, kreću, dreniraju, kakav im je odnos sa faktorima uticaja u okruženju (padavinama, površinskim vodama, stenama i

*procesima koji se odvijaju u zemljinoj kori), šta sve utiče na formiranje njihovog kvaliteta (temperature, hemijskog, mikrobiološkog i gasnog sastava) i dr.*

*Polazeći od prethodno izloženog, ali i na osnovu višegodišnjeg iskustva u nastavi, upravo na predmetu "Osnovi hidrogeologije", Autor je pokušao (nadajmo se i uspeo) da nađe "pravu meru" u pogledu strukture, sadržaja, detaljnosti izlaganja i instruktivnosti izloženog gradiva u ovom udžbeniku. Na kraju treba reći i to da je, u poslednjim poglavljima udžbenika, načinjen mali iskorak iz okvira, do sada uobičajenog, sadržaja predmeta "Osnovi hidrogeologije, pa su, u osnovnim crtama, obrađeni i neki bitni aspekti "primenjene hidrogeologije": zaštita podzemnih voda i zahvati i regulacija režima podzemnih voda. Stav Autora je da i studenti kojima hidrogeologija nije matična oblast, o tome treba da budu elementarno edukovani.*

*Autor se zahvaljuje recenzentima Prof.Dr Zoranu Nikiću i Prof.Dr Slobodanu Vujasinoviću na konstruktivnom pristupu recenziji ovog rukopisa, njihovim korisnim sugestijama i afirmativnim ocenama.*

**Autor:**

**Prof.Dr Petar Dokmanović**

## STRUKTURA UDŽBENIKA

Izlaganje je podjeljeno na **12 delova**, označenih brojevima **I-XII**. **Svaki od delova čini po jedno predavanje.**

### **I DEO: UVOD**

Cilj **I DELA** je upoznavanje sa nekim osnovnim pojmovima vezanim za hidrogeologiju, vode u prirodi i podzemne vode. Izlaganje je podjeljeno u tri glavna poglavlja:

1. POJAM, PREDMET IZUČAVANJA I PRAKTIČNI ZNAČAJ HIDROGEOLOGIJE
2. KRAĆI ISTORIJAT RAZVOJA HIDROGEOLOGIJE
3. VODA NA ZEMLJI

**U poglavlju 1.** su izloženi osnovni pojmovi i smernice u vezi toga šta je neporedni predmet izučavanja hidrogeologije, zatim, o povezanosti podzemnih voda sa ostalim komponentama životne sredine, o praktičnom značaju PV kao resursa i o povezanosti hidrogeologije sa srodnim naučnim disciplinama.

**U poglavlju 2.** je dat kratak osvrt na istorijske težnje ljudi da dopru do podzemne vode, kao dragocenog resursa, kao i o različitim načinima njihovog korišćenja. Dat je kraći pregled istorijskog konstituisanja i razvoja hidrogeologije, kao samostalne nauke, kao i spektar praktičnih problema čije je rešavanje u domenu (primenjene) hidrogeologije.

**U poglavlju 3.** su izložene bitne informacije o hidrosferi naše planete, atmosferskim i površinskim vodama na Zemlji, kao i o količinskoj zastupljenosti različitih vidova voda u hidrosferi. Detaljnije izlaganje je posvećeno podzemnim vodama, kao ciljanom delu voda na Zemlji, počev od vertikalne zonalnosti litosfere, preko različitih vidova voda koje u njoj postoje, do njihovih osnovnih karakteristika i porekla. Obrazložene su suštinske razlike između (hemijski i fizički) vezanih i slobodnih (gravitacionih) podzemnih voda.

### **II DEO: KRUŽENJE I BILANS VODA NA ZEMLJI**

Cilj **II DELA** je upoznavanje sa mehanizmima kruženja vode u prirodi i osnovnim komponentama koje čine taj proces, kao i osnovnim načelima količinskog izražavanja, odnosno, bilansiranja ovih komponenti. Izlaganje je podjeljeno u dva glavna poglavlja:

4. KRUŽENJE VODE NA ZEMLJI
5. VODNI BILANS

**U poglavlju 4.** su opisani svi mehanizmi i faktori, koji uzimaju učešća u kruženju vode u prirodi, kao i osnovni činioci i razlike između hidrološkog i geološkog ciklusa vode. Definisane su i, ukratko, opisane, osnovne komponente hidrološkog ciklusa: *padavine, isparavanje i (ukupni) oticaj.*

**U poglavlju 5.** je prikazana i razrađena osnovna jednačina vodnog bilansa i osnovna načela merenja i količinskog izražavanja njegovih komponenti. Ukupni oticaj je razložen na površinski i *podzemni oticaj.*

### III DEO: POROZNOST STENA

Cilj **III DELA** je upoznavanje sa pojmom i fizičkim smislom poroznosti, kao (sa hidrogeološkog aspekta) najvažnije fizičke karakteristike stena, iz koje proističu i njihova najvažnija hidrogeološka svojstva. Izlaganje je u okviru jednog glavnog poglavlja:

#### 6. POROZNOST STENA

Izvedena je podela stena na osnovu mehaničkih svojstava na: *Čvrsto vezane, Slabo vezane i Nevezane*, a potom su detaljno obrađena tri glavna strukturna tipa poroznosti: *Međuzrnska, Pukotinska i Kavernoza.*

Izlaganjem o *međuzrnskoj* poroznosti obuhvaćeno je: vrste stena u kojima je zastupljena, ispitivanje granulometrijskog sastava sa interpretacijom i prikazom rezultata, razlike između ukupne i efektivne poroznosti i karakteristične veličine ovih prametara kod pojedinih vrsta stena.

U okviru izlaganja o *pukotinskoj* poroznosti, obrađeno je: vrste stena u kojima se javlja, genetska i kinematska klasifikacija pukotina, metode ispitivanje ispucalosti sa interpretacijom i prikazom rezultata.

Izlaganjem o *kavernoza* (disolucionoj) poroznosti obuhvaćeno je: pojam karsta i vrste stena u kojima nastaje, nastanak i razvoj karstnog procesa u karbonatnim stenama, tipovi karstnog reljefa, podzemni i površinski karstni oblici.

Podređeno zastupljeni strukturni tipovi poroznosti stena obrađeni su u osnovnim crtama. Prikazani su i osnovni proračuni za određivanja veličine poroznosti.

### IV DEO: HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA I KRETANJE PODZEMNIH VODA

Nakon detaljnog upoznavanja sa poroznošću stena, u ovom delu su obrađena osnovna hidrogeološka svojstva stena, koja, kako je već rečeno, u najvećoj meri zavise od poroznosti, a potom i osnovni vidovi, fizički principi i parametri kretanja podzemnih voda. Izlaganje je podeljeno u dva glavna poglavlja:

## 7. HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA

## 8. KRETANJE PODZEMNE VODE

**U poglavlju 7** obrađeni su: *vlažnost, kapilarnost, vodopropusnost, izdašnost i retencija*. Između ostalog, prikazane su karakteristične veličine parametara hidrogeoloških svojstava za različite vrste stena. Objašnjeno je da *vodopropusnost*, u fizičkom smislu, predstavlja brzinu kretanja podzemne vode kroz sistem pora, kao i kako poroznost utiče na ovo hidrogeološko svojstvo. Ukazano je da je *izdašnost stene*, u fizičkom smislu, *suprotna retenciji*, i da presudan uticaj na formiranje ovih hidrogeoloških svojstava stena ima veličina njihovih pora.

**U poglavlju 8.** obrađena su dva osnovna vida kretanja podzemnih voda: *infiltracija i filtracija*. U okviru izlaganja o *infiltraciji*, u osnovnim crtama su objašnjena tri osnovna vida infiltracije: *proceđivanje, normalna infiltracija i poniranje*. U okviru izlaganja o filtraciji govori se o režimima filtracije (laminarnom i turbulentnom), fizičkom smislu i metodama određivanja *hidrauličkog konduktiviteta*, kao osnovnog parametra filtracije podzemnih voda, kao i o tome šta predstavlja *transmisivnost*, kao parametar filtracije.

## V DEO: IZDANI (1)

„*IZDAN*“ (uz „podzemne vode“) *predstavlja najvažniji pojam i ključnu reč* u okviru predmeta „Osnovi hidrogeologije“. Zbog obima i značaja, izlaganje o izdanima je podeljeno u dva dela ovog udžbenika (V i VI). Ovaj, V deo, čine dva glavna poglavlja:

### 9. VERTIKALNI RASPORED PODZEMNIH VODA (kompletno)

### 10. IZDANI (delimično; nastavljeno u VI DELU)

**U poglavlju 9** prikazane su tipske šeme (profili terena) sa prikazom vertikalnog rasporeda podzemnih voda, odnosno, rasporeda tipičnih zona/pojaseva. Osnovna podela je na: *nadizdansku zonu (ili zonu aeracije) i izdansku zonu (ili zonu zasićenja podzemnim vodama)*.

**U uvodu poglavlja 10** definisan je pojam izdani, njihove opšte karakteristike i kriterijumi za *dve osnovne klasifikacije (tipizacije) izdani: 1-Na osnovu hidrodinamičkih karakteristika nivoa i 2-Na osnovu strukture poroznosti*.

**U poglavlju 10.1.** (KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU HIDRODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA NIVOVA), detaljno su izložene karakteristike dva osnovna tipa: *1-izdani sa slobodnim nivoom i 2-izdani (sa nivoom) pod pritiskom*.

Između ostalog, *kod izdani sa slobodnim nivoom*, govori se o: fizičkom poimanju i uslovima formiranja slobodnog nivoa, načinima i interpretacijama merenja (slobodnog) nivoa podzemnih voda, elementima izdani (oblast hranjenja, rasprostranjenja, dreniranja...). U okviru izlaganja o *izdanima pod pritiskom* dat je prikaz bitnih razlika u odnosu na izdani sa slobodnim nivoom, geoloških faktora koji dovode do formiranja pritiska u izdani, elementima izdani.

## VI DEO: IZDANI (2)

Nastavak izlaganja o izdanima obuhvata dva (glavna) potpoglavlja:

10.2. KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU STRUKTURNOG TIPa POROZNOSTI

10.3. OSTALI VIDOVI HIDROGEOLOŠKIH KARAKTERIZACIJA (TIPIZACIJA) TERENA.

**U poglavlju 10.2.** izvedena je klasifikacija na tri osnovna tipa: *1-Zbijene; 2-Pukotinske i 3-Karstne izdani* i prikazane su njihove karakteristike.

*Zbijene izdani* su formirane u stenama se međuzrnskom poroznošću. Prikazane su bitne karakteristike ovih izdani, formiranih u stenama različite geneze i različitim vrstama sedimentacionih sredina: deluvijumu, aluvijumu, jezerskim, ledničkim, marinskim sedimentima i dr.

Kod *pukotinskih izdani* je, između ostalog, izvršena diferencijacija na *deo iznad i deo ispod lokalnog erozionog bazisa*, uz opis njihovih karakteristika i osnovnih razlika.

U okviru izlaganja o *karstnim izdanima* ukazano je na izuzetno dinamičan režim i velika sezonska kolebanja nivoa podzemnih voda i izdašnosti karstnih vrela, zbog njihove podložnosti (izloženosti) uticaju hidrometeorološkog faktora. Prikazana je i Cvijićeva šema hidrodinamičke zonalnosti po vertikalnom profilu karstne izdani.

**U okviru poglavlja 10.3,** opisani su još neki vidovi (aspekti) hidrogeoloških karakterizacija (tipizacija) terena: „*uslovno bezvodni tereni*“ i *hidrogeološke strukture*.

## VII DEO: HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI

Izlaganje je u okviru jednog glavnog poglavlja : **11. HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI**

Detaljno je elaborirana *infiltracija voda od atmosferskih padavina i površinskih tokova i akumulacija*, kao osnovni vid hranjenja izdani. Razmotreno je koji sve faktori, i na koji način, utiču na veličinu infiltracije i kako se njen *intenzitet menja u toku vremena*, kako sezonski, tako i kratkoročno. Ukratko su opisane i neke, u praksi primenjivane, metode *veštačkog prihranjivanja izdani*.

Konstatovano je da *prirodno dreniranje može da bude otkriveno i skriveno*, a najveći prostor, u ovom delu, posvećen je *izvorima*, kao prirodnim pojavama otvorenog dreniranja izdani. Ukratko su razmotrene i metode merenja *izdašnosti izvora*, kao i *skriveno i veštačko dreniranje* izdani.

## VIII DEO: HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA I UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA

Osnovni cilj ovog dela je da „zaokruži priču“ o kvantitativnim svojstvima izdani. Izlaganje je podeljeno u dva glavna poglavlja:



## 12. HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA

## 13. UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA

U **poglavlju 12.** je objašnjeno zašto nastaje i kako se manifestuje *hidrodinamička zonalnost* podzemnih voda u vertikalnom profilu.

U **poglavlju 13.**, *uzajamni odnosi izdani površinskih voda* razmotreni su u *kontinentalnim oblastima i u primorju*. U okviru izlaganja vezanog za kontinentalne oblasti, prikazane su, između ostalog, *tri osnovne šeme* ovog odnosa, kao i kako na to može da utiče klimatski faktor. Kada su u pitanju primorske izdani, možda i najvažnija posledica ovog odnosa jeste sezonsko *zaslanjivanje podzemnih voda*, koje predstavlja problem praktične prirode, zbog ograničenih mogućnosti zahvatanja i korišćenja (slatkih) podzemnih voda. Ovaj problem je naročito izražen kod (primorskih) karstnih izdani, zbog specifične strukture poroznosti stena i dimenzija karstnih kanala.

## IX DEO: KVALITET PODZEMNIH VODA (1)

U prethodnim delovima udžbenika, u prvom planu je bio aspekt njihovog kvantiteta, odnosno, (raspoloživih) količina: počev od bilansa voda, preko poroznosti, hidrogeoloških svojstava stena i tipova izdani, do uslova hranjenja i dreniranja podzemnih voda i njihovog međusobnog odnosa sa površinskim vodama, dok je *kvalitet* pominjan uzgred. Pojam "*kvalitet podzemnih voda*" *izuzetno je kompleksan* i njime je obuhvaćen veliki broj parametara, na osnovu čijih vrednosti se izvodi ocena o ukupnom kvalitetu podzemne vode i njenoj upotrebljivosti za određene namene.

Zbog kompleksnosti i značaja, izlaganje o kvalitetu podzemnih voda podeljeno je u dva dela (IX i X). Ovaj, IX deo, čine tri glavna poglavlja:

### 14. UVODNE NAPOMENE

### 15. FIZIČKA SVOJSTVA PODZEMNIH VODA

### 16. HEMIJSKI SASTAV PODZEMNIH VODA (delimično; nastavljeno u X delu)

U okviru **poglavlja 14.** navedeni su *agensi* koji generišu prirodni kvalitet podzemnih voda, glavni parametri kvaliteta (*fizička svojstva, hemijski sastav i mikrobiološka svojstva* podzemnih voda), a pomenut je i antropogeni uticaj, koji, najčešće, dovodi do zagađivanja podzemne vode.

U okviru *fizičkih svojstava* (**pogl. 15**) obrađeni su: *temperatura, prozračnost, boja, miris, ukus i elektroprovodljivost*.

U okviru izlaganja o *hemijском sastavu podzemnih voda* (**pogl. 16**), razmotreno je: poreklo rastvorenih materija, osnovne hemijske reakcije u „sistemu“ voda-stena, koje dovode do „obogaćivanja“ hemijskog sastava podzemnih voda, zašto postoji i u čemu se ogleda hidrogeohemijska zonalnost po vertikalnom profilu, osnovni pokazatelji hemizma podzemnih voda (*ukupna mineralizacija, tvrdoća, pH vrednost i RedOks potencijal*), komponente hemijskog sastava podzemnih voda i njihova *osnovna podela na makro- i mikrokomponente*, pri čemu su detaljnije obrađene *glavne* ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  i *jedinjenja silicijuma*) i *sporedne* ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+(3+)}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  i *jedinjenja azota*) makrokomponente.

## X DEO: KVALITET PODZEMNIH VODA (2)

U nastavku poglavlja 16., sažeto su izložene bitne informacije o *mikrokomponentama, organskim materijama i gasovima u podzemnim vodama*, dok je nešto širi osvrt posvećen njihovoj *radioaktivnosti i izotopskom sastavu*. Iako, formalno, predstavlja odliku njihovog kvaliteta (hemijskog sastava), *izotopski sastav* podzemnih voda nije (primarno) pokazatelj mogućnosti njihovog korišćenja za određene potrebe, već služi za *ocenu njihove starosti, porekla, uslova formiranja, brzine vodozamene i dr.*

U poglavlju 17. je, u osnovnim crtama, izložena problematika *mikroorganizama u podzemnim vodama*. U poglavlju 18 je prikazana *klasifikacija Alekina*, na osnovu hemijskog sastava podzemnih voda, a u poglavlju 19 je razmotrena definicija pojma "*mineralne vode*", uslovi formiranja, njihova podela na: *lekovite, industrijske i termalne* i neki praktični aspekti njihovog korišćenja.

## XI DEO: REŽIM PODZEMNIH VODA I OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA

Izlaganje je podeljeno u dva glavna poglavlja:

### 20. REŽIM PODZEMNIH VODA i 21. OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA

Pod *režimom PV (ili režimom izdani)* podrazumeva se proces/dinamika izmena kvantitativnih svojstava i kvaliteta PV, u vremenu i prostoru, pod uticajem prirodnih i antropogenih faktora. Izlaganje u poglavlju 20. ima za cilj da "uveže" sva dosadašnja saznanja o kvantitativnim (nivo, proticaj, brzina filtracije, hidraulički gradijenti) i kvalitativnim svojstvima podzemnih voda i prikaže kako i koliko intenzivno, pojedini faktori režima utiču na njih. Konstatovano je, između ostalog, da je (slobodni) nivo izdani najpodložniji kolebanjima, da je uticaj padavina (kao faktora uticaja), u načelu, najveći, kao i da, sa povećanjem dubine, režim postaje stabilniji.

Pored padavina, obrađen je i uticaj ostalih *meteoroloških faktora* (isparavanje, vlažnost vazduha, atmosferski pritisak i vetrovi), kao i ostalih grupa faktora: *hidroloških, geodinamičkih, uticaja Sunca i Meseca* i, sve zastupljenijih, *antropogenih*.

Izložena je i *podela režima na tipove* i to sa aspekta vremenskog trajanja, odnosno, periodičnosti uticaja faktora, kao i sa aspekta određenih hidrodinamičkih specifičnosti. Na kraju poglavlja 20. je dat kratak osvrt na *osmatranje režima podzemnih voda*, odnosno, *na hidrogeološki monitoring*: čemu služi, osnovna načela primene, šta obuhvata i dr.

Sadržaj poglavlja 21. predstavlja mali iskorak iz okvira do sada uobičajenog sadržaja predmeta "Osnovi hidrogeologije, s obzirom da *zaštita podzemnih voda (i u pogledu kvaliteta i u pogledu prekomerne eksploatacije)* već zadire u domen "primenjene hidrogeologije", ali se i logično nadovezuje na prethodno izlaganje o režimu podzemnih voda.

U ovom poglavlju, u osnovnim crtama je razmatrano sledeće: *podzemne vode kao integralni deo životne sredine*, ključni pojmovi iz oblasti zaštite kvaliteta (*zagađivanje izdani, zagađujuće materije*,

*zagađivači, ranjivost izdani, rizik od zagađivanja, migrativnost zagađujućih materija), šta su to preventivne mere u cilju očuvanja kvaliteta i sprečavanja nadeksploatacije podzemnih voda, a šta sanacione (kada nastupi "šteta"), šta su i na kojim principima se uspostavljaju zone sanitarne zaštite.*

## **XII DEO: ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA**

Izlaganje je u okviru jednog (glavnog) poglavlja:

### **22. ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA.**

Cilj izlaganja je sticanje osnovnog uvida u to kako podzemne vode mogu da se zahvate (kaptiraju), da bi se koristile (kao resurs), kao i kakvim tehničkim rešenjima možemo da izvršimo regulaciju (popravku) njihovog nepovoljnog prirodnog režima nivoa i(li) proticaja.

*Zahvati podzemnih voda su podeljeni u tri grupe: 1-Kaptaže izvora, 2-Bunari i 3-Horizontalne vodozahvatne konstrukcije. O pojedinim vrstama zahvata, u okviru svake od izdvojenih grupa, date su osnovne informacije u pogledu konstruktivnih karakteristika i načina funkcionisanja.*

U okviru izlaganja o *regulaciji režima*, razmotrena su osnovna načela i tehnička rešenja *veštačkog povećavanja rezervi podzemnih voda* (veštačko prihranjivanje, veštačko podizanje i veštačko sniženje nivoa izdani), *odvodnjavanja rudarskih radova* i *odvodnjavanja poljoprivrednog zemljišta*.

IDEO  
**UVOD**

## **1. POJAM, PREDMET IZUČAVANJA I PRAKTIČNI ZNAČAJ HIDROGEOLOGIJE**

**Hidrogeologija** (*hydros-voda, geos-zemlja, logos-nauka*) je nauka o podzemnim vodama (PV), koja izučava njihovo formiranje, rasprostranjenje, kretanje i isticanje, koegzistenciju i sadejstvo sa ostalim elementima životne sredine (geološka sredina, površinske vode, meteorološki faktori, zemljište, živi svet), njihov kvalitet, rezerve, režim, mogućnosti korišćenja i uslove zaštite od zagađivanja i prekomerne eksploatacije.

U međunarodnoj stručnoj terminologiji se, pored termina **hidrogeologija** (eng. „hydrogeology“), a u zavisnosti od prakse i "navike" onih koji se bave njenim izučavanjem, koriste i termini : (eng.) „geohydrology“ (geohidrologija) i (eng.) „groundwater hydrology“ (hidrologija podzemnih voda).

PV su u tesnoj vezi i aktivnoj koegzistenciji sa drugim vidovima prirodnih voda i stenama i predstavljaju jedan od najaktivnijih vidova geološke materije, koja utiče na niz geoloških procesa u zemljinoj kori. Rastvaraju stene i minerale i odnose/iznose rastvorene materije u reke, jezera i mora, ili ih odlažu na svom putu u zemljinoj kori. Mnoga fizička i hemijska svojstva stena uslovljena su prisustvom PV. Učestvujući u opštem hidro-meteorološkom ciklusu Zemlje, PV, zajedno sa površinskim i atmosferskim vodama, određuju vodni bilans Zemlje. Rastvaračkim i transportnim dejstvom, PV učestvuju i u oblikovanju savremenog reljefa.

Praktičan značaj PV, kao resursa, u životu i delatnosti čoveka je ogroman. Koristimo ih kao pijaće vode, za navodnjavanje poljoprivrednih površina, u prehrambenoj industriji, kao komunalne i tehničke vode. Mineralne i termalne PV, zavisno od hemijskog sastava i temperature, koriste se u lečenju (balneoterapiji), rekreaciji, toplifikaciji objekata, kao energenti, ili za dobijanje pojedinih korisnih industrijskih sirovina. Pored toga, prisustvo i(li) nepovoljan režim PV, mogu da predstavljaju smetnju za obavljanje određenih ljudskih delatnosti: plavljenje poljoprivrednih površina, urbanih zona, rudnika, saobraćajnica i dr. Upravo svi navedeni aspekti praktičnog značaja PV i, sa njima povezani problemi, predstavljaju polje delovanja hidrogeologije.

Polazeći od prethodno izloženog, mogu da se izdvoje dva osnovna cilja/svrhe hidrogeologije [87, 15 - delimično izmenjeno]:

- 1) **Definisanje i razumevanje osnovnih načela hidrogeologije**, izloženih upravo u (ovom) predmetu "Osnovi hidrogeologije" (ili "Opšta hidrogeologija") i, na osnovu toga,
- 2) **Rešavanje praktičnih problema u domenu korišćenja i zaštite (od) PV**, čime se bavi niz specijalizovanih hidrogeoloških disciplina: Metodika hidrogeoloških istraživanja, Hidrogeološko kartiranje, Dinamika PV, Hidrohemija, Hidrogeologija mineralnih voda, (Hidro)Geotermologija, Zaštita PV, Modeliranje PV, Rudnička hidrogeologija i dr.

Po svojoj suštini, **hidrogeologija je deo geologije** i, kao takva, tesno sarađuje sa, praktično svim geološkim disciplinama: petrologijom, geohemijom, regionalnom geologijom, geomorfologijom, geologijom ležišta mineralnih sirovina, inženjerskom geologijom, primenjenom geofizikom i dr. Međutim, s obzirom na jedinstvenost ciklusa voda u prirodi, **hidrogeologija je**, isto tako, **tesno povezana sa hidrologijom i meteorologijom**. Upravo zato, neki stručnjaci na hidrogeologiju primarno gledaju kao na deo hidrologije, pa odatle i potiču pomenute terminološke razlike u njenom nazivu: *hidrogeologija-geohidrologija-hidrologija podzemnih voda*.

S obzirom na tesnu povezanost i koegzistenciju PV sa ostalim elementima životne sredine, hidrogeološka istraživanja su često integrisana u projekte u domenu: rudarstva, poljoprivrede, građevine, planiranja i urbanizacije prostora, zaštite prirode i dr.

## **2.KRAĆI ISTORIJAT RAZVOJA HIDROGEOLOGIJE**

Voda je osnovna životna namirnica i uslov za opstanak Čoveka, koji je oduvek smišljao načine za pronalaženje kvalitetnih voda, posebno u aridnim (sušnim) regionima. Sa razvojem civilizacije, ljudi su, pored zahvatanja izvorskih i rečnih voda, počeli da prodiru i u zemljinu unutrašnjost (bunarima, oknima i dr.), da bi doprli do dubljih vodonosnih slojeva i zahvatili PV. Još od antičkih filozofa nastaju teorije o postanku, načinu kretanja i obnavljanja PV. Pored namene za piće i vodosnabdevanje, stare civilizacije su veliku pažnju poklanjale mineralnim izvorima, kaptirali ih i koristili u rekreativne i balneo-terapeutske svrhe. O tadašnjem korišćenju mineralnih voda danas svedoče ostaci starih kaptaza i rimskih kupatila („termi“) na velikom broju lokaliteta u svetu, koji su i danas banjska mesta. Veliki broj njih je i na teritoriji Srbije (Vrnjačka banja, Ribarska banja, Gamzigradska banja, Sijarinska banja i dr.), a pored ostataka „termi“, prisutni su i oni iz perioda srednjovekovne Srbije, a potom i otomanske okupacije, pa se i danas, na pojedinim banjskim lokalitetima, koriste termini „ilidža“ (banja) i „hamam“ (kupaćilo).

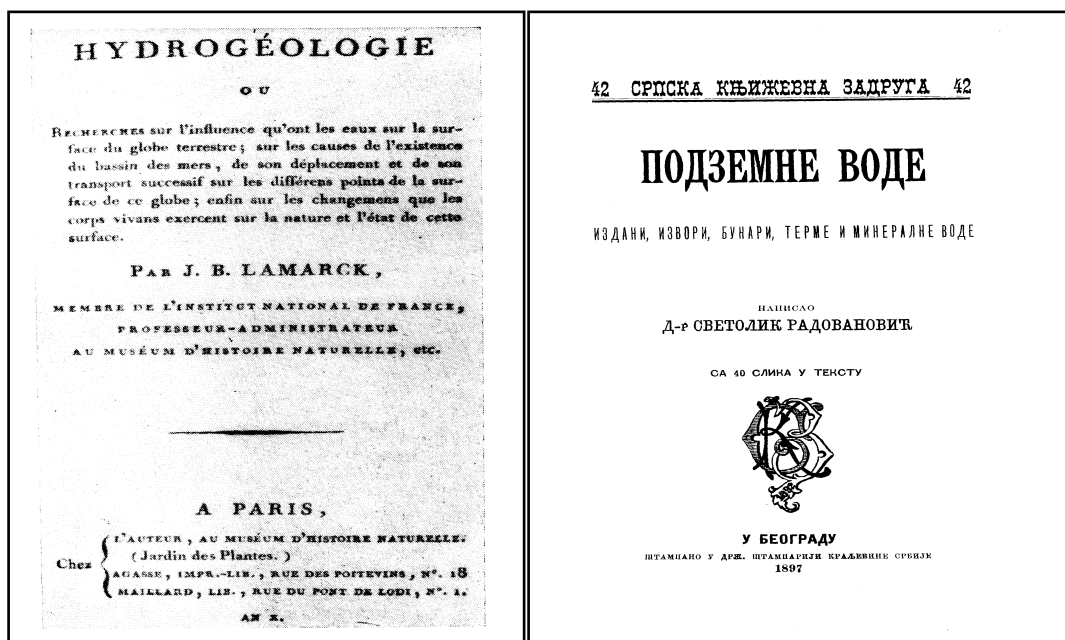
Napredak tehnike omogućio je i usavršavanje metoda i veće dubine izrade bunara, pa je već 1126. godine, kod mesta Artoa, u Francuskoj, izbušen bunar kojim je zahvaćena PV pod pritiskom (sa samoizlivom), pa se i danas ovakvi bunari nazivaju „*arteskim*“.

Termin *hidrogeologija* prvi put navodi francuski prirodnjak Lamark, 1802. godine (slika 2.1), a 80-ih godina XIX veka, ovaj termin je naučno prihvaćen. Sredinom ovog veka Darcy i Dupuit su, svojim fundamentalnim radovima o filtraciji PV, postavili temelje moderne hidrogeologije. Kao početak razvoja hidrogeologije u Srbiji, može se označiti sredina XIX veka, kada brojni (pretežno) austrijski balneolozi, širom Srbije, sprovode ispitivanja lekovitih voda. U poslednjim decenijama XIX veka u Srbiji su objavljeni brojni radovi o PV, čiji su autori bili naši eminentni naučnici: Svetolik Radovanović, Jovan Cvijić, Jovan Žujović, Marko Leko i dr.

Medju pionirima srpske hidrogeologije, posebno mesto pripada Svetoliku Radovanoviću, koji objavljuje veći broj radova kojima tretira različite hidrogeološke fenomene u Srbiji, a od posebnog značaja je njegova publikacija “Podzemne vode - izdani, bunari, terme i mineralne vode” (slika 2.1).

Delo S. Radovanovića i ostalih autora tog doba, posle Drugog svetskog rata, nastavlja veći broj srpskih hidrogeologa, da bi, počev od 1960.-ih, ova nauka započela svoj puni razvoj u Srbiji. Od 1971. godine, hidrogeologija je poseban smer u okviru beogradskog Rudarsko-geološkog fakulteta.

Velike potrebe za PV, kao višenamenskim resursom, kao i sve izraženiji problemi zagađenja i zaštite od negativnih antropogenih uticaja, uslovlili su intenzivan razvoj hidrogeologije. Sada je to nauka sa izuzetno širokim i kompleksnim poljem delovanja, sa velikim brojem disciplina koje se vremenom modifikuju, medjusobno dopunjuju i spajaju, razdvajaju, nastaju nove, u skladu sa potrebama istraživačke prakse i sve izraženijom multidisciplinarnošću i korišćenjem novih tehnologija kod rešavanja problema.



**Slika 2.1.** *Levo: Naslovna strana prvog udžbenika iz hidrogeologije (Lamarck, 1802);  
Desno: Naslovna strana knjige "Podzemne vode - izdani, bunari, terme i mineralne vode"  
(Radovanović, 1897.) - [preuzeto iz 17]*

Rešavanje čitavog niza praktičnih problema spada u polje delovanja savremene hidrogeologije:

- Ocena rezervi PV za potrebe vodosnabdevanja pijaćim i tehničkim vodama
- Melioracije poljoprivrednih i drugih površina.
- Formiranje podloga i projektnih rešenja vezanih za odbranu od PV: kod izgradnje hidrotehničkih objekata (brana, nasipa), urbanih zona, saobraćajnica i dr.
- Ocena uslova odvodjenosti ležišta mineralnih sirovina, prognoza priliva i projektovanje sistema za odbranu od PV, zbrinjavanje nekvalitetnih rudničkih voda
- Hidrogeohemijska prospekcija ležišta mineralnih sirovina.
- Ocena rezervi mineralnih voda, sa ciljem njihovog korišćenja u balneološke i rekreativne svrhe ili kao stonih (flaširanih) voda.
- Ocena rezervi i ekonomičnosti korišćenja mineralnih industrijskih voda, "obogaćenih" korisnim sirovinama (jod, brom, litijum, stroncijum, natrijum-hlorid i dr).
- Ocena rezervi i rentabilnosti korišćenja termalnih voda, kao energenata za: toplifikaciju poljoprivrednih i turističko-rekreativnih objekata, naselja, proizvodnju električne energije i dr.
- Zaštita podzemnih voda: propisivanje i kontrola sprovođenja mera sanitarne zaštite izvorišta PV, ocena ranjivosti (ugroženosti od zagađivanja) resursa PV na regionalnom i lokalnom nivou, evidentiranje zagađenja i ocena ugroženosti resursa PV i geosredine, remedijacija (prečišćavanje) PV i geosredine i dr.

Savremeni zadaci hidrogeologije i njena sve kompleksnija struktura, sa sve izraženijim ekološkim aspektom, u kontekstu integralnog upravljanja (svim) prirodnim resursima, neumitno šire njeno polje delovanja i iziskuju multidisciplinarnost u rešavanju problema vezanih za PV. Pored geoloških disciplina, hidrologije i meteorologije, *zastupljeni su i:*

- *hemija, biologija, tehnologija* – pretežno u rešavanju problema zagađivanja i zaštite resursa PV
- *rudarstvo, poljoprivreda, vodoprivreda i prostorno planiranje* - u sklopu integralnog upravljanja i optimalnog korišćenja ("trošenja") prirodnih resursa
- *sociologija* - u kontekstu globalno izraženog trenda deficita pijaćih voda, koje predstavljaju jedan od suštinskih socio-ekonomskih parametara životnog standarda ljudi
- *ekonomija* - u kontekstu realnog/tržišnog vrednovanja resursa PV za različite namene
- *IT* – iz kojih proističu „alati“ za potrebe: sortiranja i obrade podataka, grafičkih prikaza (hidrogeološke i srodne karte, dijagrami i sl.), hidrodinamičkog modeliranja i dr.

### **3.VODA NA ZEMLJI**

Voda je prisutna u atmosferi, na površini Zemlje i u Zemljinoj kori, i javlja se u različitim agregatnim stanjima i sa različitim fizičko-hemijskim svojstvima. Može da bude u „slobodnom“ stanju, obrazujući površinske vodotoke i akumulacije i najveći deo podzemnih voda. Zatim, može da egzistira u čvrstom stanju, u vidu pare, kao fizički vezana i kao hemijski vezana, u mineralima. U dubokim delovima litosfere, pri temperaturama višim od kritične (koja se kreće u rasponu 374-450 °C, u zavisnosti od veličine mineralizacije PV), voda prelazi u nadkritično stanje, za koje je karakteristična nepostojanost vodonične veze i disocijacija molekula vode na sastavne jone.

Sve vode Zemlje obrazuju **hidrosferu** planete, koju čine: ***atmosfera, litosfera i biosfera***.

**Hidrosfera** je spoljašnji omotač zemljine kore, čije su granice okvirne. Kao gornja granica, najčešće se uzima najviši deo troposfere (najnižeg sloja atmosfere), koji odgovara visini tropopauze (8-17 km), iznad koje molekuli vode uglavnom podležu fotodisocijaciji. Donja granica hidrosfere nije definisana. To je dubina zemljine kore do koje se PV voda javlja u tečnom, čvrstom i gasovitom stanju. Ukupna zapremina vode u hidrosferi, bez hemijski vezane i vode u nadkritičnom stanju, iznosi oko  $1.39 \times 10^9 \text{ km}^3$  (tabela 3.1).

#### **3.1. ATMOSFERSKA VODA**

Voda se, u atmosferi, nalazi u njenom najnižem sloju – troposferi, u vidu vodene pare. Količina vode u troposferi je relativno mala i iznosi  $12.9 \times 10^3 \text{ km}^3$ , odnosno 0.001 % od ukupnih rezervi voda na Zemlji. Kada bi istovremeno kondenzovale, atmosferske vode bi na površini Zemlje formirale sloj debljine manje od 3 mm. Sadržaj vodene pare u vazduhu varira od 0.2-2.6 %, na srednjim geografskim širinama, do oko 4 % u zoni ekvatora. Atmosferske padavine se odlikuju niskim sadržajem rastvorenih materija, od 10 do 20 mg/l, dok je iznad okeana nešto veća.

Vazduh (u troposferi) je smesa gasova, vodene pare i čvrstih čestica (tabela 3.1.1). *Vodena para u vazduhu nastaje isparavanjem vode sa površine mora, okeana i kopna.*

#### **3.2. POVRŠINSKE VODE**

Na površini Zemlje, voda se javlja u čvrstom i tečnom stanju, u: *morima, okeanima, jezerima, rekama, lednicima i veštačkim vodo-akumulacijama*. Najveći deo površinskih voda čine slane vode



okeana i mora, koje zauzimaju oko 2/3 ukupne površine Zemlje. Prosečna mineralizacija (sadržaj rastvorenih materija) morske vode iznosi 35 g/l, ali postoje razlike. Tako, "zaslađene" vode u zoni zaliva, gde su doticaji rečnih (slatkih) voda konstantni, mogu da imaju mineralizaciju od svega nekoliko g/l, dok mineralizacija voda tropskih mora, zbog povećanog isparavanja, dostiže 40-42 g/l. **Ukupne rezerve voda svetskih okeana i mora iznose oko  $1,34 \times 10^9 \text{ km}^3$  ili 96.5 % od ukupnih rezervi na Zemlji.**

**Tabela 3.1. Količine voda u hidrosferi [46, 48 - adaptirano]**

Vidovi voda u hidrosferi	Površina ( $10^6 \text{ km}^2$ )	Zapremina ( $\text{km}^3$ )	% od ukupnih rezervi voda	% od malomineralizovanih voda
Vode atmosfere	510,0	12.900	0,001	0,04
<b>Okeani i mora</b>	361,3	1.338.000.000	<b>96,5</b>	–
<b>Led: - polarni</b>	16,0	24.023.500	1,7	<b>68,6</b>
- ostali led i sneg	0,3	340.600	0,025	1,0
Vode jezera				
- malomineralizovane	1,2	91.000	0,007	0,26
- slane	0,8	85.400	0,006	–
Vode močvara i blatišta	2,7	11.470	0,0008	0,03
Rečne vode	148,8	2.120	0,0002	0,006
Biološki vezane vode	510,0	1.120	0,0001	0,003
Zemljišna vlaga	82,0	16.500	0,0012	0,05
<b>Podzemne vode</b>				
-malomineralizovane	<b>134,8</b>	<b>10.530.000</b>	<b>0,76</b>	<b>30,10</b>
- slane	134,8	12.870.000	0,93	–
Ukupne rezerve voda	510,0	1.385.984.610	100	–
<b>Malomineralizovane</b>	<b>148,8</b>	<b>35.029.210</b>	<b>2,5</b>	<b>100</b>

**Tabela 3.1.1. Sastav vazduha [73, 36 - adaptirano]**

Stalne komponente	Sadržaj (%)	Promenljive komponente	Sadržaj (%)
Azot ( $\text{N}_2$ )	78,084	<b>Vodena para</b>	<b>&lt; 4</b>
Kiseonik ( $\text{O}_2$ )	20,946	<b>Voda (tečna + led)</b>	<b>&lt; 1</b>
Argon (Ar)	0,934	Ozon ( $\text{O}_3$ )	< $0,07 \cdot 10^{-4}$
Ugljen-dioksid ( $\text{CO}_2$ )	0,033–0,1	Sumpor-dioksid ( $\text{SO}_2$ )	< $1 \cdot 10^{-4}$
Neon (Ne)	$18,18 \cdot 10^{-4}$	Azot-dioksid ( $\text{NO}_2$ )	$0,02 \cdot 10^{-4}$
Helijum (He)	$5,24 \cdot 10^{-4}$	Amonijak ( $\text{NH}_3$ )	u tragovima
Kripton (Kr)	$1,14 \cdot 10^{-4}$	Ugljen-monoksid (CO)	oko $0,2 \cdot 10^{-4}$
Ksenon (Xe)	$0,087 \cdot 10^{-4}$	Prašina	< $10^{-5}$
Vodonik ( $\text{H}_2$ )	$0,5 \cdot 10^{-4}$		
Metan ( $\text{CH}_4$ )	$2 \cdot 10^{-4}$		
Azot-suboksid ( $\text{N}_2\text{O}$ )	$0,5 \cdot 10^{-4}$		
Radon (Rn)	$6 \cdot 10^{-18}$		

**Najveće količine malomineralizovanih (slatkih) voda akumulirane su u okviru lednika i stalnog snežnog pokrivača ( $24.064,1 \times 10^3 \text{ km}^3$ ), što čini oko 70 % ukupnih rezervi malomineralizovanih voda na zemljinoj površini i 1.74 % ukupnih svetskih rezervi voda. Lednici zauzimaju više od  $16 \times 10^6 \text{ km}^2$ , tj. oko 11 % površine Zemlje. Najveća debljina leda je na**

Antarktiku, u proseku oko 2.000 m. Međutim, poslednjih decenija, beleži se izražen trend zagrevanja Zemlje, što za posledicu ima brže otapanje lednika, pa time i određene kvantitativne i kvalitativne preraspodele voda na Zemlji.

**U jezerima** su akumulirane slane i slatke (malomineralizovane) vode. **Slatke zapremaju  $91 \times 10^3 \text{ km}^3$  ili 0.26 %** od ukupnih rezervi slatkih voda na Zemlji.

**Rečne (slatke) vode** najčešće imaju mineralizaciju u opsegu 200-500 mg/l. **Njihove ukupne rezerve iznose  $2.1 \times 10^3 \text{ km}^3$  ili 0.0002 %** od ukupnih rezervi malomineralizovanih voda.

### 3.3. PODZEMNE VODE

#### 3.3.1. Građa Zemlje

Najveći broj istraživača je saglasan da je građa Zemlje zonarna, odnosno, da je Zemlja podeljena na tri (glavne) geosfere: ***zemljinu koru, mantl i jezgro***.

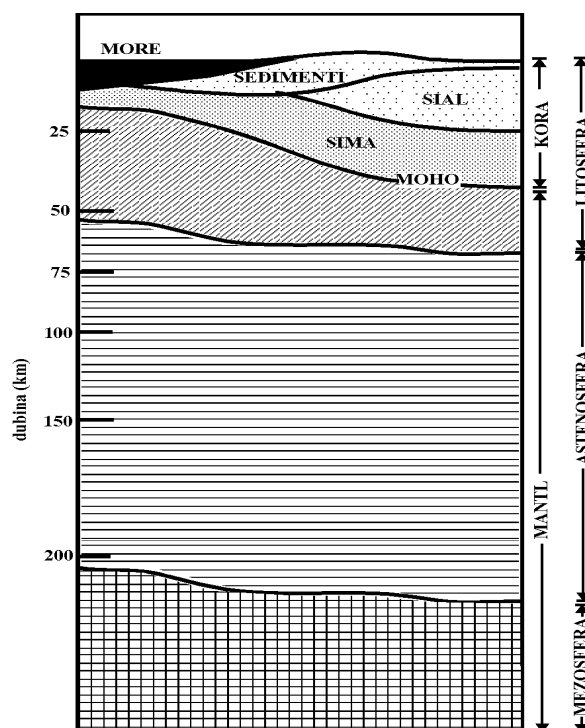
**Zemljina kora** je čvrsta spoljašnja sfera Zemlje, koja se sastoji od *kontinentalne i okeanske kore*. *Kontinentalnu koru* čine konsolidovani kontinentalni delovi, u čijoj građi učestvuju sedimentne, magmatske i metamorfne stene. Odlikuje se različitom debljinom: od 35 do 40 km u oblasti platformi, pa do 75 km ispod visokih planinskih venaca Anda i Himalaja. Naziva se i *granitska kora*, po steni koja je dominantna u njenoj građi, ili *SIAL*, prema glavnim elementima - silicijumu i aluminijumu. *Okeanska kora* je tanja. Debljina joj varira od 5-10 km i sastoji se pretežno od bazalta i manjih količina stena koje su utisnute iz gornjeg dela mantla (peridotita i serpentinita), pa se naziva i *bazaltna kora* ili *SIMA* (po preovlađujućim elementima silicijumu i magnezijumu).

**Mantl** je unutrašnja geosfera i nalazi se između Zemljine kore i jezgra. Njegova prosečna debljina je oko 2900 km i čine ga tri dela: gornji, srednji i donji. Gornji mantl se sastoji od ultrabazičnih stena (peridotit, eklogit). Zajedno sa zemljinom korom, on čini čvrstu spoljnu "ljusku" Zemlje koju nazivamo ***litosferom*** (slika 3.3.1). Ispod čvrste litosfere nalazi se *astenosfera* (srednji deo mantla), koja je plastična i debela nekoliko stotina kilometara, dok donji deo mantla čini *mezosfera*, debela oko 1900 km. Ispod mezosfere se nalazi najdublja geosfera - ***zemljino jezgro***.

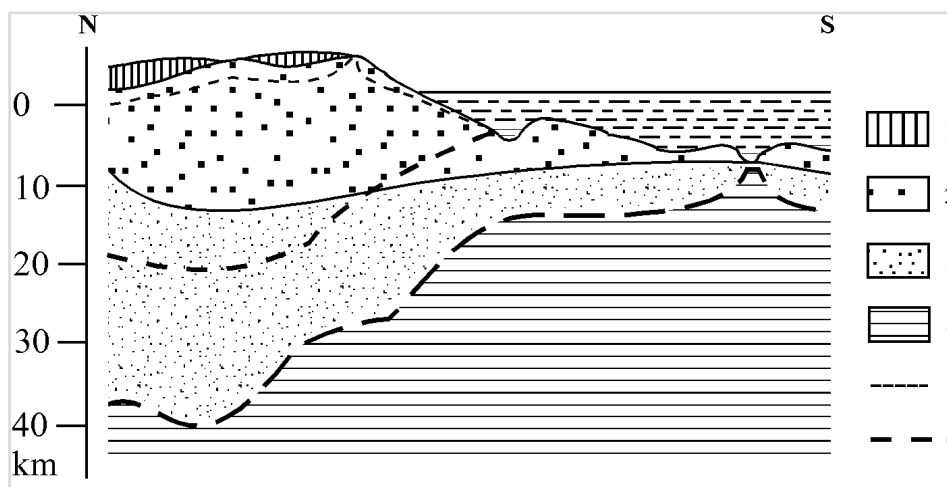
#### 3.3.2. Podzemne vode u litosferi

**Litosferu** (čvrsti Zemljin omotač) izgrađuju stene. Na osnovu načina postanka, sve stene koje izgrađuju litosferu podeljene su u tri velike grupe: **magmatske, sedimentne i metamorfne stene** [23]. **Sve vode koje se nalaze u litosferi nazivaju se podzemnim vodama (PV)**. Različitih su vidova i sastava. Javljaju se: *u vidu pare, u tečnom, čvrstom i nadkritičnom stanju i kao fizički i hemijski vezane vode*. Raspored PV u vertikalnom profilu litosfere je neravnomeran, kako po obimu, tako i po vidovima i sastavu. Uslovljen je poroznošću stena i promenama termodinamičkih i fizičko-hemijskih uslova po dubini (slika 3.3.2).

Mogu da se izdvoje *dve zone rasprostranjenja PV u vertikalnom profilu: gornja i donja*.



**Slika 3.3.1.** Šematizovani profil zemljine kore i gornjeg omotača [64, 17]



**Slika 3.3.2.** *Izmena vidova vode u zemljinoj kori [66]: 1 - led; 2 - tečna voda; 3 - voda u nadkritičnom stanju; 4 – mantl (voda odsustvuje); 5 - granica između sedimentnog i granitnog sloja; 6 - granica između granitnog i bazaltnog sloja*

**Gornja zona** obuhvata sve vode u tečnom, čvrstom i gasovitom stanju, kao i sve vezane (fizički i hemijski) vode. Debljina gornje zone, na kontinentima, iznosi 20-25 km, dok u predelu okeana ne prelazi nekoliko kilometara. Debljina podzone leda varira od maksimalnih 1-2 km, u oblastima višegodišnjeg zamrzavanja, do 0-5 m u uslovima sezonskog mržnjenja tla.

**U donjoj zoni** prisutna je prvenstveno voda u nadkritičnom stanju.

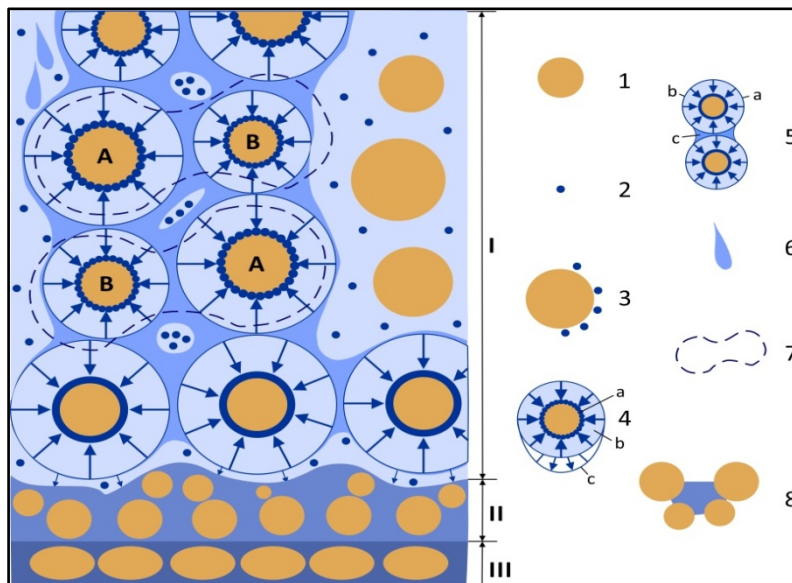
### 3.3.3. Vidovi podzemnih voda

Jednu od prvih klasifikacija PV po vidu pojavljivanja dao je Lebedev (1936) i ista je, sa manjim izmenama, aktuelna i danas [17] :

- **voda u nadkričnom stanju,**
- **vodena para**
- **hemijski vezana voda**
- **fizički vezana voda**
- **kapilarna voda**
- **slobodna ili gravitaciona voda i**
- **led**

**Voda u nadkričnom stanju** se nalazi u dubokim delovima litosfere, koje karakterišu ekstremno visoke temperature i pritisci. Ima je i u plićim delovima - u magmatskim rastopima, gde, pri sniženju temperature i pritiska, prelazi u paru ili tečno stanje.

**Vodena para**, zajedno sa vazduhom, ispunjava pore u zemljištu i stenama, koje nisu ispunjene vodom u slobodnom (tečnom) stanju (slika 3.3.3.1). Vodena para se, zahvaljujući velikoj pokretljivosti, premešta s mesta većeg napona, ka mestima sa manjim naponima pare ili od više vlažnih ka manje vlažnim delovima zemljišta (stene). Kreće se u svim pravcima. U zemljište prodire iz atmosfere, ili se, formira pri isparavanju vlage iz zemljišta i stena. Pri hlađenju zemljišta, do tačke rose i niže, vodena para kondenzuje, dajući fizički vezanu ili slobodnu (gravitacionu) vodu. Debljina sloja vodene pare u zemljištu najčešće ne prelazi nekoliko metara. Veće količine pare formiraju se od pregrejanih voda, u oblasti gejzira i savremenih vulkana.



**Slika 3.3.3.1. Šematski prikaz vidova podzemnih voda [30, 20]:** I - zona aeracije; II - kapilarni pojas; III - zona zasićenja slobodnim PV; 1 - čestica stene; 2 - molekul vode u vidu pare; 3 - čestica sa nepotpunom higroskopnošću; 4 - čestica sa higroskopnom (a), otvorenom (b), i gravitacionom (c) vodom; 5 - čestice sa adsorpcionom (a), otvorenom (b), i kapilarno-kontaktom (c) vodom; 6 - infiltrirajuća voda; 7 - konture izravnjanja debljine opne pri kretanju vode od čestice A (sa većom debljinom opne) prema čestici B; 8 - kapilarna voda

**Hemijski vezana voda** nalazi se u mineralima, u vidu molekula, ili u njihovoj kristalnoj rešetki u obliku jona  $H^+$  i  $OH^-$ . Promenom temperature i pritiska, pod dejstvom fizičko-hemijskih procesa u zemljinoj kori, prelazi u slobodnu i obratno, iz slobodne u hemijski vezanu (proces dehidracije i hidracije).

**Fizički vezana voda** se javlja se u vidu opni različitih debljina oko čestice skeleta stena (slika 3.3.3.1) ili na zidovima prslina i pukotina. Veza vode sa stenama ostvarena je pod dejstvom molekularnih sila, koje (u ovom redu veličina) višestruko nadjačavaju silu gravitacije. Prosečna gustina fizički vezane vode je oko  $2 \text{ g/cm}^3$ , a pokretljivost joj je znatno manja od slobodne vode.

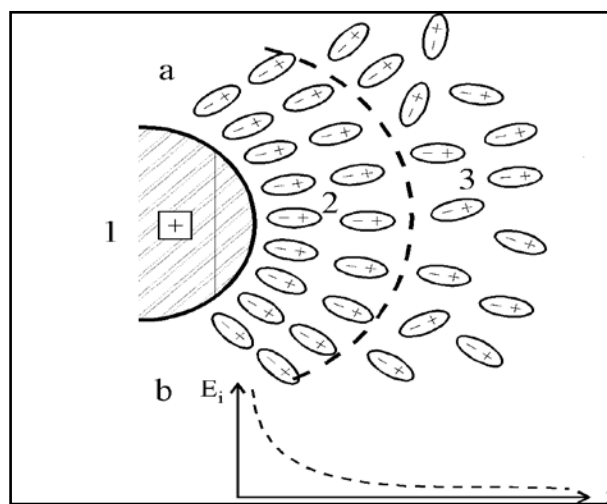
Na osnovu čvrstoće veze sa stenom, fizički vezane vode su podeljene na *čvrsto* i *slabo vezane*.

*Čvrsto vezana voda* u stenu dospeva adsorpcijom molekula vode iz vodene pare ili tečne (slobodne) vode. Svojstvena je prvenstveno tanko disperznim stenama (gline). Čestica stene obavijena je tankom opnom čvrsto vezane vode, koja se drži jakim molekularnim i elektrostatičkim silama (do  $10^9 \text{ Pa}$ ). Ne podleže zakonu hidrostatičke, a njeno pokretanje se odvija jedino pri prelasku u vodenu paru.

Mogu se izdvojiti *dva sloja čvrsto vezane vode*. *Prvi, koji neposredno naleže na čestice stena*, formira se pri njenoj nepotpunoj higroskopskoj vlažnosti. Debljina ovog (nepokretnog) sloja je 1-3 molekula, a po svojstvima je blizak čvrstoj materiji. *Drugi sloj čvrsto vezane vode*, koji se naziva i *solvacioni ili osmotski* ima debljinu reda 10-20 molekula, karakteriše ga slabija veza sa površinom čestice, ima određenu pokretljivost, ali se razlikuje od slobodne vode. Odstranjuje se pri zagrevanju na  $100-120^\circ\text{C}$ . U zavisnosti od mehanizma apsorbovanja vode od strane čestice stene, čvrsto vezana voda može biti *higroskopska i adsorpciona* (slika 3.3.3.1). *Higroskopska voda* se apsorbuje iz vazduha, dok se *adsorpciona voda* apsorbuje iz tečne faze.

*Slabo vezana voda* obrazuje periferni deo vodene opne i naziva se *opnena* (slike 3.3.3.1 i 3.3.3.2). Kreće se pod dejstvom molekularnih sila i gradijenta vlažnosti i to od deblje ka tanjoj opni. Ne pokorava se zakonu hidrostatičke i razlikuje se od slobodne vode. Opnena voda zauzima deo pornog prostora stene i umanjuje prostor za formiranje i kretanje slobodne PV.

Sa povećanjem vlažnosti stene, formira se *slobodna (gravitaciona) voda* (slike 3.3.3.1 i 3.3.3.2).



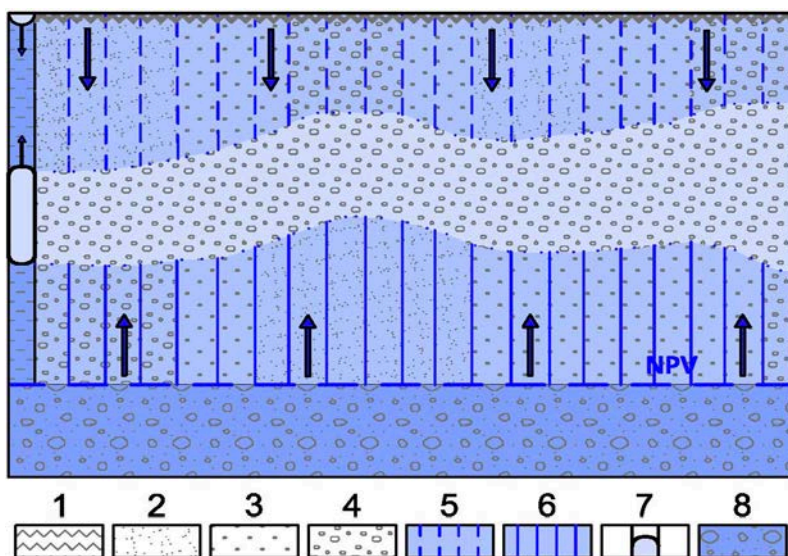
**Slika 3.3.3.2. Šema zadržavanja molekula vode uz česticu čvrste stene (a) i grafik izmene njihove molekularne veze  $E_i$  u zavisnosti od rastojanja  $r$  od površine čestice (b) [30]: 1 - čestica stene; 2 - fizički vezana (opnena) voda; 3 - slobodna voda**

**Kapilarna PV** je vezana za kapilarne pore i prsline u zemljištu i stenama. Kapilarno penjanje vode generisano je intermolekularnim privlačnim silama između zidova pora (pukotina) i vode, kao i površinskim naponima između zidova uske cevi (pore) i površine vode u njoj. Ukoliko je stena sitnozrnijeg sastava, utoliko je kapilarnost jače izražena. U određenim slučajevima, na kapilarnu vodu može da ima uticaja i sila gravitacije, tako da ovaj vid PV može da predstavlja prelazni tip između fizički vezanih i slobodnih (gravitacionih) voda. Zavisno od izvora kapilarnih voda i njihove veze sa slobodnim PV, Lebedev (1936) je izdvojio *kapilarno-lebdeću i kapilarno-podižuću vodu* (slika 3.3.3.3).

*Kapilarno-lebdeća PV* je potpuno odvojena od nivoa slobodnih PV. Formira se najčešće u gornjim delovima zone aeracije, za vreme infiltracije atmosferskih padavina u stenu, pri vlažnosti stene koja je viša od maksimalne molekularne vlažnosti. U ovom slučaju, kapilarno kretanje se odvija odozgo-naniže (slika 3.3.3.3). Kada infiltrirana atmosferska voda prestane da bude izvor kapilarno-lebdeće vode, u pripovršinskim kapilarnim porama počinje isparavanje, pore se pune vazduhom i počinje proces kapilarnog kretanja naviše.

*Kapilarno-podižuća voda* se formira neposredno iznad nivoa slobodnih PV.

**Slobodna ili gravitaciona (tekuća) PV** ispunjava (krupnije) superkapilarne pore i pukotine u stenama litosfere. Najzastupljenija je u krupnozrnim rastresitim stenama (šljunak i pesak), intenzivno ispucalem čvrstim stenama i stenama podložnim karstifikaciji (krečnjak, gips, halit). Glinovite i slabo ispucale stene sadrže male količine slobodne PV dok, npr., u čistim glinama potpuno izostaje.



**Slika 3.3.3.3. Šematski prikaz kapilarno-lebdeće i kapilarno-podižuće vode** [38,20]: 1-zemljišni sloj; 2,3 i 4- pesak sitnozrn, srednjezrn i krupnozrn sa šljunkom; 5 - kapilarno-lebdeća voda; 6 - kapilarno-podižuća voda; 7 - šema „pridržavanja“ lebdeće vode u kapilaru; 8 - slobodna (gravitaciona) voda

Kretanje slobodnih PV voda odvija se pod uticajem *sile teže* (u plićim delovima terena) i *hidrostatičkih pritisaka* (u dubljim delovima). Bitna karakteristika im je *mehaničko i rastvaračko dejstvo na stene* u kojima su akumulirane i kroz koje se kreću.

**Voda u čvrstom stanju (led)** je široko rasprostranjena u gornjem delu litosfere. Učestvuje u formiranju višegodišnjih, sezonskih i kratkotrajnih (dnevni i časovni) zona zamrzavanja. Mehanička svojstva stena koje sadrže led razlikuju se od svojstava istih stena u nezamrznutom stanju.

### 3.3.4. Poreklo podzemnih voda

Prema svom poreklu, PV mogu biti: **hidrometeorske, juvenilne, konatne i metamorfne.**

**-Hidrometeorske PV** nastaju infiltracijom voda iz atmosfere u zemljinu koru i, manjim delom, kondenzacijom vodene pare iz vazduha u zemljinoj kori. Najveći deo PV je hidrometeorskog porekla i one učestvuju u hidro-meteorološkom ciklusu, zajedno sa atmosferskim i površinskim vodama.

**-Juvenilne (ili magmatske) PV** su mlade, novonastale vode, poreklom iz mantla, a koje do svog pojavljivanja nisu bile deo hidro-meteorološkog ciklusa. Ukoliko se izdvajaju u dubljim delovima zemljine kore, pri separaciji magme, nazivaju se plutonske, dok se vulkanskim vodama nazivaju one koje se oslobađaju vulkanskim procesima na relativno malim dubinama (do 3-5 km). Do 50-ih godina 20. veka prevladavalo je mišljenje da je poreklo većine dubokih termalnih voda juvenilno, ali se, sa razvojem izotopskih metoda ispitivanja u hidrogeologiji, došlo do saznanja da su, uglavnom, u pitanju vode meteorskog porekla .

**-Konatne (fosilne) PV** su "zarobljene" u morskim ili jezerskim sedimentima. Nazivaju ih i „sedimentogenim“ vodama, s obzirom da su formirane istovremeno sa sedimentima, ili su infiltrirane u već istaložene sedimente morskih basena i podvrgnute metamorfozi, u procesu dijageneze sedimenta. Uglavnom su visoko mineralizovane (tzv.“rasoli“), sa mineralizacijom koja može da dostigne i nekoliko stotina g/l.

**-Metamorfne PV** nastaju („oslobađaju se“) pri metamorfozi stena u kojima su bile vezane – npr. istiskivanjem vode iz glinoviti stena (koje sadrže vezanu vodu).

\* \* \*

#### Kontrolna pitanja:

- 1/ Šta je (šta izučava) hidrogeologija ?
- 2/ U čemu se ogleda praktični značaj PV, kao resursa ?
- 3/ Koje komponente čine hidrosferu naše planete ?
- 4/ Kolika je prosečna mineralizacija atmosferskih padavina, a kolika morskih voda ?
- 5/ Najveće rezerve slatkih (malomineralizovanih) voda na Zemlji nalaze se u... ?
- 6/ Navesti vidove PV.
- 7/ Ukratko objasniti mehanizme formiranja fizički vezanih PV.
- 8/ Pod uticajem kojih faktora se odvija kretanje slobodnih PV ?
- 9/ Koje PV su starije – juvenilne ili konatne ?

II DEO

**KRUŽENJE I BILANS VODA NA ZEMLJI**



#### **4. KRUŽENJE VODE NA ZEMLJI**

Atmosferske, površinske i podzemne vode su u stalnom kretanju. Pod uticajem sunčeve energije i gravitacije, u prirodi se odvija neprekidni prosek kružnog (cikličnog) kretanja vode. *Isparavajući* sa površine okeana, mora, reka, jezera, kopna i biljnog rastinja, voda prelazi u atmosferu u vidu vodene pare. Voda može da pređe u atmosferu i direktno iz čvrstog stanja (led, sneg), što predstavlja proces *sublimacije*. Premeštanjem (strujanjem) vazdušnih masa, *vodena para* se prenosi nad površinom zemlje, pri određenim uslovima se *kondenzuje i obara na zemljinu površinu* u vidu kiše, snega ili drugih vidova padavina.

Deo padavina koje se izluče na površinu zemlje otiče u reke, mora i okeane, deo voda se infiltrira u podzemlje, a deo odmah (ponovo) isparava u atmosferu. Posle izvesnog vremena, deo infiltriranih voda pojavljuje se na površini u vidu izvora, ili „nevidljivo“ ističu u površinske tokove i vodne akumulacije. Izvorske vode otiču u reke, jezera, mora i okeane (slika 4.1.).

U ovom složenom ciklusu, vode prelaze iz jednog u drugo agregatno stanje.

Ovako definisan ciklus kretanja vode opisuje se elementarnom jednačinom vodnog bilansa:

$$P = E + Q \quad (4.1)$$

gde su:

*P*- atmosferske padavine; *E*- isparavanje i *Q*- oticaj (površinski i podzemni).

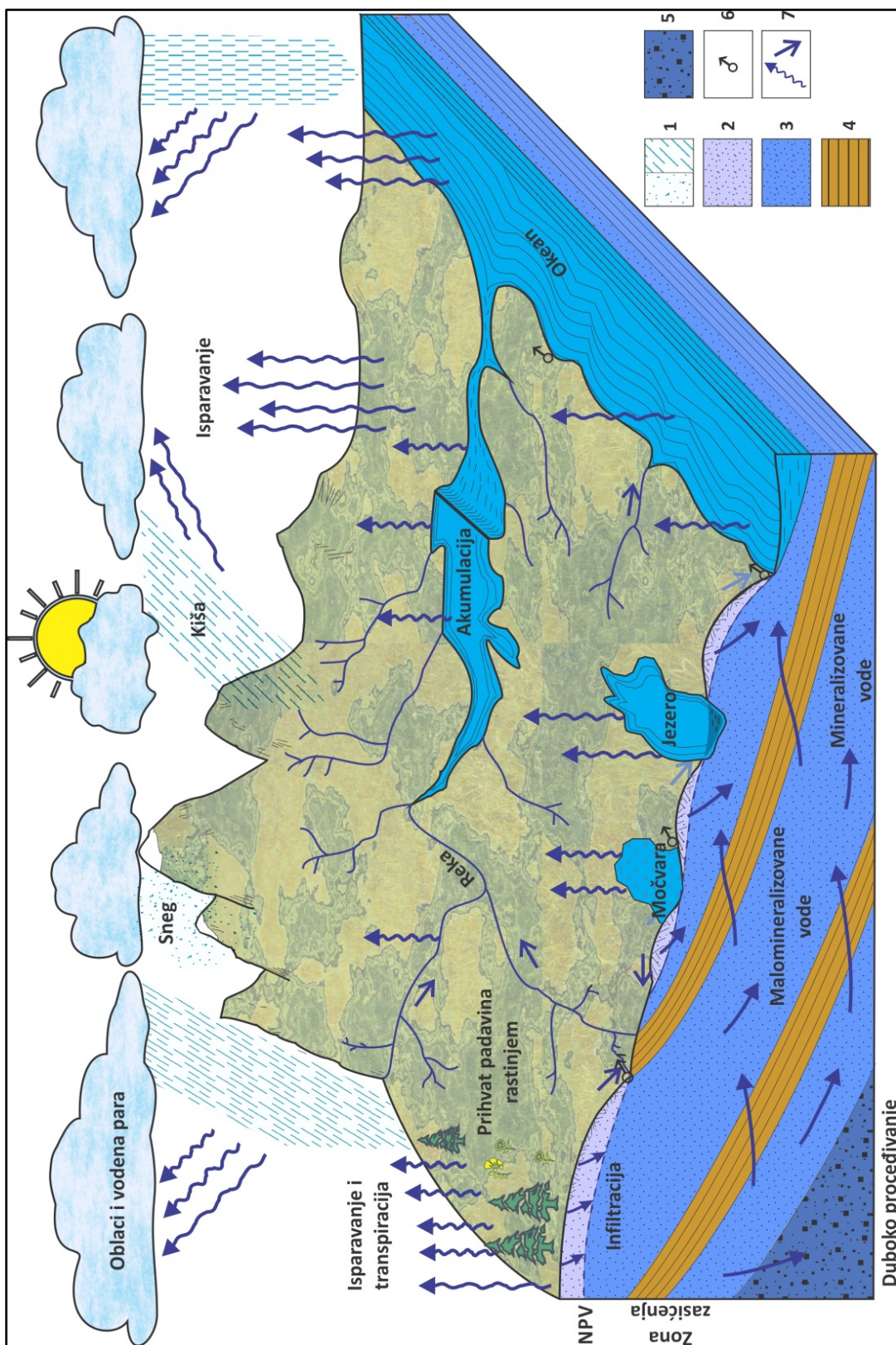
Proces kruženja vode u prirodi, koji se odvija po šemi: **padavine – isparavanje - oticaj**, obuhvata samo gornji (plići) deo zemljine kore i naziva se *hidrološki (hidrometeorološki) ciklus*. Nedostatak ove šeme je što ne uzima u obzir vode u zoni (veoma) usporene vodozamene, odnosno vode u dubokim delovima litosfere. Model opšteg kruženja vode, koji bi obuhvatio i vode u dubokim delovima litosfere, bio je predmet istraživanja nekoliko autora, a jedan od prihćenijih je prikazan na slici 4.2, koji, uporedo sa hidrološkim, obuhvata i *geološki ciklus*, uslovljen učestćem vode u geološkim procesima - sedimentaciji, litogenezi, metamorfizmu i magmatizmu.

U okviru hidro(meteoro)loškog ciklusa, kao procesa kruženja vode u zoni intenzivne vodozamene, mogu da se izdvoje: (1) **veliki**, (2) **mali** i (3) **unutrašnji ciklus**.

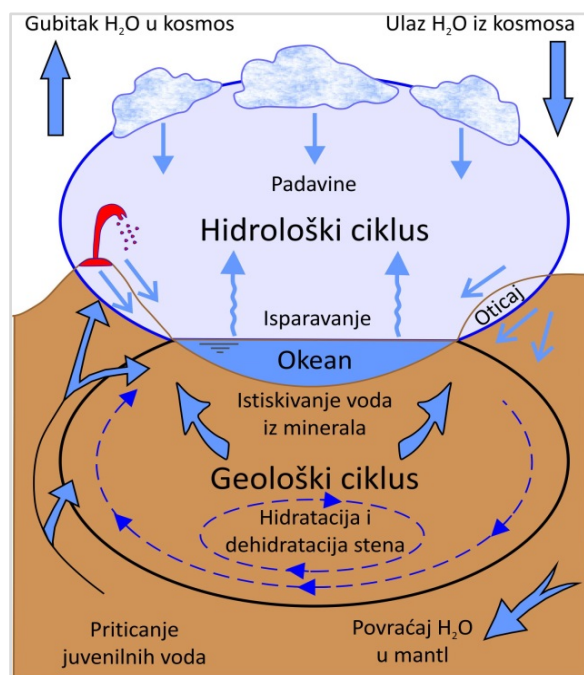
U *velikom ciklusu*, deo vodene pare, koji nastaje isparavanjem vode sa okeana i mora, prenosi se na(d) kopno, na koje se spušta u vidu padavina, a deo ovih padavina, površinski ili podzemno, ponovo otiče u mora i okeane.

*Mali ciklus* obuhvata deo voda koje ispare sa površine okeana i mora i koje se, u vidu padavina, izluče direktno u mora i okeane.

*Unutrašnji ciklus* obuhvata deo voda koje isparavaju direktno sa kopna (reke, jezera, tlo, rastinje) i ponovo se vraćaju na kopno, kao atmosferski talozi.



**Slika 4.1. Šema kruženja vode u prirodi** [11, 20]: 1– padavine; 2– zona aeracije; 3– zona zasićenja podzemnim vodama; 4– slabije propusne stene; 5– zona duboke cirkulacije; 6– izvor; 7– smer kretanja vode i vodene pare



Slika 4.2. Uzajamni odnos hidrološkog i geološkog ciklusa vode na Zemlji [66, 20]

## 5. VODNI BILANS

### 5.1. POJAM I OPŠTE ODREDBE

Količinsko izražavanje hidro(meteoro)loškog ciklusa na nivou rečnih ili morskih slivova, u granicama određenih regiona ili za Zemlju u celini, naziva se **vodnim bilansom**. Zapremina (količina) vode koja uđe u posmatrani prostor, odnosno, sliv ili deo sliva, načelno je jednaka zapremini koja iz njega izađe, umanjena ili uvećana za onoliko koliko je uvećana ili umanjena zapremina postojeće vodne mase u posmatranom prostoru.

U skladu sa prethodnim, najopštija jednačina vodnog bilansa ima sledeći oblik:

$$U - I = \pm \Delta W \quad (5.1.1)$$

gde su: **U**- zapremina vode koja ulazi u posmatrano područje; **I**- zapremina vode koja izlazi iz posmatranog područja;  $\Delta W$  - promena zapremine vode u posmatranom području tokom vremenskog perioda osmatranja/bilansiranja ( $\Delta t$ ).

Jednačina vodnog bilansa za konkretno područje (sliv ili deo sliva), u detaljnijem obliku, glasi:

$$\underbrace{P + K + Q'_{pod} + Q'_{pov}}_U + W_1 = \underbrace{E + Q''_{pod} + Q''_{pov}}_I + W_2 \quad (5.1.2)$$

gde su:

**U** - ulaz; **P** - padavine prispele na površinu zemlje; **K** - količina vode od kondenzacije vlage u zemljištu ili na površini terena; **Q<sub>pod</sub>** - podzemni doticaj vode; **Q<sub>pov</sub>** - površinski doticaj vode; **W<sub>1</sub>** - stanje rezervi vlage u zemljištu na početku vremenskog perioda  $\Delta t$ .

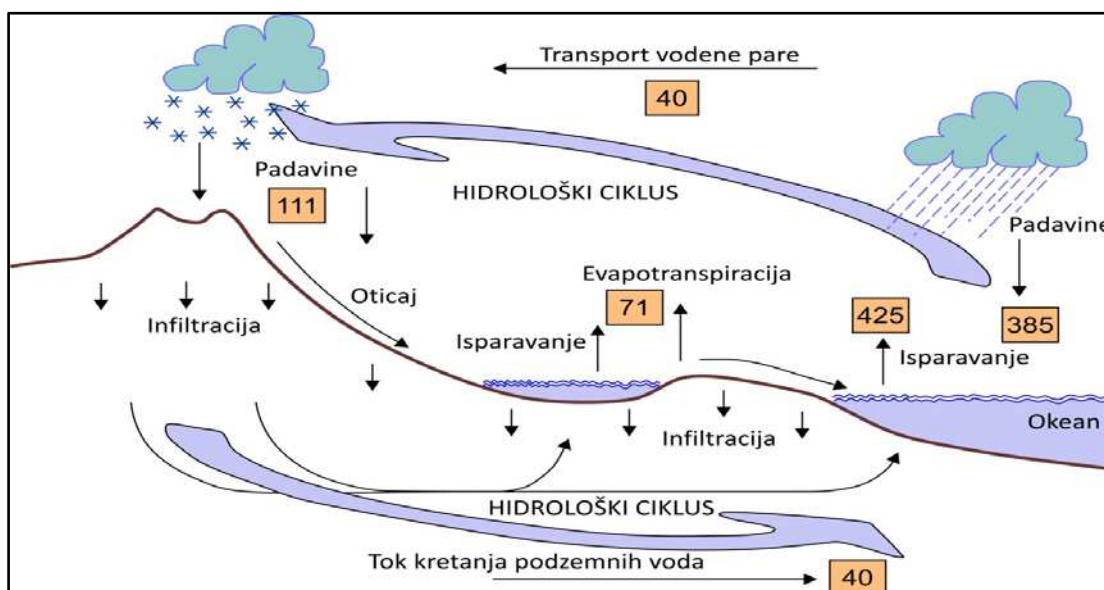
**I** - izlaz; **E** - evapotranspiracija (isparavanje sa površine vode, kopna, snega, leda, biljaka i transpiracija), **Q<sub>pod</sub>** - podzemni oticaj; **Q<sub>pov</sub>** - površinski oticaj; **W<sub>2</sub>** - stanje rezervi vlage u zemljištu na kraju vremenskog perioda  $\Delta t$ .

Ukoliko je ulaz veći od izlaza, uvećaće se rezerve vode u razmatranom prostoru (slivu). Obrnuto, povećanje rashoda, tj. izlaznih rezervi nad ulaznim, proizvešće manjak rezervi vode u datom prostoru za vremenski period  $\Delta t$ .

Vodni bilans planete Zemlje, u celini, prikazan je u tabeli 5.1.1. i na slici 5.1.1.

**Tabela 5.1.1. Godišnji vodni bilans Zemlje [2, 20]**

Područje	Kontinenti		Okeani		Zemlja	
Površina područja u $10^6 \text{ km}^2$	149		361		510	
Elementi bilansa	$10^3 \text{ km}^3$	mm	$10^3 \text{ km}^3$	mm	$10^3 \text{ km}^3$	mm
Padavine	111	746	385	1066	496	973
Evapotranspiracija	71	480	425	1176	496	973
Oticaj	40	266	40	110	-	-



**Slika 5.1.1. Šema globalnog hidro-meteorološkog ciklusa (prema podacima iz tabele 5.1.1) [10, 20]**

## 5.2. ELEMENTI VODNOG BILANSA

Osnovni elementi vodnog bilansa jednog sliva su: **1-padavine (P)**, **2-isparavanje ili evapotranspiracija (E)** i **3-oticaaj (Q)**.

### 5.2.1. Padavine

Padavine nastaju kao rezultat kondenzacije vodene pare u atmosferi. Pored vlažnosti, uslov za formiranje padavina je i postojanje atmosferskih poremećaja (nepogoda) sa konvergencijom u vazdušnoj masi i izdizanjem velikih masa toplog i vlažnog vazduha do većih visina, gde se rashlađuju do ispod tačke rose. Za stvaranje padavina treba da postoji i dovoljno kondenzacionih jezgara (higroskopske čestice, joni, prašina), da bi oko njih sitne kapi formirale veće, čija težina ne dozvoljava njihovo održavanje u „lebdećem“ stanju.

Glavni činioci formiranja i izlučivanja padavina su: geografska širina, blizina mora i okeana, reljef, pošumljenost, urbanizacija i dr.

*Padavine se mogu formirati (kondenzovati) i neposredno na zemljinoj površini ili na pojedinim predmetima i objektima. Ovde spadaju: rosa, slana i inje.*

*U padavine koje se obrazuju u atmosferi spadaju: kiša, sneg, susnežica, ledena kiša, krupa i grad.*

**Merenje količine padavina.** Pomoću odgovarajućih instrumenata (sudova) meri se visina sloja padavina (u **mm**), koji se, u određenom vremenskom periodu, formira na horizontalnoj površini. Ukoliko su padavine u čvrstom stanju, pre merenja se istope.

*Visina snežnog pokrivača* meri se svakog dana dok snežni pokrivač postoji. Meri se snegomernim lenjirom. Da bi se izmerena visina snega prevela u visinu vode, neophodno je prethodno odrediti gustinu snega. Sloj vode koji odgovara visini snežnog pokrivača, dobija se iz sledeće relacije:

$$h'_v = \rho_s \cdot h_s \quad (\text{mm}) \quad (5.2.1.1)$$

gde su:  $h'_v$  - visina sloja vode;  $\rho_s$  - gustina snega i  $h_s$  - visina snežnog pokrivača.

Atmosferske padavine mogu da se klasifikuju po veličini/sumi (dnevne, mesečne, godišnje), intenzitetu, promenljivosti u različitim periodima, vrsti (kiša, sneg, grad) i dr. Visina padavina izražava se u mm vodenog stuba ili  $l/m^2$ .

*Srednja (prosečna) visina padavina ( $P_{sr}$ )* ima važnu ulogu pri izradi vodnog bilansa, baziranog na višegodišnjim merenjima, i utvrđivanja međusobnog kvantitativnog odnosa padavina, oticaja isparavanja i drugih hidro-meteoroloških parametara. Padavine se menjaju iz godine u godinu, pa se tako menja i njihov prosek, zavisno od broja godina iz kojih se formira. Varijabilnost (promenljivost) ukupnih godišnjih padavina se razlikuje po geografskim oblastima: veća je u aridnim (suvim) predelima, kao i u unutrašnjosti kontinenata, a manja u vlažnim i primorskim predelima.

Najjednostavniji način određivanja srednje visine padavina svih kišomernih stanica u nekom (izučavanom) području zasniva se na *aritmetičkoj sredini*:

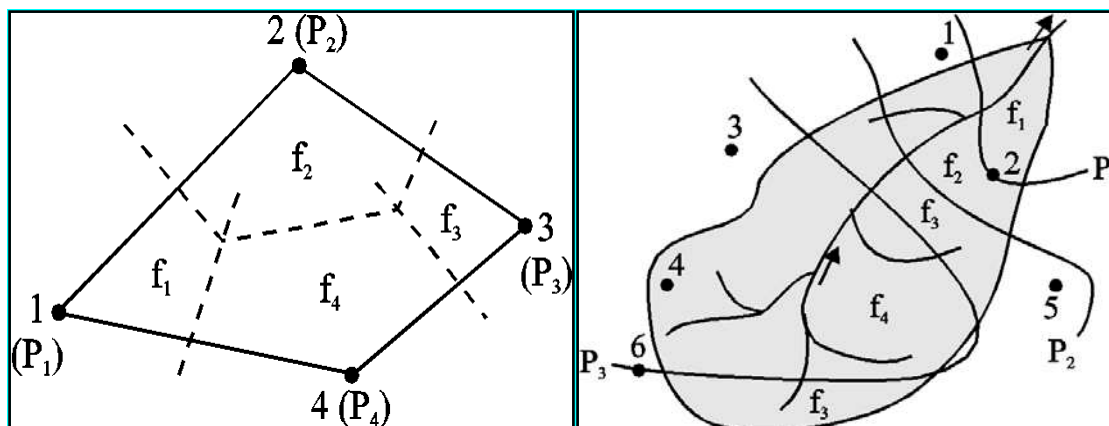
$$P_{sr} = \frac{\sum P_i}{n} \quad (5.2.1.2)$$

gde su:

$P_{sr}$  - veličina srednjih padavine;  $n$  - broj kišomernih stanica i  $P_i$  - veličina padavina na  $i$ -toj stanici.

Ova metoda daje dobre rezultate ukoliko su razlike u padavinama male. Može se upotrebiti za morfološki razuđene terene (slivove), u kojima su stanice relativno ravnomerno raspoređene, a zavisnost između padavina i nadmorskih visina je približno linearna.

*Thiessen-ova metoda* se zasniva na određivanju srednje vrednosti padavina na osnovu pripadajućih površina poligona svake stanice (slika 5.2.1.1).



**Slika 5.2.1.1.** *Levo: Kišomerne stanice sa pripadajućim Thiessenovim poligonima; Desno: Karta slivnog područja sa izohijetama [17]*

Površina poligona (sliva) koja pripada određenoj stanici omeđena je simetralama duži, koje spajaju stanice. U tom slučaju srednja vrednost padavina je:

$$P_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot P_i}{F} \quad (5.2.1.3)$$

gde su:  $P_{sr}$  - srednje padavine;  $i=1, \dots, n$  - redni broj kišomerne stanice;  $f_i$  - površina sliva koja pripada određenoj kišomernoj stanici;  $P_i$  - visina padavina na stanici  $i$ ;  $F$  - ukupna površina sliva.

Određivanje srednje vrednosti padavina *metodom izohijeta* zasniva se na izradi karte *izohijeta-izolinija koje povezuju sve tačke sa istom visinom padavina na ispitivanom području* (slika 5.2.1.1).

Po ovoj metodi, srednja visina padavina određuje se na sledeći način:

$$P_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \bar{P}_i}{F} \quad (5.2.1.4)$$

gde su:  $P_{sr}$  - srednje padavine (mm);  $f_i$  - površina između susednih izohijeta;  $\bar{P}_i$  - srednja visina padavina između dve izohijete;  $F$  - ukupna površina sliva;  $n$  - broj elementarnih površina (između susednih izohijeta).

**Intenzitet (jačina) padavina** predstavlja odnos između padavina (P) i vremena (T) u kome su se one desile:

$$i_{sr} = \frac{P}{T} \quad (5.2.1.5)$$

Intezitet padavina daje srednju jačinu padavina u toku čitavog vremena T. Jačina padavina može biti *srednjeminutna, srednječasovna i srednjednevna*.

**Zapremina pale kiše (V)** je, pri ravnomernom rasporedu padavina, jednaka proizvodu sloja padavina P (mm) i površine sliva (F):

$$V = P \cdot F \quad (5.2.1.6)$$

gde su: **V** - zapremina pale kiše (m<sup>3</sup>); **P** - sloj padavina (m); **F** -površina sliva (m<sup>2</sup>),

## 5.2.2. Isparavanje

Isparavanje (E) predstavlja prelaz vode iz tečnog ili čvrstog u gasovito stanje, odnosno, u vodenu paru. Isparavanje se odvija pri bilo kojoj temperaturi. To je univerzalna pojava, koja se dešava na svakom mestu na Zemlji, gde je atmosfera nezasićena vodenom parom. Sva vlaga od koje nastaju atmosferske padavine potiče od isparavanja sa slobodnih vodenih površina, površina pod snegom i ledom, vlažnog zemljišta i biljnog pokrivača.

Na veličinu isparavanja utiču sledeći faktori:

- temperatura vazduha
- temperatura površine sa koje voda isparava,
- relativna vlažnost iznad dotične površine,
- atmosferski pritisak,
- jačina vetra,
- insolacija,
- visina padavina i
- hemijske osobine vode.
- 

Ukoliko je isparavanje sa površine zemljišta ili biljnog pokrivača, ono zavisi i od:

- reljefa i položaja datog mesta u odnosu na strane sveta,
- dubine do nivoa podzemnih voda i
- vrste i stanja biljnog pokrivača.

Pod isparavanjem se podrazumeva količina isparene vode sa jedinice površine, u određenom vremenu. Najčešće se, kao i veličina padavina, izražava u **l/m<sup>2</sup>**, odnosno u **mm**. Razlikujemo dva pojma: *1-stvarno isparavanje i 2- potencijalno isparavanje*.

*Stvarno isparavanje* predstavlja visinu stvarno isparene vode (u mm), za određeno vreme. Za razliku od stvarnog, *potencijalno isparavanje* predstavlja visinu vode u mm koja bi, pod istim

uslovima mogla da ispari sa vodene površine ili veoma vlažnog zemljišta. Tako da je stvarno isparavanje sa vodene površine i površine veoma vlažnog zemljišta skoro isto kao i potencijalno. U aridnim oblastima, stvarno isparavanje je malo, a potencijalno veliko. *Stvarno isparavanje može da bude jednako potencijalnom ili manje od njega.*

Količina vode koja ispari u određenom vremenu, upravo je proporcionalna *veličini (površini) područja sa koje se vrši isparavanje*, pri istim ostalim uslovima. Isto tako, ukoliko je *temperatura* površine sa koje voda isparava veća i isparavanje je veće, pri istim ostalim uslovima. Što je *relativna vlažnost vazduha* manja, odnosno što je vazduh suvlji, isparavanje je veće.

*Vetar*, takođe, stimuliše isparavanje, odnošenjem vodene pare i smanjenjem vlažnosti vazduha iznad konkretnog područja. Visina *vazdušog pritiska* je obrnuto proporcionalna veličini isparavanja. Isparavanje je veće sa površina *obraslih vegetacijom* nego sa goleti. Isparavanje zavisi i od položaja (orjentisanosti) područja i veće je na južnim nego na severnim stranama (padinama).

Ukoliko je nivo PV viši (bliži površini terena), utoliko se voda lakše izdiže do površine zemlje sistemom kapilarnih pora i prslina i izloženija je eveporaciji i transpiraciji preko biljaka.

**Vidovi isparavanja.** Razlikujemo dva osnovna vida isparavanja [68]: 1/ **isparavanje sa slobodne vodene površine** i 2/ **evapotranspiracija** (sumarno isparavanje sa kopna).

U okviru **evapotranspiracije** (slika 5.2.2.1) razlikujemo: **evaporaciju**, odnosno, isparavanje sa golog (neobraslog) terena (kopna); **intercepciju** – isparavanje sa vegetacionog pokrivača; **transpiraciju** - kroz biljke; **sublimaciju** - direktno isparavanje sa snega i leda.

**Evaporacija** je isparavanje vode koja ispunjava pore između čestica tla, na njegovoj površini i podpovršinskom delu.

**Transpiracija** je isparavanje iz mikropora biljaka, prvenstveno iz lišća. Ovaj vid isparavanja je proizvod fiziološkog procesa biljaka. Vodu emitovanu transpiracijom, biljka kompenzuje izvlačenjem vode iz zemlje korenima.

**Intercepcija** je isparavanje vode koja se zadržale u krošnjama drveća i na listovima biljaka. Sve dok ova voda ne ispari, biljka ne vrši transpiraciju i ne troši rezerve vode iz tla.

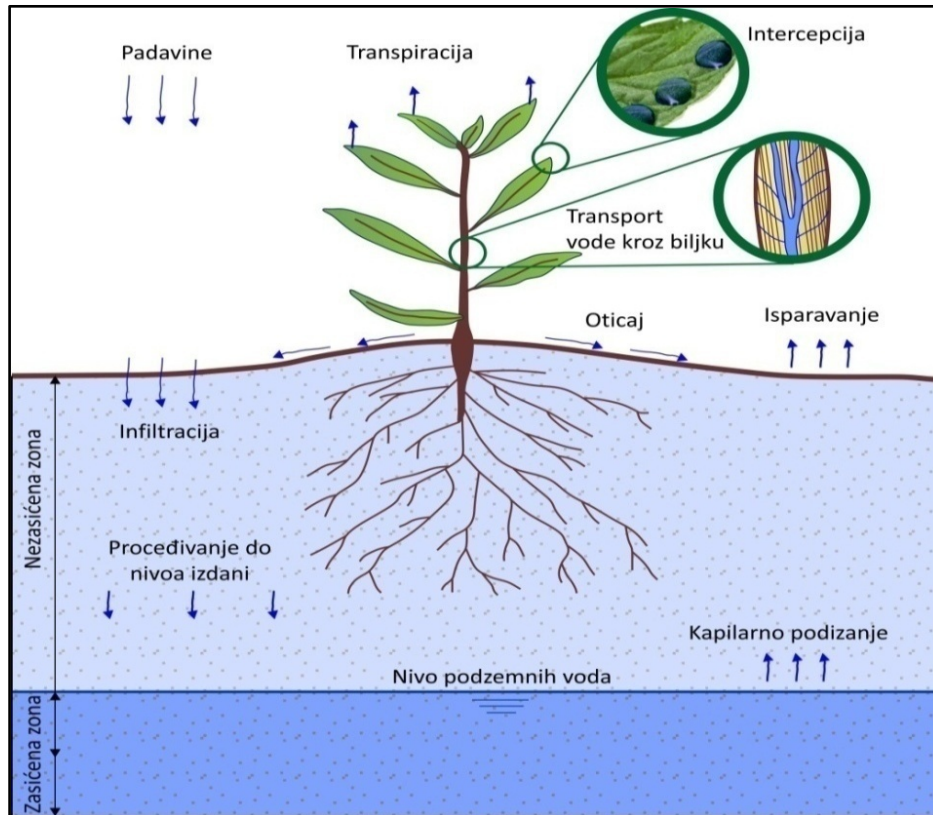
**Merenje isparavanja** (količine isparene vode) izvodi se pomoću pribora koji se nazivaju *ispariteljima ili evapometrima*, a čije se funkcionisanje bazira na simulaciji prirodnih uslova isparavanja. Njihova konstrukcija zavisi od toga da li se simulira isparavanje sa tla, manjih ili većih vodenih površina.

**Određivanje veličine isparavanja sa slobodne vodene površine** može da se izvodi pomoću nekoliko metoda: metode vodnog bilansa, metode toplotnog bilansa, merenjem instrumentima, obrascima zasnovanim na merenjima meteoroloških veličina i dr.

### 5.2.3. Oticaaj

Pod oticajem se podrazumeva opšta pojava da se "ostatak" padavina, nakon svih nepovratnih gubitaka, sakuplja u sabirne površinske ili podzemne tokove i otiče prema lokalnom ili regionalnom erozionom bazu, odnosno, reci, jezeru, moru ili okeanu [17].

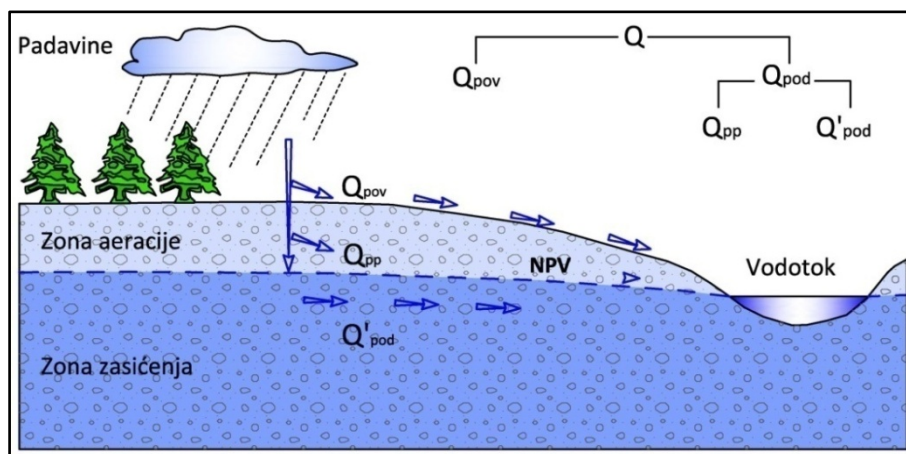




**Slika 5.2.2.1. Šema procesa evapotranspiracije [7, 20]**

Neposredni izvori oticaja iz jednog sliva su (slika 5.2.3.1):

- *padavine* koje padnu *direktno na vodotok* (reku),
- *površinsko slivanje* dela padavina u vodotok
- *podzemni i pripovršinski* doticaj podzemne vode u vodotok, koji se formira od dela padavina koji se infiltrira u tlo i koji, posle određenog vremena filtracije kroz poroznu sredinu, dospeva (drenira se) u vodotok (erozioni bazis).



**Slika 5.2.3.1. Šematski prikaz komponenti oticaja** [33,20]:  $Q$  – ukupni oticaj;  $Q_{pov}$  – površinski oticaj;  $Q_{pod}$  – (ukupan) podzemni oticaj;  $Q_{pp}$  – pripovršinski oticaj (kroz zonu aeracije);  $Q'_{pod}$  – podzemni oticaj (kroz zonu zasićenja PV)

U praksi se najčešće operiše sa dve komponente oticaja; površinskim ( $Q_{pov}$ ) i podzemnim ( $Q_{pod}$ ), koji čine ukupni oticaj sliva:

$$Q = Q_{pov} + Q_{pod} \quad (5.2.3.1)$$

gde su:  $Q$  ( $m^3/s$ ) - ukupni oticaj;  $Q_{pov}$  ( $m^3/s$ )- ukupni površinski oticaj zajedno sa oticajem nastalim od kiša direktno palih na vodotok;  $Q_{pod}$  ( $m^3/s$ )- podzemni oticaj zajedno sa pripovršinskim oticajem.

#### 5.2.4. Podzemne vode u vodnom bilansiranju

Iz prethodnog izlaganja zaključujemo da **podzemne vode (PV)**, odnosno, najveći deo njih, u plićim delovima litosfere, predstavljaju integralni deo jedinstvenog hidrometeorološkog ciklusa i da, iskazane preko **podzemnog oticaja ( $Q_{pod}$ )**, predstavljaju jednu od suštinskih komponenti elementarne jednačine vodnog bilansa određenog područja/sliva:

$$P = E + Q_{pov} + Q_{pod} \quad (5.2.4.1)$$

Kvantitativno definisanje komponente podzemnog oticaja jedan je od osnovnih zadataka i ciljeva hidrogeoloških istraživanja, pa će se gornja jednačina, sa hidrogeološkog aspekta, transformisati u:

$$Q_{pod} = P - (E + Q_{pov}) \quad (5.2.4.2.)$$

Iako naizgled jednostavno, rešavanje gornje jednačine predstavlja kompleksan zadatak. Od navedene četiri komponente vodnog bilansa, neposredno i precizno su merljive samo dve:

-**P (padavine)**, pomoću kišomera, odnosno, adekvatno postavljene mreže kišomernih stanica i

- **$Q_{pov}$  (površinski oticaj)**, merenjem vodostaja/proticaja na adekvatno postavljenim hidrometrijskim (rečnim) profilima,

iz čega možemo da zaključimo da izraz 5.2.4.2., predstavlja (jednu) jednačinu sa dve (relativno) nepoznate, koja je, stoga, teoretski nerešiva. **E** (evapotranspiracija ) i **Q<sub>pod</sub>** (podzemni oticaj) **predstavljaju nepoznate**, odnosno, parametre čije veličine nisu neposredno i precizno merljive:

-Kada je u pitanju **parametar E**, možemo da konstatujemo da pomenuti pribori za punktualno neposredno merenje veličine E nisu dovoljno pouzdani u pogledu njene precizne kvantifikacije na širem prostoru (slivu), zbog vremenske i prostorne promenljivosti čitavog niza faktora koji učestvuju u formiranju ove veličine: vlažnosti vazduha, kretanja vazdušnih masa (vetrova), temperatura vazduha, reljefa terena, litološkog sastava, odnosno, debljine i vodopropusnosti tla, zastupljenosti i vrsta vegetacije, vremenske cikličnosti vegetativnih perioda tj cikličnost promena intenziteta transpiracije biljaka i evaporacije sa biljaka...i dr. Posredno izvođenje veličine E iz empirijskih obrazaca takođe je nedovoljno precizno, s obzirom da istima ne mogu, u potpunosti, da budu obuhvaćeni uticaji svih navedenih faktora.

-I kada su u pitanju PV, odnosno, **parametar Q<sub>pod</sub>**, stoji konstatacija da postoji prostorna i vremenska promenljivost svih prethodno navedenih faktora, koji onemogućavaju preciznu kvantifikaciju i čije karakteristike određuju međusobni odnos i međuzavisnost E i Q<sub>pod</sub>: veća vlažnost vazduha će uticati na smanjenje evaporacije i, posledično, na povećanje infiltracije vode u podzemlje; prisustvo vetra će povećati evapotranspiraciju i, posledično, smanjiti infiltraciju; viša temperatura vazduha će povećati evapotranspiraciju i, posledično, smanjiti raspoloživu količinu vode za infiltraciju; porozno i vodopropusno tlo će omogućiti intenzivniju infiltraciju vode u podzemlje, što će umanjiti raspoloživu količinu vode za evaporaciju...itd. Pored toga **Q<sub>pod</sub>** nije uvek dostupan za merenje, s obzirom da ne postoji uvek prirodno isticanje preko izvora. I kada postoji, nije uvek jednostavno odrediti veličinu prostora (podzemnog sliva) koji se drenira preko jednog ili više izvora, niti da li se celokupna količina PV drenira (ističe) vidljivo, preko izvora, i koliki se deo drenira „nevidljivo“, u površinske tokove i vodene basene.

U ovakvoj situaciji, kada **Q<sub>pod</sub>** nije moguće odrediti jednostavnim merenjem i proračunom, dobro koncipirana (projektovana) **hidrogeološka istraživanja su ta koja treba da daju što precizniji odgovor na pitanje veličine podzemnog oticaja**, odnosno, pitanje količina/rezervi PV, koje se formiraju na određenom prostoru. Pri tome, treba imati u vidu i sledeće:

- Veličina **Q<sub>pod</sub>** je vremenski (sezonski) promenljiva i zavisi od hidrometeoroloških karakteristika konkretnog područja.
- Ova promenljivost, odnosno, uticaj meteorološkog i hidrološkog faktora, načelno, opada sa dubinom – podzemne vode na većim dubinama manje su podložne ovom uticaju i sezonska kolebanja rezervi PV su manja.
- Geološka građa istražnog prostora, odnosno, litološki sastav i tektonske (strukturno-geološke) karakteristike i njihova prostorna promenljivost u planu i profilu, u najvećoj meri određuju poroznost stena, koja neposredno utiče na to da li će se i koliko slobodnih PV „akumulirati“ u podzemlju i činiti podzemne tokove...itd.

Svi navedeni (i nenavedeni) aspekti formiranja PV biće detaljno razmotreni u narednim poglavljima.

**Kontrolna pitanja:**

- 1/ Ukratko opisati „mehanizam“ kruženja vode na Zemlji.**
- 2/ Kako glasi elementarna jednačina vodnog bilansa ?**
- 3/ Šta je vodni bilans Zemlje i koje su mu osnovne komponente ?**
- 4/ Gde je veće isparavanje – sa mora i okeana ili sa kopna ? Zašto ?**
- 5/ Šta je intenzitet padavina i u kojim jedinicama se izražava ?**
- 6/ Koji sve faktori utiču na veličinu isparavanja ?**
- 7/ Kako na veličinu isparavanja utiče vetar, a kako prisustvo/odsustvo vegetacionog pokrivača ?**
- 8/ Navesti i ukratko objasniti vidove evapotranspiracije.**
- 9/ Šta su neposredni izvori oticaja iz jednog sliva?**
- 10/ U kojim jedinicama se iskazuje veličina isparavanja, a u kojim veličina oticaja ?**
- 11/ Koje komponente jednačine vodnog bilansa jesu, a koje nisu neposredno i precizno merljive ?**

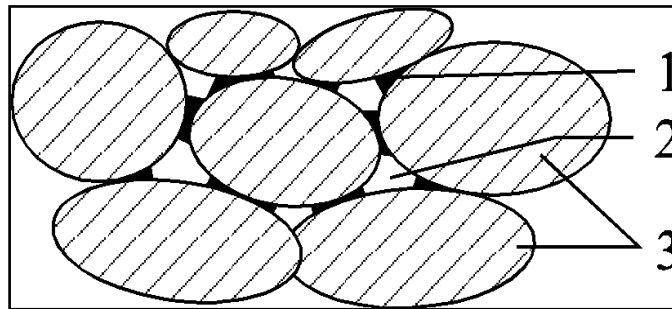
III DEO

**POROZNOST STENA**

## **6.POROZNOST STENA**

S obzirom na uslove nastanka i naknadnih (sekundarnih) dejstava određenih procesa (fizičko-hemijsko raspadanje, tektonski pokreti i dr.), stene, po pravilu, ne predstavljaju monolite, već u sebi sadrže međuprostore (pore, pukotine, kaverne), različitog oblika i veličine. Sa hidrogeološkog aspekta, **poroznost stena** je njihova najvažnija fizička karakteristika, s obzirom da su, akumuliranje i kretanje slobodnih PV, uslovljeni upravo postojanjem međuprostora, odnosno, pora, njihovom veličinom i međusobnom povezanošću. Sa hidrogeološkog aspekta, **stena je sistem** koji se sastoji od (slika 6.1):

- **skeleta stene**, koju čini čvrsta mineralna materija
- **međuprostora (pora)**, unutar skeleta, koje mogu biti različitih veličina i geneze
- **podzemne vode**, koja delimično ili potpuno ispunjava međuprostore i ostvaruje interakciju sa česticama skeleta, kao i sa vodenom parom i gasovima (u delovima pora koji nisu zauzeti vodom).



**Slika 6.1. Šema rasporeda vode i vazduha u porama stene sa međuzrnskom poroznošću [17]:**  
1 –podzemna voda; 2 - vodena para i gasovi; 3 - čvrste mineralne čestice

Tip i karakter poroznosti stena uslovljen je prevashodno njihovim mehaničkim svojstvima, na osnovu kojih se, sve stene, mogu podeliti u tri grupe: **1/čvrsto vezane, 2/slabo vezane i 3/nevezane** (Dragišić, 1997.).

U okviru **čvrsto vezanih** stena, izdvajaju se kamenite i polukamenite. U kamenite spadaju: magmatske, metamorfne stene visokog stepena kristaliniteta, krečnjak, dolomit, čvrsto vezani pešćar i konglomerat. Polukamenite stene su: glinac, laporac, metamorfne stene niskog stepena kristaliniteta.

**Slabo vezane (meke)** stene obuhvataju lapor, glinu, les, ilovaču, dok se u **nevezane ili rastresite** stene svrstavaju: drobina, šljunak, pesak, prašina.

### **6.1. TIPOVI POROZNOSTI STENA**

**Svi međuprostori u steni**, koji nisu zauzeti čvrstom mineralnom supstancom, bez obzira na način postanka, oblik, veličinu i međusobnu povezanost, predstavlja **ukupnu poroznost stene**. Ona se **kvantitativno izražava kao odnos zapremine svih pora unutar posmatrane stene i ukupne zapremine te stene, u delovima jedinice ili procentima**.

Ukupna poroznost značajno varira kod različitih vrsta stena (tabela 6.1.1). Te varijacije su posledica njihovih različitih mehaničkih svojstava, koja, pak, zavise od načina i uslova nastanka stene i naknadnog dejstva određenih procesa na već formiranu stenu. U tabeli 6.1.1. uočljivo je da su veličine ukupne poroznosti kod slabo-vezanih i nevezanih stena veće nego kod čvrsto vezanih.

**Tabela 6.1.1. Tipične veličine ukupne poroznosti pojedinih vrsta stena [52, 24, 90, 51, 21, 20 - adaptirano]**

Slabo vezane i nevezane stene	Poroznost (%)	Čvrsto vezane stene	Poroznost (%)
Glina	40–70	Peščar	5–35
Prašina	35–50	Krečnjak	<1–10
Pesak, prašina i šljunak (mešano)	30–50	Dolomit	0,1–15
Glina i prašina (mešano)	35–60	Karstifikovani krečnjak	5–50
Pesak	25–50	Kreda	15–45
Srednjozrni i krupnozrni pesak	35–40	Glinoviti škriljac	< 1–10
Dobro granulisani pesak (uniformni)	30–35	Ispucala magmatska stena	< 1–10
Šljunak	20–40	Ispucala kristalasta stena	< 1–10
Pesak i šljunak (mešano)	15–35	Bazalt	1–25
Treset	60-80	Šupljikavi bazalt	10–50

Poroznost je podložna promenama u vremenu i prostoru, pod dejstvom različitih fizičko-geografskih i geoloških faktora. Tako, npr., procesi litifikacije (očvršćavanja), metamorfizma i cementacije stena, dovode do smanjenja njihove poroznosti. Kada je u pitanju prostorna promenljivost, *poroznost, u načelu, opada sa dubinom zaleganja stena*, što se objašnjava time da, na većim dubinama, vladaju veći geostatički pritisci (veća je težina stena u povlati), što dovodi do „sabijanja“ pora.

Pored ukupne poroznosti, sa hidrogeološkog aspekta je od izuzetnog značaja i **efektivna poroznost** stena, koja obuhvata one međuprostore u steni ispunjene samo slobodnom (gravitacionom) vodom, ne uzimajući u obzir međuprostore zauzete fizički vezanim i kapilarnim vodama. *Uvek je manja od ukupne poroznosti* (tabela 6.1.2).

**Tabela 6.1.2. Prosečne veličine ukupne i efektivne poroznosti pojedinih mekih i rastresitih stena [17, 84]**

Stena	Ukupna poroznost	Efektivna poroznost
Šljunak srednjozrni	32	24
Pesak srednjozrni	39	28
Glina	42	3

U zavisnosti od međusobne povezanosti pora, postoje *aktivna* i *pasivna poroznost*. *Pasivnu* poroznost čine pore u steni koje su međusobno izolovane, što onemogućava akumulisanje i kretanje PV. *Aktivnu* poroznost čine sve pore u steni povezane međusobno i sa atmosferom, koje omogućavaju akumuliranje i kretanje slobodnih PV.

Prema načinu i vremenu nastanka, poroznost stena može biti *primarna* i *sekundarna* (tabela 6.1.3).

*Primarna* ili *singenetska poroznost* nastaje tokom nastanka same stene. Kod sedimentnih stena nastaje procesima mehaničke i (bio)hemijske sedimentacije. Kod magmatskih i metamorfih stena, nastaje kristalizacijom mineralnih sastojaka, a kod nekih (očvrsljih) lava, pod dejstvom gasova.

*Sekundarnu poroznost* čine sve pore koje su nastale nakon formiranja (litifikacije) stena, pod dejstvom određenih endogenih i egzogenih procesa: mehaničko naprezanje (pukotine i prsline),

(bio)hemijsko rastvaranje (kaverne, kanali i sl.), fizičko-hemijska degradacija stena pod dejstvom meteorološkog faktora (velika kolebanja temperature vazduha i tla, mržnjenje vode i dr.).

**Tabela 6.1.3. Neki tipični oblici primarne i sekundarne poroznosti [90-adaptirano]**

Primarna poroznost	Sekundarna poroznost
Mehuraste šupljine u vulkanskim stenama	Rasedi
Međuzrnske (intergranularne) pore : pesak, šljunak, glina i dr.	Pukotine i (manje) prsline
Međuslojne pukotine i diskordantne površi (granice)	Kaverne i kanali nastali rastvaranjem (vodom) stenske mase
Granice između tokova lave; pećine i izduženi cevasti međuprostori u lavi	Nepravilni, najčešće izduženi međuprostori u steni ili sedimentu nastali radom životinja i biljaka ili odumiranjem biljaka
Pore između kristala u steni	

Za pojedine vrste čvrstih stena svojstvena je *dvojna poroznost*, pa se tako, npr., kod peščara i konglomerata, mogu javiti i pukotinska (sekundarna) i međuzrnska (primarna).

*Veličina*, odnosno, *prečnik (okruglastih) pora* i *širina pukotina* u steni, u sklopu njene aktivne poroznosti, neposredno utiču na mogućnosti i uslove kretanja PV. Klasifikacija pora (i pukotina), na osnovu veličine, prikazana je u tabeli 6.1.4.

**Tabela 6.1.4. Klasifikacija pora u odnosu na veličinu [78, 53]**

Vid poroznosti	Vrsta pora	Razmera pora	
		Prečnik okruglastih pora (mm)	Širina pukotina (mm)
Nekapilarna	Kaverne, pukotine, izuzetno krupnozrne rastresite stene	>2,0	>2,0
	Superkapilari	2,0–0,5	2,0–0,25
Kapilarna	Kapilari	0,5–0,002	0,25–0,0001
	Subkapilari	<0,002	<0,0001

Pore malih dimenzija u kojima se voda zadržava protivno dejstvu sile teže mogu biti *kapilarne* i *subkapilarne*. U izuzetno sitnim, *subkapilarnim porama*, uticaj sile adhezije onemogućava kapilarno kretanje, pa one sadrže samo fizički vezane vode, koje ispoljavaju openo-pelikularno "kretanje". *Kapilarne pore* su dovoljno sitne da, uz pomoć površinskog pritiska, zadržavaju (kapilarnu) vodu na određenoj visini iznad nivoa slobodnih PV, ali i dovoljno krupne da uticaj sile adhezije ne bude dominantan u celoj zapremini pore. Zapremina svih (sub)kapilarnih međuprostora u poroznoj sredini, naziva se (*sub*)*kapilarna poroznost*.

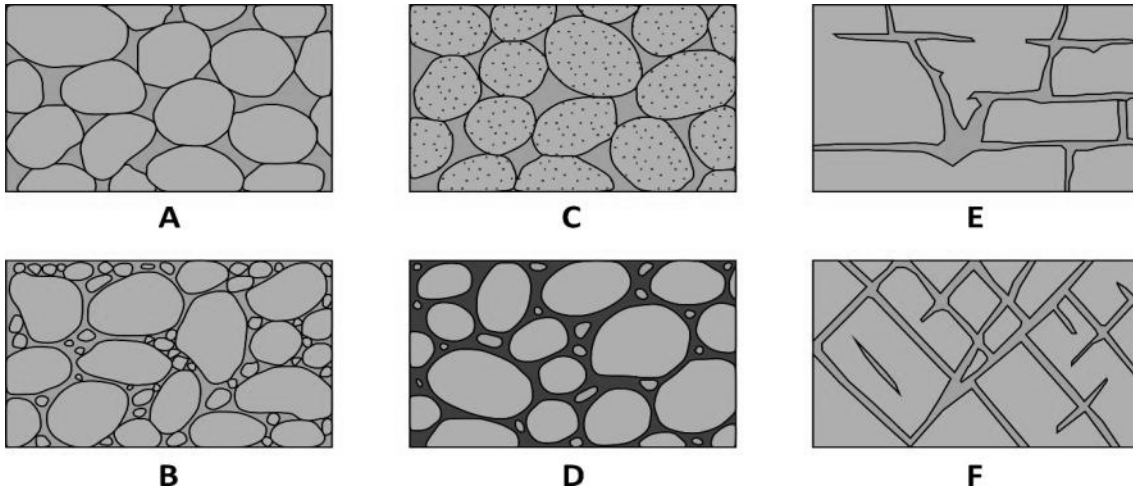
U *nekapilarnim (krupnim) porama* nema kapilarnog kretanja, već (slobodna) PV podleže dejstvu gravitacije. Ovakav tip poroznosti se naziva *superkapilarnom* i zastupljen je u krupnozrnim peskovima i šljunkovima, i intenzivno ispucalim i(li) karstifikovanim čvrstim stenama.

*Sa aspekta hidrogeološke karakterizacije stena, odnosno, definisanja tipova izdani koji su formirani u različitim vrstama stena, osnovni kriterijum je strukturni tip poroznosti.*



## 6.2. GLAVNI STRUKTURNI TIPOVI POROZNOSTI

Strukturu poroznosti stene čini preovlađujući oblik pora u njenoj masi i način njihove međusobne povezanosti. Glavni, odnosno, najrasprostranjeniji strukturni tipovi poroznosti su: **međuzrnska**, **pukotinska** i **kavernozna poroznost** (slika 6.2.1, tabela 6.2.1). *Tipizacija stena po osnovu strukture poroznosti ne zavisi od veličine pora*, tako da određeni strukturni tip poroznosti mogu činiti i (samo) kapilarne i (samo) nekapilarne pore. Pored toga, pojedine vrste stena odlikuju se složenom ili dvojnomo strukturom poroznosti (tabela 6.2.1).



**Slika 6.2.1 Strukturni tipovi poroznosti [52]:** A–dobro sortiran šljunak; B–loše sortiran šljunak, mala poroznost; C–sediment sa dobro sortiranim poroznim valutcima, vrlo velika poroznost; D–sediment sa dobro sortiranim valutcima, ali je poroznost smanjena usled cementacije; E–stena sa kavernoznom poroznošću; F–stena sa pukotinskom poroznošću; A, B, C, D – primarna poroznost; E, F – sekundarna poroznost

**Tabela 6.2.1. Strukturni tipovi poroznosti kod zastupljenijih vrsta stena [20]**

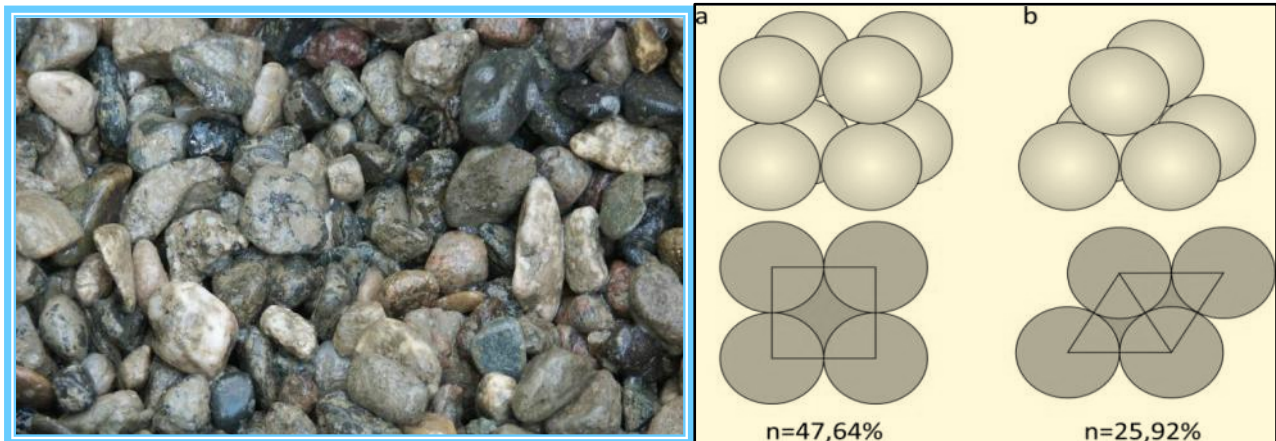
<b>Međuzrnska</b>	<b>Dvojna međuzrnsko-pukotinska</b>	<b>Pukotinska</b>	<b>Dvojna međuzrnsko-kavernozna</b>	<b>Kavernozna</b>
Šljunak	Breča	Graniti	Zoogeni krečnjaci	Krečnjaci
Pesak	Konglomerat	Gabro	Oolitični krečnjaci	Dolomiti
Zaglinjeni pesak	Peščar	Diorit		Dolomitični krečnjaci
Peskovita glina	Vulkanski tuf	Andezit		Mermeri
Raspadnuti granit	Vulkanska breča	Bazalt		Gips-anhidritske stene
Raspadnuti gnajs	Vulkanski konglomerat	Riolit		Sone stene (hloridne stene)
Raspadnuti bazalt	Vulkanski aglomerat	Gnajsevi i drugi kristalasti škriljci		
	Plovučac	Kvarciti		

## 6.3. MEĐUZRNSKA POROZNOST

### 6.3.1. Osnovni pojmovi

*Međuzrnska* ili *intergranularna poroznost* karakteristična je za mlađe (kvartarne ili neogene) rastresite i slabovezane stene: šljunak (slika 6.3.1.1-levo), pesak, drobinu, glinu, u okviru kojih pore čine prostor između zrna (granula). Javlja se i u zonama raspadanja čvrstih stena.

Poroznost rastresitih zrnastih stena u velikoj meri zavisi od oblika, uzajamnog rasporeda (slika 6.3.1.1) i sortiranosti (slika 6.2.1-A,B) zrna, od veličine zrna i stepena međuzrnske cementacije (slika 6.2.1-D). Na slici 6.3.1.1-desno, uočljivo je da uzajamni raspored ujednačeno sortiranih zrna značajno utiče na veličinu poroznosti, koja može da varira u opsegu 25.92 – 47.64 %.



**Slika 6.3.1.1.** Levo: *Međuzrnska poroznost kod šljunka*; Desno: *Šema kubnog (a) i romboedarskog (b) prostornog rasporeda zrna* [11]

Kada je u pitanju veličina dobro sortiranih zrna, u načelu, sitnozrne stene (npr. glina) odlikuju se velikom ukupnom poroznošću, ali malom efektivnom poroznošću. Kod krupnozrnih stena (pesak i šljunak) ukupna poroznost se smanjuje, a efektivna povećava (tabela 6.1.2).

### 6.3.2. Granulometrijski sastav

Pod granulometrijskim ili mehaničkim sastavom rastresitih i slabovezanih stena podrazumeva se sadržaj čestica (zrna) različite veličine. Poroznost stena, u najvećoj meri, zavisi od granulometrijskog sastava, koji se određuje *granulometrijskom analizom*. Ovom analizom stena se deli na frakcije, koje predstavljaju grupe zrna određenog opsega veličina (prečnika), izraženih u milimetrima (mm).

Zavisno veličine zrna, koriste se *dve metode ispitivanja granulometrijskog sastava*: 1/*metoda prosejavanja* i 2/*metoda sedimentacije (hidrometrisanja)*.

**Metoda prosejavanja** se primenjuje kod krupnozrnijih stena, prečnika zrna većih od 0.06 mm ili 0.1mm, zavisno od standarda laboratorija. Za prosejavanje se upotrebljavaju sita sa otvorima standardizovanih veličina, koja su poređana tako da, najviša mesta zauzimaju sita sa većim, a niža, ona sa manjim otvorima (slika 6.3.2.1).

Ispitivani uzorak, određene težine, stavlja se na (najviše) sito sa najvećim otvorima, a ispod svih sita mora biti posuda za prihvatanje najsitnijih čestica (koje su prošle kroz sva sita). Garnitura sita se prosejava na aparatu za vibriranje, a materijal koji se zadrži na svakom pojedinom situ, kao i onaj koji

prođe kroz najfinije sito, osuši se i izmeri da bi se odredio težinski procenat svake frakcije. Zbir težina svih frakcija koje ostanu na pojedinim sitima treba da je jednak početnoj težini analiziranog uzorka.



**Slika 6.3.1.1. Sita za granulometrijske analize [93]**

Proračun frakcija na osnovu prosejavanja uzorka preko „USA standard“ sita dat je u tabeli 6.3.2.1. Nedostatak metode prosejavanja je taj što se ne dobijaju tačni prečnici zrna, već samo granični (oddo) prečnici zrna u okviru frakcija koje prolaze, odnosno, zadržavaju se na određenom situ.

Granulometrijska analiza frakcija sitnijih od 0.1mm (ili 0.06 mm) sprovodi se metodom **hidrometrisanja**. Zasniva se na određivanju brzine padanja/tonjenja čestica kroz mirnu vodu, pri čemu je brzina tonjenja proporcionalna veličini prečnika zrna.

**Tabela 6.3.2.1. Proračun frakcija na osnovu prosejavanja preko „USA standard sita“ [81]**

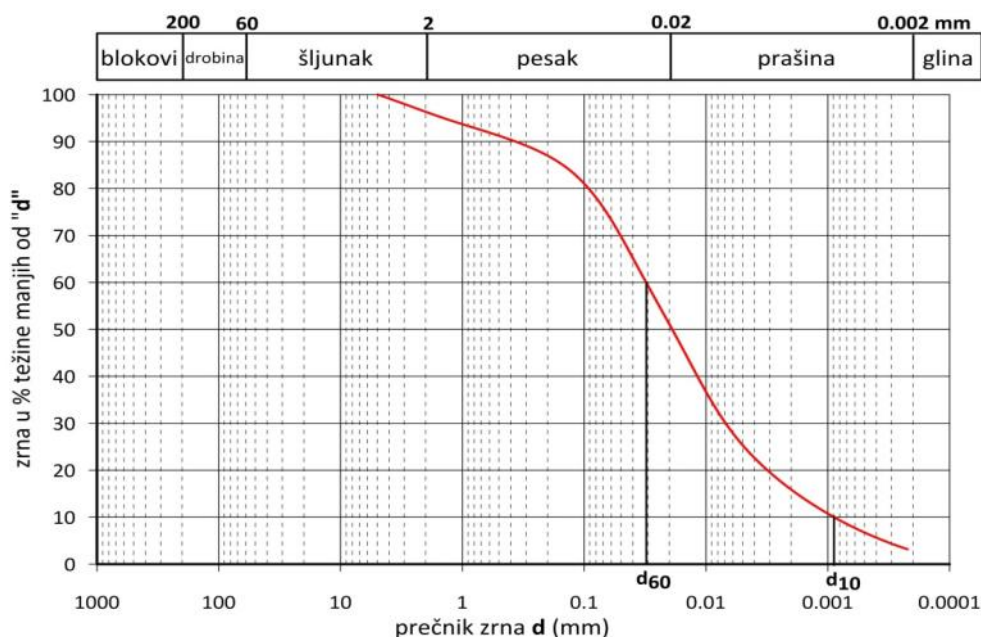
Broj USA stand. sita	Otvor okca mm	Ukupna masa $m_s = 2 \text{ kg}$	Zadržano na situ		Ukupno zadržano		Ukupno prošlo	
			kg	%	kg	%	kg	%
		$m_s$	$m_{si}$	–	$m_{si}$	–	$m_s - m_{si}$	%
4	4,76		0,0000	0,00	0,0000	0,00	2,0000	100
10	2,00		0,0284	1,42	0,0284	1,42	1,9716	98,50
20	0,84		0,0566	2,83	0,0850	4,25	1,9150	95,78
40	0,42		0,4604	33,02	0,5451	27,27	1,4846	78,18
60	0,25		0,4400	21,00	0,9854	48,21	1,0146	50,73
100	0,147		0,2364	11,82	1,1218	63,09	0,7782	39,01
140	0,105		0,1126	5,63	1,3344	66,78	1,6656	13,28
200	0,074		0,6316	31,58	1,9640	98,30	0,0340	1,70
dno	–		0,0340	0,017	2,0000	100,00		

Pored tabelarnog prikaza, rezultati granulometrijskih analiza prikazuju se i pomoću različitih formi grafika, pri čemu je jedna od najšire korišćenih **integralna kriva granulometrijskog sastava**, u semi-logaritamskoj razmeri (slika 6.3.2.2). U načelu, što je nagib ove granulometrijske krive veći, odnosno, što je ona "razvučenija", to je stena raznorodnijeg sastava, što direktno utiče na veličinu poroznosti (slika 6.2.1.- A i B). Jednorodnost granulometrijskog sastava uzorka zavisi od karakterističnih veličina prečnika stene: *efektivnog* ( $d_{10}$ ) i *dominantnog* ( $d_{60}$ ), čije je određivanje prikazano na slici 6.3.2.2.

Kvantitativno, (ne)jednorodnost se iskazuje preko *koeficijenta jednorodnosti/uniformnosti* ( $c_u$ ):

$$c_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

(6.3.1.1)



**Slika 6.3.2.2. Integralna kriva granulometrijskog sastava [20]**

Što je  $c_u$  veći, to je stena raznorodnijeg (nejednorodnijeg) sastava. Na osnovu veličine ovog koeficijenta, Hazen (1892) je podelio rastresite i slabovezane stene na tri grupe (Vuković i Soro 1991): 1/ **jednorodnog** sastava, ako je  $c_u < 5$ ; 2/ **umereno jednorodnog** sastava, ako je  $5 < c_u < 15$  i 3/ **nejednorodnog** sastava, ako je  $c_u > 15$ .

Jedna od, u domaćoj praksi, korišćenih klasifikacija stena, na osnovu granulometrijskog sastava, odnosno, (dominantne) veličine zrna, prikazana je u tabeli 6.3.2.2.

**Tabela 6.3.2.2. Granulometrijska klasifikacija stena [20-adaptirano]**

<b>Naziv</b>	<b>Veličina čestice (mm)</b>
<b>Oblutci</b>	<b>&gt;63</b>
<b>Šljunak, generalno</b>	<b>2,0–63,0</b>
-krupnozrni	20–63
-srednjozrni	6,3–20
-sitnozrni	2,0–6,3
<b>Pesak, generalno</b>	<b>0,063–2,0</b>
-krupnozrni peskovi	0,63–2,0
-srednjozrni peskovi	0,2–0,63
-sitnozrni peskovi	0,063–0,2
<b>Prašina, generalno</b>	<b>0,002–0,063</b>
-krupnozrna prašina	0,020–0,063
-srednjozrna prašina	0,0063–0,020
-sitnozrna prašina	0,002–0,0063
<b>Glina, generalno</b>	<b>&lt; 0,002</b>

## 6.4. PUKOTINSKA POROZNOST

### 6.4.1. Osnovni pojmovi

*Pukotinska poroznost* svojstvena je za magmatske, metamorfne i čvrste sedimentne stene (slika 6.4.1.1) i (pred)uslov je za *formiranje i kretanje PV* u njima. Čine je pukotine različitih dimenzija, koje prožimaju i presecaju stensku masu na različite načine, a čiji je prostorni raspored uglavnom neravnomeran. U načelu, pukotine su češće i šire bliže površini terena, a sa povećanjem dubine su ređe i uže. Pukotinska poroznost nastaje onda kada je stenska masa izložena naponima koji prelaze granicu njene čvrstoće. Tada dolazi do loma i do gubljenja kohezije duž površina preloma, pri čemu nastaju diskontinuiteti, odnosno, pukotine. Stvaranje pukotina u steni može da bude generisano sledećim procesima: dejstvom tektonskih napona, skupljanjem mineralne supstance zbog hlađenja magme (kontrakcija), gubljenjem vode (dehidratacija), dejstvom mraza, gravitacije i dr. Stepem ispucalosti stena zavisi od njihovog litološkog sastava i fizičko-mehaničkih svojstava.



**Slika 6.4.1.1. Levo: Ispucali krti graniti u regionu Ladak u Indiji [94]; Desno: Intenzivno ispucale karbonatne stene[95]**

U načelu, pukotine mogu da budu otvorene (zjapeće) i zapunjene. *Zapunjavanje pukotina* je prirodan proces u kome se, u pukotinama, odlaže mineralna supstanca koja može da nastane:

*drobljenjem stene pod dejstvom tektonskih napona, fizičko-hemijskim raspadom stena i odlaganjem mineralnih taloga koji potiču iz PV (posebno mineralnih i termalnih) koje cirkulišu kroz pukotine.*

Sa aspekta strukturne geologije, svaki mehanički diskontinuitet u stenskoj masi, bez obzira na to da li je ili nije bilo kretanja duž istog, naziva se *razlom* ili *ruptura*. *Razlomi* se dele na: 1/**rasede**, duž kojih je bilo kretanja 2/**pukotine** (u užem smislu), duž kojih nije došlo do (većih) kretanja 3/**prslina**, nepotpuno razvijene (sitne) pukotine [12].

Skup paralelnih pukotina na relativno jednakim rastojanjima čini *set pukotina*, a više setova koji se seku pod relativno konstantnim uglom čini *sistem pukotina*. Skup svih pukotina nekog područja, koje mogu pripadati nekolicini setova ili sistema, čini *pukotinsku mrežu* [85].

#### 6.4.2. Klasifikacije pukotina

**G e n e t s k a** (prema načinu nastanka) **klasifikacija** pukotina obuhvata [77]: 1/*Tektonske*; 2/*Petrogene*; 3/*Pukotine fizičko-hemijskog raspadanja*; 4/*Gravitacione*; 5/*Tehnogene*.

**Tektonske** pukotine nastaju kao rezultat pomeranja zemljine kore i predstavljaju najzastupljeniji vid ispucalosti stena. Obuhvataju *rasede*, *pukotine* i *prslina*.

**Petrogene** (*kontrakcione*, *litogenetske* i *međuslojne*) pukotine nastaju pri procesu formiranja same stene. Uglavnom nemaju veći značaj u pogledu akumuliranja i kretanja PV.

*Kontrakcione* pukotine ili *pukotine lučenja* nastaju pri hlađenju i skupljanju magme. Najčešći oblici lučenja su pločasto, prizmatično i stubasto.

*Litogenetske* pukotine kod sedimentnih stena nastaju u procesu litifikacije i umanjenja obima stenske mase. Najčešće su upravne na ravni slojevitosti i mogu da presecaju jedan do (ređe) nekoliko slojeva. Mogu da nastanu i kao posledica uvećanja obima stenske mase, pri hidrataciji anhidrita i njegovog preobražaja u gips, kada, zbog povećanja zapremine stene (do 2%), rastu unutrašnji pritisci, koji dovode do ispucalosti.

*I međuslojne* pukotine nastaju u procesu litifikacije (očvršćavanja) stenske mase.

**Pukotine fizičkog i hemijskog raspadanja** nastaju kao posledica dejstva egzogenih faktora na stenu, najčešće temperature i (smrznute) vode. Proces je najintenzivniji u plićim (uticaju hidrometeoroloških faktora podložnim) delovima terena i kod krtih stena, koje su već ispucale po osnovu tektonogenetskog ili petrogenetskog faktora. Pukotine raspadanja odlikuju se nepravilnim rasporedom i često su zapunjene produktima fizičkog i hemijskog raspadanja stene.

**Gravitacione pukotine** nastaju duž rubova padina sklonih klizenju i odronjavanju.

**Tehnogene pukotine** nastaju delovanjem ljudi, najčešće kao posledica miniranja stena. Raspoređene su radijalno oko minskih rupa i najčešće su bez pukotinske ispune.

Po **k i n e m a t s k o j** **klasifikaciji**, pukotine se dele na: 1/*Pukotine smicanja*; 2/*Kompresione pukotine* i 3/*Tenzione pukotine*. *Pukotine smicanja* i *kompresione pukotine* obično su stisnute i nemaju veći hidrogeološki značaj.

*Tenzione pukotine* se formiraju pod dejstvom tenzionih sila, upravno na pravac maksimalne tenzije. Mogu da budu zjapeće/otvorene (što pogoduje akumulisanju PV) ili zapunjene.

Pukotine se klasifikuju i prema **š ir i n i i l i z e v u**. Zev predstavlja normalno (najkraće) rastojanje između zidova pukotine. Jedna od klasifikacija data je u tabeli 6.4.2.1.

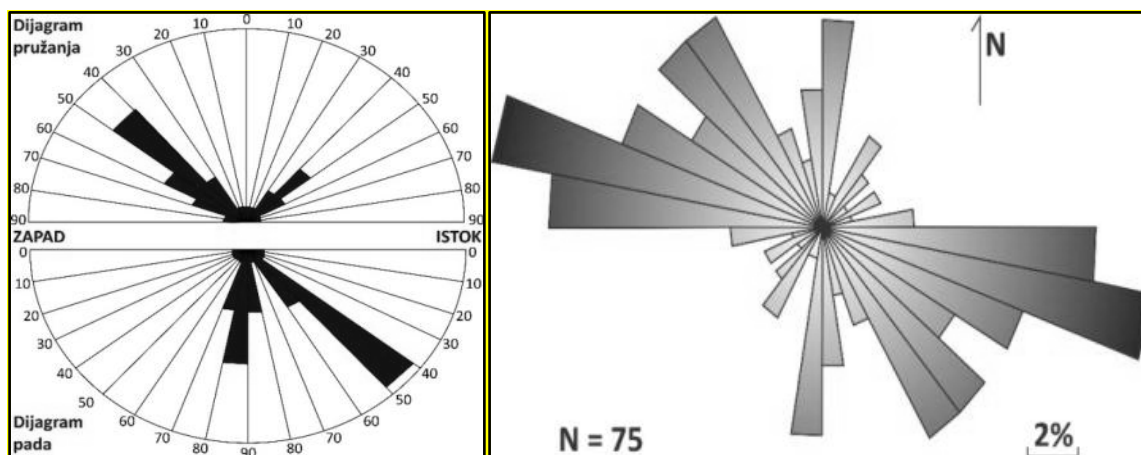
**Tabela 6.4.2.1. Klasifikacija pukotina na osnovu širine zeva [76]**

<b>Klasa</b>	<b>Zev (mm)</b>
Vrlo tesne	<0,1 mm
Tesne	0,1–0,25 mm
Delimično otvorene	0,25–0,5 mm
Otvorene	0,5–2,5 mm
Umerene širine	2,5–10 mm
Široke	>10 mm

### 6.4.3. Ispitivanje i interpretacija ispućalosti

Sa hidrogeološkog aspekta, terenska merenja ispućalosti stena imaju za cilj preliminarnu ocenu uslova za formiranje i kretanje PV. Parametri koji se ispituju (mere) su: *orijentacija pukotina*, *zev* i *stepen ispućalosti*. Merenje može da se vrši na: 1/prirodnim izdancima; 2/veštački otkrivenim površinama-u tunelima, potkopima, oknima i dr., 2/na izvađenom jezgru bušotine ili duž nabušenog profila, posredstvom pribora za karotaž bušotina.

*Orijentacija pukotina* zavisi najčešće od karaktera tektonskih pokreta i(li) dejstva ostalih faktora koji su generisali ispućalost. U okviru haotičnog rasporeda pukotina u stenskim masivima, najčešće se izdvaja nekoliko glavnih setova ili sistema pukotina, koji se međusobno presecaju i formiraju vodo(s)provodnu mrežu. Rezultati merenja orijentacija dominantnih setova/sistema pukotina i njihove statističke obrade, grafički se prikazuju preko nekoliko tipova dijagrama: Bilingsovim dijagramima i rozetama (slika 6.4.3.1), konturnim dijagramima.



**Slika 6.4.3.1. Levo: Bilingsov dijagram [12]; Desno: Rozeta pružanja pukotina [63]**

Veličina stepena (intenziteta) ispućalosti ispitivane stenske mase može da se iskaže koeficijentom površinske ispućalosti  $K_p$  i linijskim koeficijentom ispućalosti  $K_l$ .

Koeficijent površinske ispucalosti ( $K_p$ ) određuje se tako što se, na odabranom izdanku (površini) stene, premere dužine i zevovi svake pukotine. Proizvod dužine pukotine i njenog zeva čini površinu pukotine. Odnos sume površina svih pukotina i površine (celog) merenog izdanka stene predstavlja koeficijent površinske ispucalosti ( $K_p$ ):

$$K_p = \left[ 0.01 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{\Delta F} \right] \cdot 100\% \quad (6.4.3.1)$$

gde su:  $K_p$  - koeficijent površinske ispucalosti (%);  $l_i$  - dužina pukotina (m);  $s_i$  - Zev pukotina (cm);  $\Delta F$ - površina merenog izdanka stene (m<sup>2</sup>).

U podzemnim prostorijama se, zbog malih površina izdanaka stena, najčešće određuje *linijski koeficijent ispucalosti* ( $K_l$ ). On se dobija tako što se, duž merne linije, izvrši zbrajanje preseka (zevova) pukotina i podeli sa ukupnom dužinom merne linije:

$$K_l = 0.01 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{L} \quad (6.4.3.2)$$

gde su:  $K_l$ - linijski koeficijent ispucalosti; n-broj preseka prslina i pukotina;  $s_i$ - širina preseka (zeva) pukotina (cm);  $L$ - ukupna dužina merne linije (m).

## 6.5. KAVERNOZNA POROZNOST

*Kavernozna ili disoluciona poroznost* javlja se u karstnim terenima. Karst je hidrogeološki, hidrološki, geomorfološki i geološki fenomen, koji nastaje dejstvom vode na ispucale stene (izrazito) rastvorljive u vodi: krečnjak, dolomit, mermer, haloide, gips, anhidrit i dr. Kavernozna poroznost je sekundarni tip poroznosti i prethodi joj pukotinska poroznost. U pukotine, prsline i rasede prodire voda, koja ih, svojim fizičko-hemijskim dejstvom (erozijom) proširuje, pri čemu nastaju šupljine, čije su dimenzije od santimetarskog do hektometarskog reda veličine: karstni kanali, kaverne, jame, pećine (slika 6.5.1), u kojima se sakuplja i kroz koje se kreće PV.



Slika 6.5.1. Detalj pećine velikog karbonatnog karstnog sistema Jukatana [96]

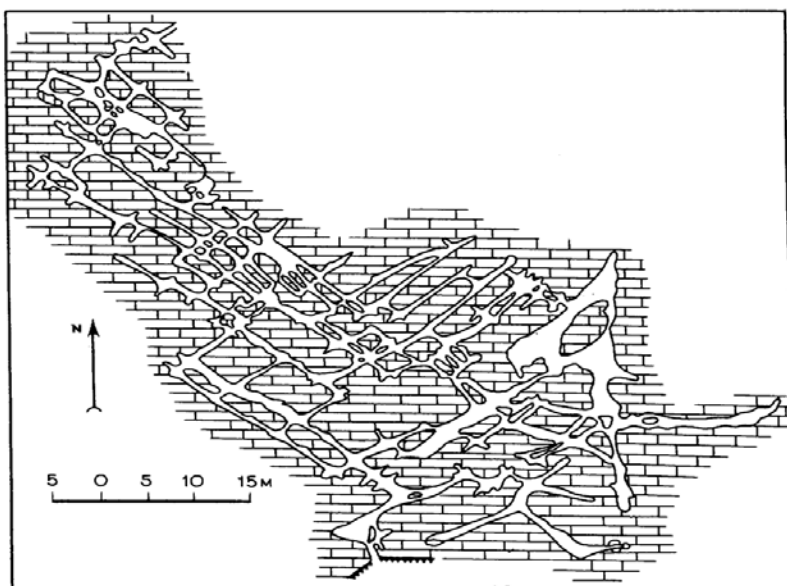


Ovaj tip poroznosti dobio je ime po latinskoj reči *caverna*, što znači *šupljina/pećina*. *Karst* je germanizovani naziv za pograničnu oblast između Slovenije i Italije, gde je ovaj fenomen (ital.–*carso*; sloven.–*kras*) razvijen u okviru karbonatnih stena. Zavisno od vrste stena rastvorljivih u vodi, razlikujemo **karbonatni, gipsni i soni karst**. Na Zemlji je najrasprostranjeniji karbonatni karst, formiran u krečnjacima, dolomitima, mermerima i krečnjačkim brečama i konglomeratima.

### 6.5.1. Nastanak i razvoj karstnog procesa

Prostorni raspored i dimenzije raseda i pukotina “diktiraju”, odnosno, usmeravaju prodiranje i kretanje vode i razvoj karstnog procesa u planu (slika 6.5.1.1) i profilu.

Pored tektonske predispozicije, intenzitet razvoja karbonatnog karsta zavisi i od mineraloško-petroloških svojstava stena. Procesu karstifikacije su najpodložniji “čisti” krečnjaci, koji su, uglavnom, sačinjeni od preko 95% minerala kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i do 5% dolomita («mešovitog» karbonata kalcijuma i magnezijuma- $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Sa povećanjem sadržaja magnezijum-karbonata ili nekih drugih primesa (laporovite, glinovite, peskovite, bituminozne i dr.) svojstvenih za krečnjačke stene, rastvorljivost se smanjuje.



Slika 6.5.1.1. Plan krečnjačkog pećinskog sistema “Solomenoj” u Južnom Uralu [77]

Čista destilovana voda vrlo malo rastvara krečnjake. Osnovni agens njihovog rastvaranja je u vodi rastvoreni ugljen-doksid ( $\text{CO}_2$ ), odnosno, blaga ugljena kiselina ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) :



Rastvaranje kalcijum-karbonata ugljenom kiselinom predstavlja reverzibilnu reakciju:



Proizvod ove reakcije rastvaranja naziva se *kalcijum-hidrokarbonat ili kalcijum-bikarbonat*. Rezultat reverzibilnog procesa jeste formiranje pećinskog nakita u karstnom podzemlju, a bigra i travertina na površini terena - u zonama isticanja karstnih vrela.

Karstifikacija započinje rastvaranjem krečnjaka i odnošenjem rastvorenog kalcijum-bikarbonata, što predstavlja proces korozije, koji dovodi do proširenja pukotina, koje, vremenom, prerastaju u (karstne) kanale sve većih dimenzija i koji predstavljaju trase kretanja PV. Proširenje kanala omogućava prodor većih količina PV i njihov turbulentni režim tečenja. U takvim uslovima se aktivira abrazivno (mehanička erozija) dejstvo vode na stene, što dodatno intenzivira karstifikaciju.

Karstni proces se, po dubini, razvija do *baze karstifikacije*. To je zona ispod koje ne postoji (izraženija) karstifikacija i koja je najčešće predstavljena nekarbonatnim (karstifikaciji nepodložnim) stenama. Dubina karstifikacije karbonatnih stenskih masa varira, a dubokim istražnim bušenjima je utvrđena i na dubinama većim od 2000m. *Stepen karstifikacije opada sa dubinom, a u skladu sa tim se smanjuje i poroznost stena* (tabela 6.5.1.1).

**Tabela 6.5.1.1. Veličine kavernozne poroznosti u zavisnosti od dubine karstifikacije [77]**

Dubina od površine terena	Kavernozna poroznost (%)	
	Ukupna	Efektivna
0–50	1,42	1,12
50–100	0,96	0,66
100–150	0,51	0,36
150–200	0,30	0,21
200–300	0,29	0,20
300–400	0,22	0,15

### 6.5.2. Oblici i tipovi karstnog reljefa

Karstifikacija stena određenog područja dovodi do formiranja specifične (površinske i podzemne) morfologije karstnih terena (slika 6.5.2.1), koja se jasno razlikuje od nekarstnih. Za intenzivno karstifikovane terene karakteristično je, posebno u malovodnim periodima godine, potpuno odsustvo ili sasvim ograničeno prisustvo površinskih tokova i akumulacija. S obzirom na izraženu poroznost stenskih masa, voda se intenzivno infiltrira (ponire) u podzemlje.



**Slika 6.5.2.1. Karstni reljef u nacionalnom parku “El Torcal” u Španiji [97]**

Na karstnim terenima razlikujemo *površinske i podzemne oblike reljefa*.

**Površinski** oblici reljefa su: *škrape, vrtache, uvale, karstna polja, kanjoni, suve i slepe rečne doline, prerasti i dr.* **Podzemni** karstni oblici (šupljine) su: *pećine, jame, ponori, karstni kanali, kaverne i dr.*

Jednu od prvih, i danas korišćenih, *klasifikacija karstnih terena (reljefa) po po tipu razvića* dao je Jovan Cvijić [6]: *holokarst, merokarst i prelazni tip*.

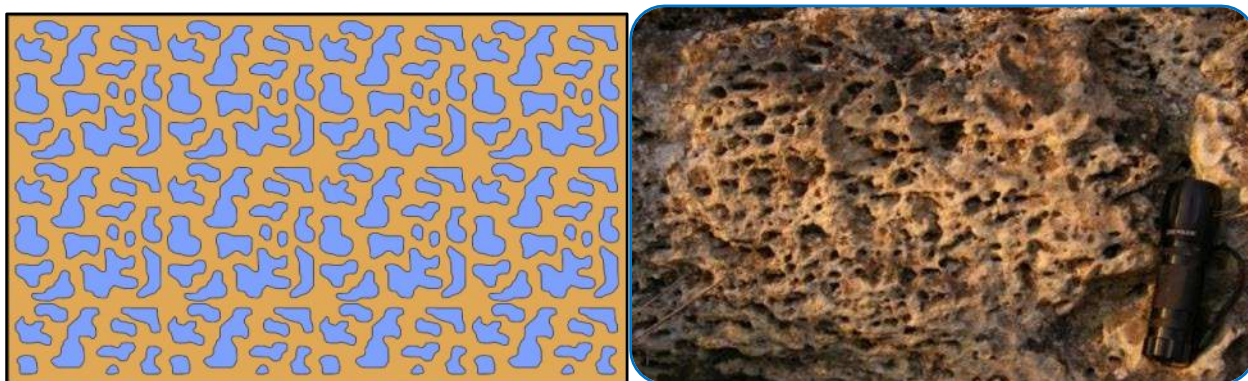
**Holokarst** ili **potpuni karst** je praktično u celini izgrađen od rastvorljivih karbonata i svojstvena mu je izrazita razvijenost svih površinskih i podzemnih karstnih oblika i gotovo potpuno odsustvo vegetacije i obradivih površina.

**Merokarst** ili **nepotpuni karst** odlikuje se većim prisustvom nerastvorljivih komponenti u karbonatnim stenama (glinoviti, peskoviti i laporoviti krečnjaci). Površina mu je prekrivena rastresitim glinovito-peskovitim materijalom, pa se naziva i *pokriveni karst*. Karakteriše ga manja razvijenost površinskih i podzemnih karstnih oblika u odnosu na holokarst, dok su površinski tokovi zastupljeniji.

## 6.6. OSTALI STRUKTURNI TIPOVI POROZNOSTI

### 6.6.1. Sunderasta (šupljikava) poroznost

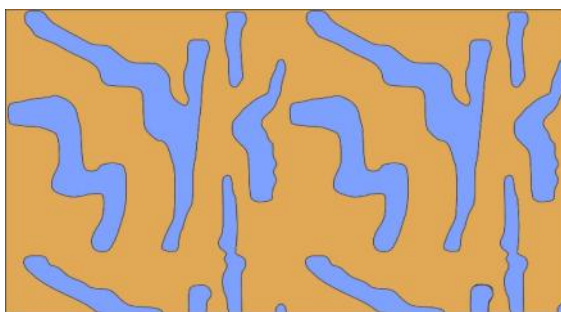
Svojstvena je za *bigar, pojedine vrste krečnjaka i vulkanske lave*. Ovaj specifični tip primarne poroznosti (slika 6.6.1.1) čine pore milimetarsko-santimetarskih dimenzija, koje su najčešće mehurastog ili sočivastog oblika.



**Slika 6.6.1.1.** *Levo: Šema sunderaste poroznosti; Desno: Sunderasta poroznost organogenih krečnjaka u okolini Negotina [20]*

### 6.6.2. Crevasta poroznost

Svojstvena je za naslage lesa i lesoidnih stena, u kojima je nastala aktivnošću određenih životinjskih i biljnih organizama (slika 6.6.2.1). Čine je izdužene i vijugave pore sa brojnim proširenjima i suženjima. Često je „udružena“ sa međuzrnskim tipom poroznosti. Nema praktični hidrogeološki značaj.



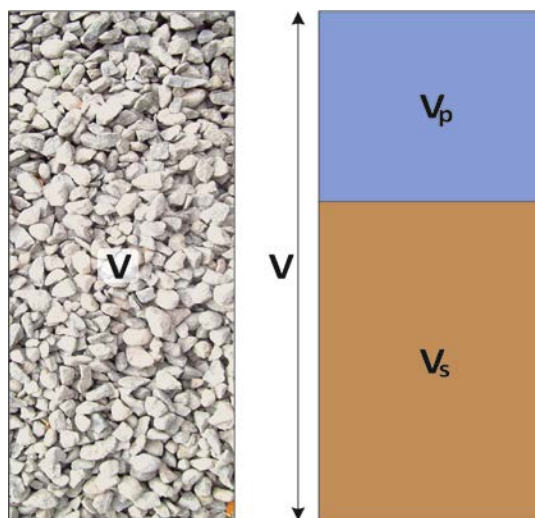
Slika 6.6.2.1. Šema crevaste poroznosti [78, 20]

## 6.7. ODREĐIVANJE VELIČINE POROZNOSTI

Poroznost je odnos zapremine svih pora u steni, prema njenoj ukupnoj zapremini (slika 6.7.1):

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V_p}{V_p + V_s} \cdot 100\% \quad (6.7.1)$$

gde su: **n**- poroznost stena ; **V**- ukupna zapremina (ispitivanog uzorka) stene;  $V_p$ - zapremina svih pora (u ispitivanom uzorku stene);  $V_s$ - zapremina čvrstih čestica stene (u ispitivanom uzorku stene).



Slika 6.7.1. Šema poroznosti rastresite stene [20]

Laboratorijsko određivanje poroznosti vrši se na osnovu *gustine čvrstih čestica i gustine stena*:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad (6.7.2)$$

odnosno (iskazano u procentima):

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot 100\% \quad (6.7.3)$$

gde su:  $n$ - poroznost stene;  $\rho_s$ - gustina čvrstih čestica i  $\rho_d$ - gustina stene u suvom stanju.

**Gustina čvrstih čestica** ispitivanog uzorka ( $\rho_s$ ) predstavlja odnos između mase čvrstih čestica i njihove zapremine, bez pora:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (6.7.4)$$

gde su:  $m_s$ – masa čvrstih čestica uzorka stene (g);  $V_s$ – zapremina uzorka stene bez pora (cm<sup>3</sup>).

Veličina ovog parametra direktno zavisi od od vrste, odnosno, (specifične) gustine minerala od kojih je stena sačinjena (tabele 6.7.1.1. i 6.7.1.2).

**Tabela 6.7.1.1. Gustine čvrstih čestica pojedinih minerala [26-adaptirano]**

Mineral	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Mineral	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Kvarc	2,65	Amfibol	2,8–3,6
Feldspati	2,45–2,76	Olivin	3,3–3,4
Minerali glina	2,6–2,8	Kalcit	2,71
Liskun	2,7–3,2	Dolomit	2,85
Piroksen	3,2–3,6		

**Tabela 6.7.1.2. Gustine čvrstih čestica pojedinih vrsta mekih i rastresitih stena [81-adaptirano]**

Vrsta stene	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vrsta stene	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Bentonitska glina	2,34	Les	2,65–2,75
Kreda	2,63–2,81	Treset	1,26–1,50
Glina	2,44–2,92	Kvarcni pesak	2,64–2,65
Humus	1,37	Prašina	2,68–2,72
Kaolinit	2,47–2,58		

**Gustina stene** predstavlja odnos mase ispitivanog uzorka i njegove (ukupne) zapremine sa porama, pri čemu ispitivani uzorak može biti suv ili zasićen vodom.

Gustina stene u suvom stanju ( $\rho_d$ ) određuje se preko sledećeg izraza:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (6.7.5)$$

gde su:  $m_s$ – masa ispitivanog uzorka u suvom stanju (g);  $V$ – zapremina uzorka sa porama (cm<sup>3</sup>).

Gustina stene u zasićenom stanju ( $\rho_z$ ) određuje se preko sledećeg izraza:

$$\rho_z = \frac{m_z}{V}$$

(6.7.6)

gde je:  $m_z$  – masa vodom zasićenog uzorka stene (g)

*Gustina stene (g) zavisi od gustine (čvrstih) mineralnih čestica koji čine skelet stene i od veličine poroznosti - što je poroznost stene veća, gustina joj je manja. Bez obzira da li je stena suva ili zasićena vodom, gustina stene (sa porama) uvek je manja od gustine čvrstih čestica iste stene.*

\* \* \*

**Kontrolna pitanja:**

- 1/ Stena je sistem, koji se sastoji od... ?**
- 2/ Kako se dele stene na osnovu mehaničkih svojstava ?**
- 3/ Koje stene imaju veću ukupnu poroznost – čvrste ili rastresite ? Navesti tipične veličine ovog parametra za: ispućali granit, šljunak, karstifikovani krečnjak.**
- 4/ Objasniti razliku između ukupne i efektivne poroznosti.**
- 5/ U kojim jedinicama se izražava veličina poroznosti stena ?**
- 6/ U kakvom odnosu stoje ukupna i efektivna poroznost kod peska i gline ?**
- 7/ Nabrojati tri osnovna tipa strukturne poroznosti i po dva tipična predstavnika za svaki od tipova ?**
- 8/ Šta je granulometrijska kriva ?**
- 9/ Kako veličina koeficijenta jednorodnosti (uniformnosti) utiče na poroznost stena ?**
- 10/ Kako se pukotine u stenama klasifikuju po genezi ?**
- 11/ U osnovnim crtama izložiti razvoj karstnog procesa i nastanak disolucione poroznosti ? Kakva je tu uloga ugljen-dioksida ?**
- 12/ Nabrojati površinske i podzemne karstne oblike.**
- 13/ U kom opsegu se kreću gustine čvrstih čestica kod mekih i rastresitih stena ?**

IV DEO

**HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA  
KRETANJE PODZEMNIH VODA**

## 7. HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA STENA

Hidrogeološka svojstva stena su: **vlažnost, kapilarnost, vodopropusnost, izdašnost i retencija.**

### 7.1. VLAŽNOST

**Vlažnost** je svojstvo stena da upijaju i zadržavaju određenu količinu vode u svojim porama. Definisana je *odnosom mase vode i čvrstih čestica* u steni. Zavisno od litoloških svojstava, stepena cementacije i veličine i strukture pora, stene su sposobne da prime i zadrže u sebi izvesnu količinu vode. *Izražava se u delovima jedinice ili procentima.*

*Prirodna vlažnost* je vlažnost stene u prirodnim uslovima u trenutku ispitivanja. Određuje se na osnovu masa prirodno vlažnog i suvog (nakon sušenja na 105 °C) uzorka:

$$W = \frac{m - m_s}{m} \cdot 100\% \quad (7.1.1)$$

gde je: **m**- masa prirodno vlažnog uzorka stene; **m<sub>s</sub>**- masa suvog uzorka stena.

*Prema stepenu prirodne vlažnosti* sve stene se dele u tri grupe [59]: *1-velike vlažnosti* (treset, glina, peskovita glina); *2-srednje vlažnosti* (laporac, pešćar, pesak) i *3-vrlo slabe vlažnosti* (masivne magmatske, metamorfne i sedimentne stene).

*Prema mehanizmu apsorbovanja* (upijanja) i zadržavanja vode u stenama, razlikujemo sledeće vidove vlažnosti:

- *higroskopnu vlažnost* ( $W_h$ ),
- *maksimalnu molekularnu vlažnost* ( $W_{m,max.}$ ),
- *kapilarnu vlažnost* ( $W_k$ ) i
- *potpunu vlažnost* ( $W_z$ ).

*Higroskopna vlažnost ili higroskopnost* ( $W_h$ ) je sposobnost čestica stene da apsorbuju vodenu paru iz vazduha. Razlikuju se dva vida higroskopnosti: *nepotpuna i maksimalna*. Pod nepotpunom se podrazumeva količina vodene pare koju apsorbuje stena iz vazduha, pri njegovoj relativnoj vlažnosti. Maksimalna higroskopnost odgovara najvećoj količini vodene pare koju stena može da apsorbuje iz vazduha, pri njegovom potpunom zasićenju vodenom parom. *Što je unutrašnja površina čestica stene veća, odnosno, što je stena sitnozrnija, veća je i higroskopnost.* Veličine maksimalne higroskopnosti ( $W_{h,max}$ ) za pojedine vrste stena date su u tabeli 7.1.1.

*Maksimalna molekularna vlažnost* ( $W_{m,max.}$ ) predstavlja *maksimalnu količinu vode koja je za čestice stene vezana molekularnim silama privlačenja*. Vrednosti maksimalne molekularne vlažnosti za pojedine vrste stena prikazane su tabeli 7.1.1.

*Kapilarna vlažnost* ( $W_k$ ) predstavlja *maksimalnu količinu vode u kapilarnim porama* u steni i u njima se zadržava *pod dejstvom kapilarnih sila*. U rastresitim stenama, naročito peskovima, pore imaju različitu veličinu i vrednost kapilarne vlažnosti se menja po vertikalnom profilu. *U nižoj zoni, neposredno iznad nivoa PV, ona je bliska vrednosti potpune vlažnosti.* Idući prema površini, ona se smanjuje i približava veličini maksimalne molekularne vlažnosti.



Potpuna vlažnost ( $W_z$ ) predstavlja maksimalnu količinu vode u steni pri potpunom zasićenju njenih pora vodom. Kod peskovitih stena, potpuna vlažnost jednaka je veličini poroznosti, ukoliko u porama nema zarobljenog vazduha. Kod glinovitih stena, koje uvećavaju obim ("bubre") pri zasićenju vodom, potpuna vlažnost je veća od poroznosti.

**Tabela 7.1.1 Veličine maksimalne higroskopnosti i maksimalne molekularne vlažnosti pojedinih vrsta stena [35]**

Stena	$W_{h,max.}$ (%)	$W_{m,max.}$ (%)
Kvarcni pesak	0.24	0.76
Peskovita glina	3.18	11.82
Les	5.16	13.18
Šljunkovita glina	22.89	33.25
Montmorionitska glina	31.46	134.50

Odnos stvarne i potpune vlažnosti stene zove se procenat zasićenja ili stepen vlažnosti.

## 7.2. KAPILARNOST

**Kapilarnost** je pojava da se voda podiže u stenama bogatim kapilarnim porama i prslinama pod dejstvom kapilarnih sila (o čemu je već bilo reči u poglavlju 3.3.3). Rad koji je potreban da bi se jedinična težina vode premestila od slobodne površine PV do određene tačke u poroznoj sredini zone aeracije, zove se *kapilarni potencijal*.

Osnovna kapilarna svojstva porozne sredine su *visina i brzina kapilarnog podizanja*. Kada se u sud sa vodom spusti tanka staklena cevčica, u njoj će se voda izdići do neke visine, usled molekularnog privlačenja vode i stakla, kao i dejstva površinskog napona, pri čemu, pod uticajem kvašenja, površina vode u cevi dobija oblik meniska (slika 7.2.1).

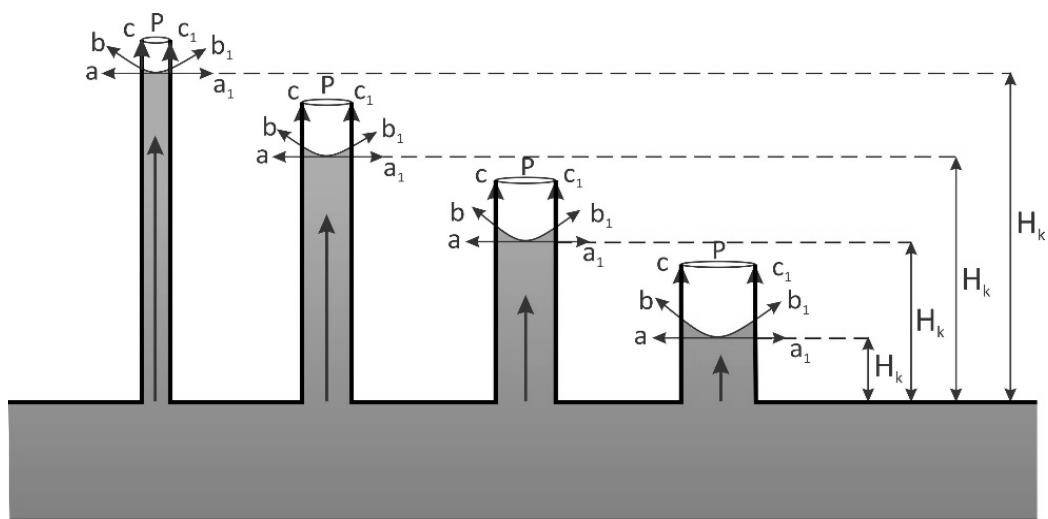
*Podizanje vode iznad slobodnog nivoa PV, kapilarnim porama, pod dejstvom sila površinskog privlačenja (kapilarnih sila), zove se kapilarno podizanje. Visina iznad nivoa slobodnih PV, do koje se podiže kapilarna voda, zove se visina kapilarnog podizanja. Zависи od od prečnika cevi, odnosno kapilarne pore (slika 7.2.1).*

Za čistu vodu ( $\rho=1 \text{ g/cm}^3$ ), na temperaturi  $t=20^\circ\text{C}$ , visina kapilarnog podizanja obrnuto je proporcionalna poluprečniku kapilara [84]:

$$H_k = \frac{0,15}{r} \quad (7.2.1)$$

gde je:  $H_k$  – visina kapilarnog dizanja (mm);  $r$  – poluprečnik kapilara (mm).

Visina kapilarnog podizanja je veća u sitnozrnim nego u krupnozrnim stenama (tabela 7.2.1).



Slika 7.2.1. Šema kapilarnog podizanja vode [17]

Tabela 7.2.1. Visina kapilarnog podizanja u različitim vrstama rastresitih stena [84, 3, 20]

Rastresiti sediment	Veličina zrna (mm)	Kapilarno podizanje (cm)
Sitnozrni šljunak	5–2	2,5
Vrlo krupnozrni pesak	2–1	6,5
Krupnozrni pesak	1–0,5	13,5
Srednjozrni pesak	0,5–0,2	24,6
Sitnozrni pesak	0,2–0,1	42,8
Prašina	0,1–0,05	105,5

Vreme potrebno za kapilarno podizanje do određene visine, za različite granulometrijske sastave stena, prikazano je u tabeli 7.2.2. Brzina kapilarnog podizanja je najveća na početku ovog procesa, da bi se tokom vremena postepeno smanjivala.

Na visinu kapilarnog podizanja utiču i: temperatura vode, koncentracija i sastav u njoj rastvorenih mineralnih materija. Viša temperatura vode snižava površinski napon, pa time i visinu kapilarnog podizanja. Povećanje koncentracije soli proizvodi rast napona, pa se mineralizovane vode podižu više od malomineralizovanih. Kada je u pitanju sastav soli, rastvor NaCl se, na primer, podiže više od rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , iste koncentracije.

Tabela 7.2.2. Prosečne visine kapilarnog podizanja i broj dana potrebnih za postizanje maksimalnog podizanja kod pojedinih vrsta stena nekih sedimenata [30-adaptirano]

Stena	Visina kapilarnog podizanja $H_k$ (cm)	Broj dana potrebnih za postizanje maksimalne visine podizanja
Krupnozrni pesak	3–12	80
Srednjozrni pesak	12–35	180–188
Sitnozrni pesak	35–120	188–160
Glinoviti pesak	120–350	160–475
Peskovita glina	350–650	–
Laka glina	650–1200	–

### 7.3. VODOPROPUSNOST

**Vodopropusnost** je svojstvo stena da kroz svoje pore propuštaju slobodnu (gravitacionu) vodu. U međunarodnoj, a sve češće i domaćoj praksi, ovo svojstvo stena naziva se *hidraulički konduktivitet* (*K*) i izražava se u m/s ili m/dan. Ustaljen, ali *nepravilan naziv* ovog parametra je *koeficijent filtracije*, s obzirom da “koeficijent” podrazumeva neimenovan (bezdimezionalan) broj.

Veličina *vodopropusnosti stene*, odnosno, brzina kretanja PV, *zavisi od veličine pora, njihove strukture i povezanosti*. Tako, stene koje imaju veliku poroznost, mogu da budu praktično vodonepropusne, kao na primer gline (tabela 7.3.1).

**Tabela 7.3.1. Tipične veličine vodopropusnosti i ukupne poroznosti nekih vrsta stena**  
[32, 46, 20 - adaptirano]

Stena	K (m/s)	n (%)
<b>Meke i rastresite</b>		
Šljunak	$10^{-2} - 10^{-1}$	25–40
Pesak	$10^{-4} - 10^{-2}$	25–50
Prašina	$10^{-7} - 10^{-3}$	35–50
Glina	$10^{-10} - 10^{-7}$	40–70
Glacijalni til, uopšte	$10^{-10} - 10^{-4}$	10–20
Bazalni til	$10^{-9} - 10^{-4}$	30–35
Jezerska prašina i glina	$10^{-11} - 10^{-7}$	35–70
Deluvijalni pesak i šljunak	$10^{-5} - 10^{-1}$	25–50
Les	$10^{-9} - 10^{-3}$	35–50
<b>Čvrste</b>		
Peščari	$10^{-8} - 10^{-3}$	5–35
Škriljci: -neispucali	$10^{-11} - 10^{-7}$	0–10
	-ispucali	$10^{-7} - 10^{-3}$
Dolomiti	$10^{-7} - 10^{-3}$	35–45
Oolitični krečnjaci	$10^{-5} - 10^{-4}$	1–25
Kreda: -primarna	$10^{-6} - 10^{-3}$	15–45
	-sekundarna	$10^{-3} - 10^{-1}$
Koralni krečnjaci	$10^{-1} - 10^1$	30–50
Karstifikovani krečnjaci	$10^{-4} - 10^2$	5–50
Mermeri ispucali	$10^{-6} - 10^{-3}$	0,1–2
Vulkanski tufovi	$10^{-5} - 10^{-3}$	15–40
Bazaltna lava	$10^{-11} - 1$	0–25
Ispucali bazalt	$10^{-5} - 1$	5–50
Magmatske i metamorfne stene, ispucale	$10^{-11} - 10^{-2}$	0–10
Magmatske i metamorfne stene, neispucale	$10^{-12} - 10^{-8}$	0–5

Prema odnosu *poroznost stena - vodopropusnost*, sve stene se mogu razvrstati u tri grupe: *1-neporozne-vodonepropusne* (kompaktne magmatske, metamorfne i sedimentne stene); *2-veoma porozne-vodonepropusne* (gline i srodne stene) i *3-porozne-vodopropusne* (šljunkovi, peskovi, ispucale i karstifikovane stene).

Na osnovu (samo) *vodopropusnosti*, sve stene se mogu podeliti u tri grupe:

- 1) *vodopropusne* (šljunkovi, peskovi, karstifikovane i veoma ispucale stene),
- 2) *polupropusne* (zaglinjeni peskovi, les, laporci i sl) i
- 3) *vodonepropusne* (masivne i kompaktne metamorfne, magmatske i sedimentne stene, gline).

Pored karaktera poroznosti, *veličina K, u manjoj meri, zavisi i od fizičko-hemijskih svojstava PV*, pre svega od temperature i mineralizacije, koje uslovljavaju razlike u gustini, viskozitetu i drugim karakteristikama relevantnim za brzinu kretanja PV.

#### 7.4. IZDAŠNOST

*Svojstvo stena, zasićenih vodom da, pri sniženju nivoa vode (npr. pri crpenju PV bunarima), odaju slobodnu gravitacionu vodu, zove se **izdašnost**. Kvantitativno se izražava preko parametra **specifične izdašnosti**:*

$$\mu = \frac{V_v}{V} \quad (7.4.1)$$

gde je:  $\mu$ - specifična izdašnost stena (delovi jedinice);  $V_v$ - zapremina vode sposobne da gravitaciono istekne iz vodom zasićene stene;  $V$ - zapremina porozne stene zasićene vodom.

Krupnozrne rastresite stene (pesak, šljunak), kao i stene sa kavernama ili širokim pukotinama, imaju veliku specifičnu izdašnost, dok se, npr., glinovite stene i čvrste masivne stene odlikuju niskim vrednostima ovog parametra (tabela 7.4.1). *Specifična izdašnost je, u fizičkom smislu i brojčano, jednaka efektivnoj poroznosti.*

**Tabela 7.4.1. Tipične veličine poroznosti i specifične izdašnosti nekih stena [28, 4, 20 - adaptirano]**

<b>S t e n a</b>	<b>n (%)</b>	<b><math>\mu</math> (%)</b>
<b>Meke i rastresite</b>		
Šljunak	25–35	16–23
Krupnozrni pesak	30–45	10–22
Sitnozrni pesak	26–50	10–25
Prašina	35–50	5–10
Glina	45–55	1–3
Pesak i šljunak	20–30	10–20
Glacijalni til	20–30	5–15
<b>Čvrste</b>		
Peščari	5–30	3–15
Prašinaste stene	20–40	5–10
Krečnjaci i dolomiti	1–25	0,5–10
Karstifikovani krečnjaci	5–35	2–15
Glinac	1–10	0,5–5
Šupljikavi bazalt	10–40	5–15
Ispucali bazalt	5–30	2–10
Tuf	10–55	5–20
Neispucali gnajsevi i graniti	0,01–3,0	<1
Raspadnuti graniti i gnajsevi	5–25	0,5–5

Pored gravitacione, postoji i *elastična izdašnost stena*. To je *sposobnost stena (zasićenih vodom) da deo slobodne PV odaju zahvaljujući elastičnom sažimanju porozne sredine i, u manjoj meri, elastičnom širenju PV*. Svojstvena je za uslove u kojima PV obitava i kreće se pod pritiskom.

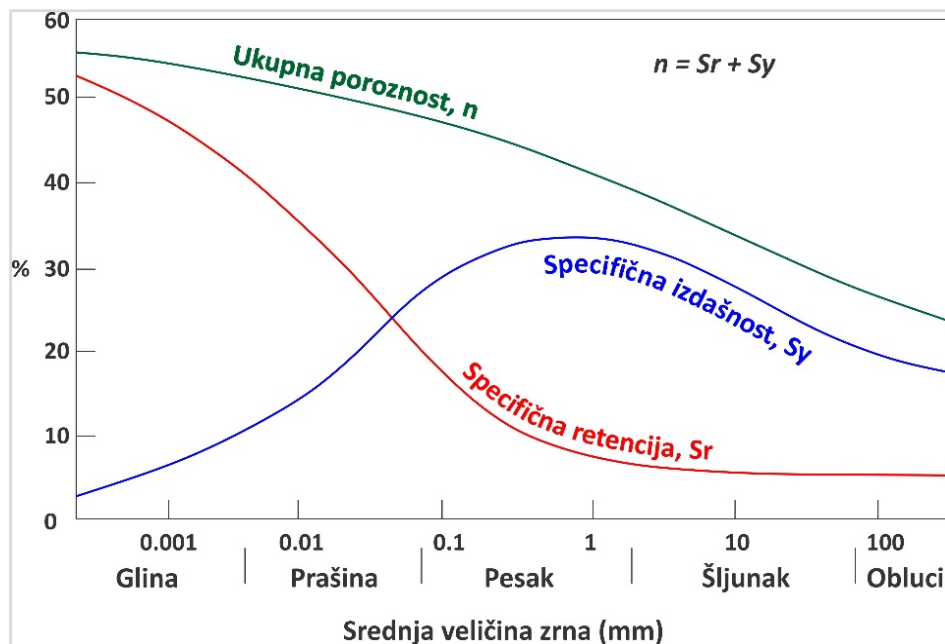
## 7.5. RETENCIJA

Svojstvo stene da, u svojim porama, zadržava vodu nakon zasićenja, protivno sili gravitacije zove se **retencija** i kvantitativno se iskazuje preko parametra *specifične retencije*:

$$S_r = \frac{V_r}{V} \quad (7.5.1)$$

gde je: **S<sub>r</sub>**- specifična retencija (u delovima jedinice); **V<sub>r</sub>**- zapremina retencione (zadržane) vode; **V**- zapremina (ukupna) zasićene stene.

**Retencija stene je, u fizičkom smislu, suprotna izdašnosti**, pa se tako, glinovite stene, bogate kapilarnim i subkapilarnim porama, odlikuju velikom retencijom dok je kod (krupnozrnih) peskova i šljunkova ovo svojstvo slabo izraženo (slika 7.5.1).



**Slika 7.5.1. Uporedni prikaz ukupne poroznosti, specifične izdašnosti i specifične retencije kod stena različitog granulometrijskog sastava [90, 32, 20]**

**Specifična retencija je brojčano jednaka maksimalnoj molekularnoj vlažnosti stene ( $W_{m,max.}$ ).**

\*

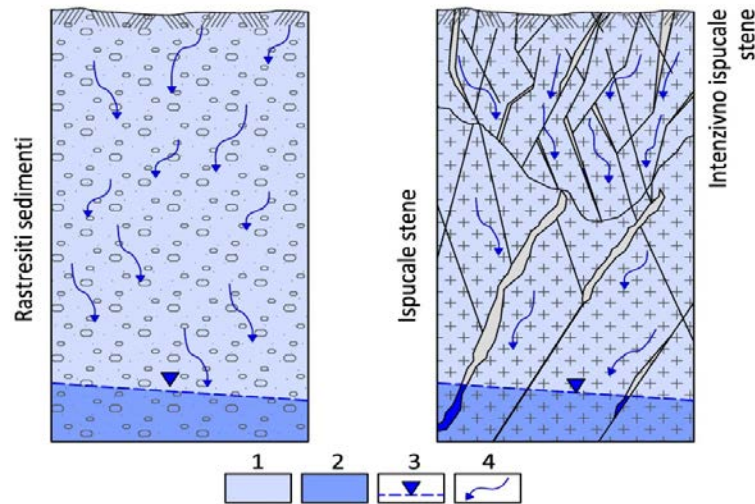
Na osnovu izlaganja u poglavljima 7.4 i 7.5, zaključujemo da **ukupnu zapreminu vode u zasićenoj steni čini suma** zapremina: a) vode sposobne da gravitaciono istekne ( $V_v$ ) i b) retencione vode ( $V_r$ ).

## 8. KRETANJE PODZEMNE VODE

Dva su osnovna vida kretanja slobodnih PV: **1- infiltracija i 2- filtracija**.

### 8.1. INFILTRACIJA

Već je istaknuto da se atmosferske padavine, koje dospeju na tlo, rashoduju na tri komponente: **I- površinski oticaj; II- evapotranspiraciju III- infiltraciju**, odnosno, deo voda koji prodire (infiltrira se) ispod površine tla i, jednim delom, dopire do (i prihranjuje) PV, u zoni zasićenja (slika 8.1).



**Slika 8.1 Šema infiltracije vode od površine tla do zone zasićenja** [74, 20]: 1 – zona aeracije; 2 – zona zasićenja; 3 – nivo podzemnih voda; 4 – infiltracija

Proces infiltracije može se razložiti u tri faze: 1-ulaz vode kroz površinu tla; 2-prolaz kroz tlo i “popunjavanje” deficita vlažnosti i 3-**proceđivanje** do slobodne površine podzemnih voda. Proceđivanje nije kontinualan proces, već njegov intenzitet (efekat prihranjivanja PV u zoni zasićenja) zavisi prevashodno od količine padavina koje se infiltriraju u tlo i deficita vlage u (nezasićenoj) zoni aeracije.

Pored **proceđivanja**, kao najprisutnijeg vida infiltracije do PV u zoni zasićenja, razlikujemo još dva vida: **normalnu infiltraciju i poniranje**.

**Normalna (ili potpuna) infiltracija** se odvija u zonama ispod korita površinskih tokova (reka, kanala) i ispod prirodnih i veštačkih vodnih akumulacija (jezera). U ovakvim uslovima, infiltracija se, s obzirom da ne zavisi od kiše/suše, odvija kontinualno, kroz aeracionu zonu koja je potpuno zasićena vodom, pa je i prihranjivanje PV mnogo efikasnije (u odnosu na proceđivanje).

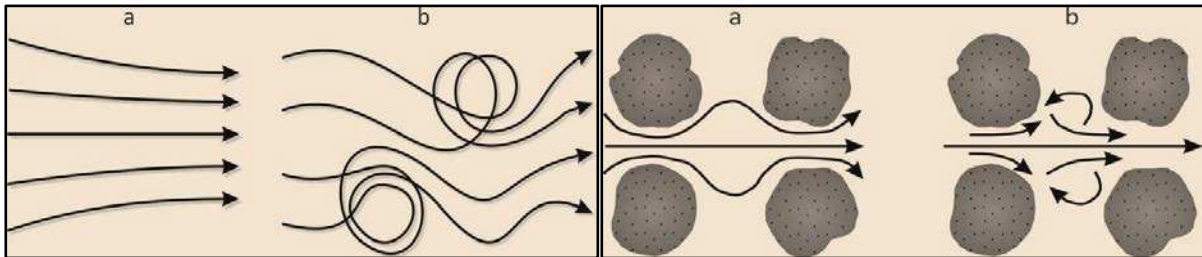
**Poniranje** je vid infiltracije koji je svojstven za karst i predstavlja koncentrisano poniranje/uviranje (dela) površinskog toka u jedan (koncentrični) ponor ili “razbijenu” ponorsku zonu. Pored razlika u pogledu “načina ulaska” vode kroz površinu tla, poniranje se, od druga dva vida infiltracije, s obzirom na specifičnosti karsta i kavernozone poroznosti, razlikuje i po mehanizmu prodiranja (ponirućih) voda do zone zasićenja (o čemu će više reći biti u poglavlju 10.2.3)

O infiltraciji, kao osnovnom vidu prihranjivanja PV u zoni zasićenja, biće reči i u poglavlju 11.1.

## 8.2. FILTRACIJA

**Kretanje slobodne PV u potpuno zasićenoj sredini, pod dejstvom hidrauličkog gradijenta,** zove se **filtracija**. U zavisnosti od strukturnog tipa poroznosti stene, veličine pora i nekih drugih faktora, razlikuju se **dva osnovna režima filtracije PV**:

- 1) **Laminarni**, koji je svojstven za male brzine filtracije PV i pri kome su strujnice filtracionog toka međusobno razdvojene, bez međusobnog presecanja i „vrtloženja” (slika 8.2.1). Zastupljen je, u načelu, u stenama sa međuzrnskom poroznošću i slabije ispucalim stenama.
- 2) **Turbulentni**, za koji je svojstveno presecanje strujnica i pojave vrtloženja (slika 8.2.1) i koji je, u načelu, zastupljen u stenama sa kavernoznom poroznošću, izrazito ispucalim stenama i izrazito krupnozrnim stenama sa međuzrnskom poroznošću.



Slika 8.2.1. Šeme strujnica laminarnog (a) i turbulentnog (b) filtracionog toka [27, 21]

### 8.2.1. Laminarni režim filtracije

Osnovni zakon laminarne filtracije PV postavio je Darsi (1856) tokom eksperimenta sa filtracijom vode kroz cilindar ispunjen uzorcima peska i šljunka (slika 8.2.1.1). Osnovni zaključak proistekao iz eksperimenta bio je da je **veličina filtracionog proticaja ( $Q$ ) proporcionalna veličini poprečnog preseka cilindra ( $F$ ), veličini hidrauličkog konduktiviteta ispitivanog uzorka ( $K$ ) i razlici nivoa vode u cilindru ( $h_1 - h_2 = \Delta h$ ), a obrnuto proporcionalna dužini uzorka ( $L$ ). Za opšti slučaj laminarne filtracije PV u zasićenoj sredini (slika 8.2.1.2), prethodni zaključak je pretočen u **Darsijev (linearni) zakon filtracije**, koji je iskazan sledećom jednačinom:**

$$Q = K \times F \times \Delta h / L \quad (8.2.1.1)$$

gde je:  **$Q$** – filtracioni proticaj ( $m^3/s$ );  **$K$** – hidraulički konduktivitet ( $m/s$ );  **$F$** – površina poprečnog preseka toka upravnog na smer kretanja PV ( $m^2$ );  **$\Delta h/L$** – razlika nivoa PV na putu filtracije – koja se zove hidraulički gradijent ( **$I$** ).

Transformacijom izraza (8.2.1.1) dobija se:

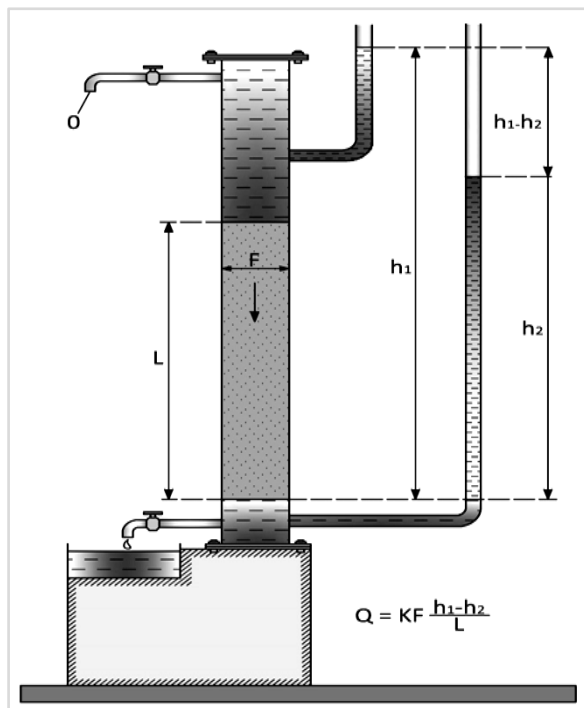
$$Q / F = K \times I \quad (8.2.1.2)$$

odnosno:

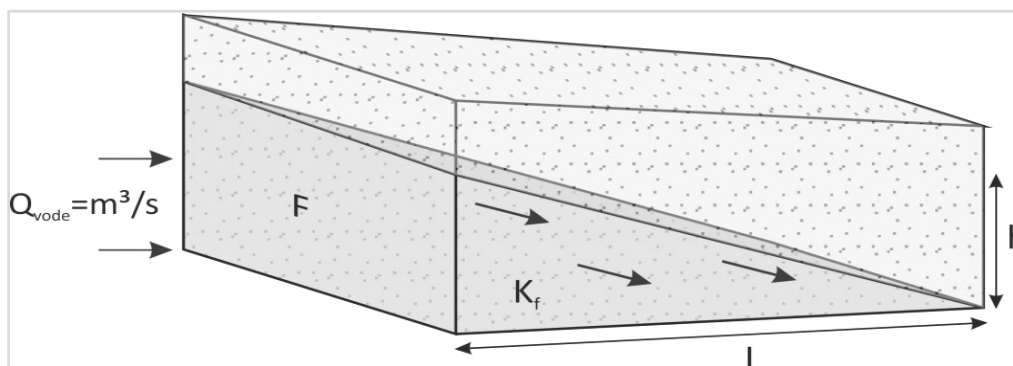
$$v = K \times I \quad (8.2.1.3)$$

gde je:  **$v$**  – brzina filtracije ( $m/s$ ),

čime je iskazana *linearna zavisnost brzine filtracije od hidrauličkog gradijenta*.



**Slika 8.2.1.1. Darsijev laboratorijski pribor [9]**



**Slika 8.2.1.2. Šema parametara Darsijeve jednačine ( $K_f$  – hidraulički konduktivitet) [33]**

Veličina brzine filtracije ( $\mathbf{v}$ ) iz izraza (8.2.1.3) proističe iz pretpostavke da se PV kreće (filtrira) kroz celu površinu preseka ( $F$ ), uključujući tu i delove koje zauzima mineralni skelet stene, kao i da je kretanje pravolinijsko. To, naravno, nije slučaj, tako da se ovde radi o *fiktivnoj brzini* filtracije, koja, sa *realnom brzinom* filtracije, stoji u sledećem odnosu:

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v} / \mathbf{n}_e \quad (8.2.1.4)$$

gde je:  $\mathbf{v}_e$  – realna brzina filtracije;  $\mathbf{v}$  – fiktivna brzina filtracije;  $\mathbf{n}_e$  – efektivna poroznost stene,



što znači da je realna brzina filtracije uvek veća od fiktivne, s obzirom da je efektivna poroznost stene uvek manja od 1.

Ni u najvodopropusnijim stenama, filtracija PV ne bi mogla da se ostvari bez postojanja hidrauličkog gradijenta, odnosno, „nagiba“ nivoa PV, dovoljno velikog da savlada unutrašnje otpore tečenju (trenje između strujnica PV i mineralnog skeleta stene, kao i sile unutrašnjeg trenja u samoj PV) u poroznoj sredini. Po gotovo identičnom (fizičkom) principu, tok električne struje između dve tačke može da se ostvari samo ukoliko postoji dovoljno visok napon, odnosno, razlika potencijala između tih tačaka, koja će „nadvladati“ električni otpor. Isto tako, toplotni tok između dve tačke može da se ostvari samo ukoliko postoji dovoljna razlika u temperaturama između posmatranih tačaka.

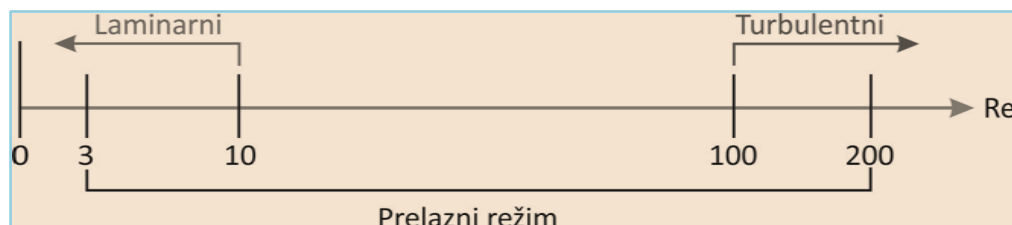
### 8.2.2. Turbulentni režim filtracije

Fizički uslovi pod kojima se filtracija voda odvija u određenom (laminarnom ili turbulentnom) režimu, bili su predmet izučavanja Rejnoldsa (1883). Na osnovu rezultata brojnih laboratorijskih eksperimenata, ovaj istraživač je došao do zaključka da se uslovi i režim filtracije mogu iskazati preko veličine jednog bezdimenzionalnog parametra - *Rejnoldsovog broja* (Vuković i Soro, 1985):

$$Re = \frac{v \cdot d_{ef}}{\nu} \quad (8.2.2.1)$$

gde je: **Re**- Rejnoldsov broj; **v**- brzina filtracije (m/s); **d<sub>ef</sub>**- efektivni prečnik zrna filtracione sredine (m); **ν**- kinematska viskoznost vode (m<sup>2</sup>/s).

Eksperimentalno je dokazano da linearna zavisnost (tj. laminarno strujanje), važi do veličine  $Re = 10$ , dok se turbulentni režim strujanja javlja pri vrednosti  $Re > 100$  (slika 8.2.2.1). Za prelazni režim strujanja podzemnih voda u poroznoj sredini usvojen je interval  $Re = 3 - 200$ .



Slika 8.2.2.1. Režim filtracije PV u zavisnosti od veličine Rejnoldsovog broja [70]

### 8.2.3. Filtracioni parametri

Već je istaknuto da **hidraulički konduktivitet** ( **$K (=) m/s$** ) predstavlja osnovni (filtracioni) parametar, kojim se kvantitativno iskazuje svojstvo stena da kroz svoje pore propuštaju slobodnu (gravitacionu) vodu i objašnjena je njegoa “uloga” u Darsijevoj jednačini (laminarne) filtracije.

U fizičkom smislu, *veličina hidrauličkog konduktiviteta odražava veličinu unutrašnjih otpora filtraciji* (trenju između strujnica PV i mineralnog skeleta stene, kao i sile unutrašnjeg trenja u samoj PV) u poroznoj sredini. Zависи, pre svega, od strukture poroznosti i veličine pora. Ukoliko su pore manje, u steni će biti više fizički vezane vode, što će otežavati filtraciju slobodnih PV, pa će i hidraulički konduktivitet biti manji. Što je veći broj pasivnih (izolovanih) pora u steni to je i mogućnost kretanja (filtracije) PV manja, pa će manji biti i hidraulički konduktivitet. Veličina ovog parametra zavisi i od veličine mineralizacije PV i njene temperature, tako što ovi faktori utiču na gustinu i viskoznost PV, pa tako i na „lakoću“ (brzinu) njihovog kretanja kroz poroznu sredinu.

*Veličina hidrauličkog konduktiviteta može da se odredi sledećim metodama: 1/Terenskim; 2/Laboratorijskim i 3/Posrednim.*

Terenske metode. Podrazumevaju izvođenje odgovarajućih opita na terenu, čija se hidrogeološka, odnosno, filtraciona svojstva ispituju. U ovakve terenske opite spadaju: *opiti crpenja PV iz bunara, opiti nalivanja ili utiskivanja PV u istražne bušotine, raskope i sl. istražne radove/objekte.* Tokom opita se mere količine iscrpljene ili utrošene (u slučaju nalivanja ili utiskivanja) vode i promene nivoa PV, na osnovu čega se izračunava hidraulički konduktivitet. Primenom terenskih metoda, dobijaju se najrepresentativniji rezultati u pogledu veličina K ispitivanog terena.

Laboratorijske metode. Podrazumevaju izvođenje opita filtracije vode kroz uzorke rastresitih stena pomoću odgovarajućih pribora (poput pomenutog Darsijevog opita). Za razliku od terenskih opita, u ovom slučaju se radi sa “poremećenim” uzorcima stena, odnosno, granulometrijski poredak i struktura ispitivanog uzorka su poremećeni (“rastreseni”) u odnosu na njegovo prirodno stanje na terenu, sa koga su uzorkovani. Samim tim i rezultati u pogledu veličine K su manje reprezentativni.

Posredne metode se baziraju na proračunima K *primenom empirijskih formula*, na osnovu rezultata granulometrijskih analiza poremećenih uzoraka stena. Na osnovu brojnih laboratorijskih eksperimenata izvedeno je i razrađeno nekoliko empirijskih formula od strane nekolicine autora: Hazena, Slihtera, Tercagija, Kozeni-Karmena, USBR i dr (Dragišić i Živanović 2014.), pri čemu svaka od navedenih formula ima određena ograničenja u pogledu granulometrijskih karakteristika (prosečne krupnoće zrna, jednorodnosti) uzoraka stena. Važno je istaći da primena ovih metoda daje samo orjentacione rezultate, te da sračunate veličine K najčešće odstupaju od reprezentativnih. Upoređivanjem rezultata dobijenih primenom različitih empirijskih formula, konstatovano je da se, za isti ispitani uzorak stene, sračunate veličine K razlikuju i do 20 puta. U odnosu na veličine dobijene terenskim opitima crpenja PV, empirijski sračunate veličine K su niže i do 50 puta (Vuković i Soro 1991).

Drugi filtracioni parametar kojim se kvantifikuje veličina vodopropusnosti ispitivanih stena, odnosno, brzina filtracije PV, je **transmisivnost – T (m<sup>2</sup>/s)**. U stručnoj praksi i literaturi se pominje i kao *vodoprovodnost ili transmisibilnost*.

U fizičkom smislu, *veličina transmisivnosti iskazuje brzinu kojom PV prolazi kroz jediničnu širinu izdani (zone zasićenja PV), pod jediničnim hidrauličkim gradijentom [19].* Izražava se kao *proizvod hidrauličkog konduktiviteta i debljine izdanske zone (zone zasićenja PV):*

$$T = K_f \times H \quad \text{ili} \quad T = K_f \times m \quad (8.2.3.1)$$

gde je: **T**– transmisivnost ( $m^2/s$ ); **K**– koeficijent filtracije ( $m/s$ ); **H**– debljina izdanske zone sa slobodnim nivoom PV ( $m$ ) i **m**– debljina izdani sa nivoom PV pod pritiskom ( $m$ ).

*Najreprezentativnije veličine transmisivnosti dobijaju se na osnovu rezultata opita crpenja PV iz bunara.*

\* \* \*

**Kontrolna pitanja:**

- 1/ Za koje stene je svojstvena velika prirodna vlažnost ?**
- 2/ Objasniti razliku između maksimalne molekularne i potpune vlažnosti ?**
- 3/ Od kojih sve faktora zavisi visina kapilarnog dizanja ?**
- 4/ Kojim parametrom i u kojim jedinicama se kvantitativno izražava vodopropusnost stena ?**
- 5/ U kakvom odnosu stoje veličine vodopropusnosti i ukupne poroznosti kod gline i peska ? Objasniti.**
- 6/ Šta je izdašnost stena, kojim parametrom i u kojim jedinicama se kvantitativno izražava ?**
- 7/ U kakvom odnosu stoje veličine izdašnosti i retencije kod šljunka i gline ? Objasniti**
- 8/ Ukupnu zapreminu vode u zasićenoj steni čini suma...?**
- 9/ Objasniti razliku između proceđivanja i normalne infiltracije ?**
- 10/ Kako glasi Darsijev (linearni) zakon filtracije ?**
- 11/ U kojim stenama može da se ostvari turbulentni režim filtracije ? Objasniti.**
- 12/ Kojim metodama može da se odredi veličina hidrauličkog konduktiviteta ?**
- 13/ Ukratko izložiti i obrazložiti reprezentativnost rezultata ovih metoda.**

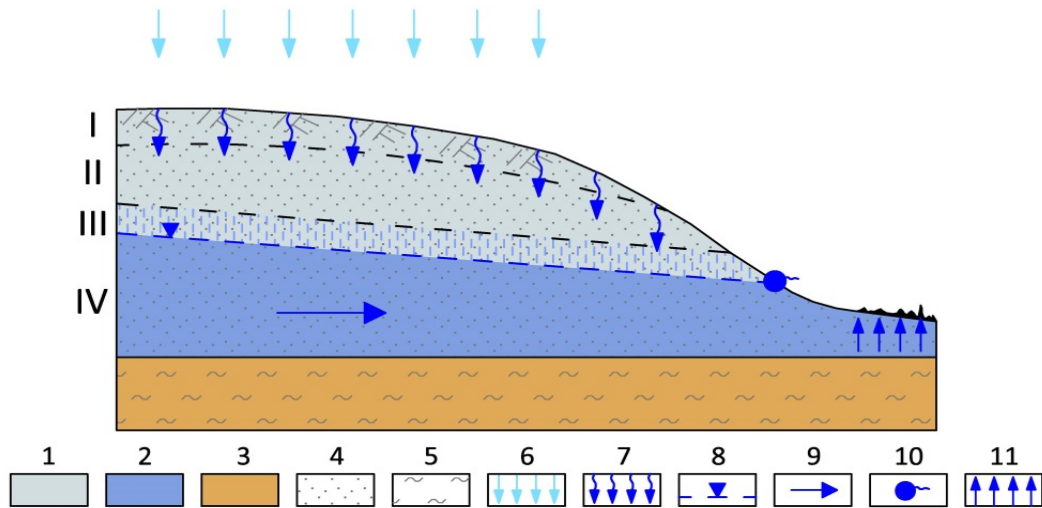
V DEO

**IZDANI (1)**

## 9. VERTIKALNI RASPORED PODZEMNIH VODA

Padavine koje se izlučuju na kopno rashoduju se na: *površinski oticaj, isparavanje i infiltraciju*. Deo voda koji se infiltrira dospeva do nivoa slobodnih PV. Ovakva raspodela podrazumeva da je tlo izgrađeno od vodopropusnih stena. U slučaju vodonepropusnih i slabopropusnih stena, padavine se uglavnom rashoduju na isparavanje i površinski oticaj, dok je infiltracija umanjena ili izostaje.

U načelu, u vertikalnom profilu podzemnog dela hidrosfere mogu da se izdvoje *dve hidrofizičke zone: 1-zona aeracije (ili "nadizdanska zona") i 2- zona zasićenja slobodnim PV (ili "izdanska zona")* (slika 9.1).



**Slika 9.1. Vertikalni raspored podzemnih voda** [59, 38, 20 – delimično izmenjeno]: 1- zona aeracije: I- rudinski pojas; II- prelazni pojas; III- kapilarni pojas; 2 (IV) - zona zasićenja slobodnim PV; 3- vodonepropusne stene; 4- pesak; 5- glina; 6- padavine; 7- infiltracija 8- nivo slobodnih PV; 9- smer kretanja (filtracije) PV; 10- izvor; 11- difuzno isticanje PV („pištovina“)

U polarnim oblastima i na visokim planinama, značajan deo podzemne hidrosfere (i do 1000m dubine) može da čini *zona zamrzavanja PV*. U područjima sa umerenom klimom, ova zona ima (samo) sezonski karakter i zahvata samo pripovršinske delove terena.

### 9.1. ZONA AERACIJE (NADIZDANSKA ZONA)

Obuhvata deo profila od površine tla do površine slobodnih PV. U ovoj zoni pore sadrže: vazduh, vodenu paru, fizički vezanu i kapilarnu vodu. U periodu topljenja snega i leda, kao i u periodu obilnih kiša, u zoni aeracije egzistiraju i slobodne (gravitacione) vode. U određenim slučajevima, slobodne PV u zoni aeracije mogu da se jave u okviru tzv. „lebdećih izdani“. Zavisno od lokalnih klimatskih faktora, ovde mogu da egzistiruju i PV u vidu leda. Debljina zone aeracije zavisi od geoloških svojstava terena, dubine zaleganja vodopropusnih stena, reljefa, lokalnih klimatskih faktora (količine padavina, temperature vazduha, isparavanja), veličine infiltracije i dr. Varira u širokom dijapazonu od delova metra pa do 100 i više metara. U izuzetnim slučajevima, kada nivo slobodnih PV izbija na površinu obrazujući izvore, pištvine (slika 9.1) izdanska oka i močvare, zona aeracije odsustvuje.

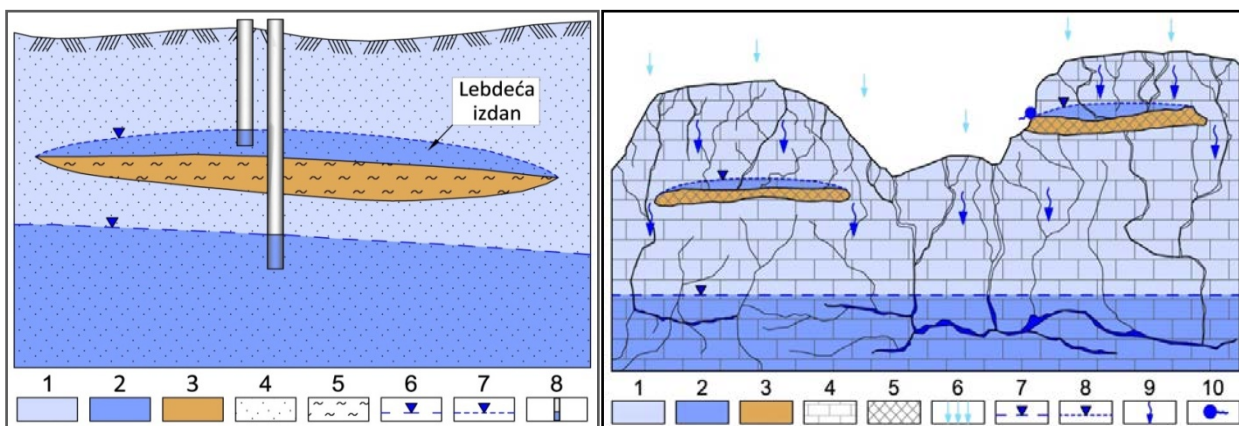
Kroz zonu aeracije se atmosferske padavine infiltriraju i prihranjuju slobodne PV, dok se, na drugoj strani, preko zone aeracije odvija isparavanje PV. Poznavanje karakteristika zone aeracije je od izuzetnog značaja kod rešavanja brojnih hidrogeoloških problema. Bez poznavanje njene debljine, poroznosti, vlažnosti, prisustva i karakteristika vegetacionog pokrivača, ne može da se izvede realna analiza bilansa PV konkretnog područja, odnosno, ne mogu da se sagledaju i ocene uslovi prihranjivanja zone zasićenja. Poznavanje njenih karakteristika od neposrednog je značaja i kod ocene ugroženosti PV od zagadjivanja, kao i kod planiranja određenih mera regulacije prirodnog režima PV (npr. veštačkog prihranjivanja).

*U okviru zone aeracije izdvajaju se tri pojasa: 1/ rudinski, 2/prelazni i 3/ kapilarni*

**Rudinski pojas** je najviši pojas zone aeracije, koji je debeo najčešće do nekoliko metara, izuzetno i 10-20 m, u tropskim predelima. U ovom pojasu voda je slobodna samo neposredno po izlučivanju padavina, kada se infiltrira ka zoni zasićenja, pri čemu se jedan deo zadržava kao *zemljišna vlaga*, u vidu fizički vezane vode ili vodene pare.

**Prelazni pojas se** nalazi između rudinskog i kapilarnog. Kroz njega se voda kreće vertikalno naniže. U načelu, prelazni pojas je najsiromašniji vodom, a značajno je prisustvo vazduha. U njemu se zadržavaju vode u vidu vodene pare (zajedno sa vazduhom) i fizički vezane vode. Slobodne podzemne vode javljaju se jedino u tranzitu, tokom infiltracije ka zoni zasićenja (nivou izdani), a u određenim slučajevima mogu da se formiraju *lebdeće izdani*. Debljina ovog pojasa široko varira i najveća je u razvodima reka gde dostiže nekoliko desetina, pa do 100 i više metara. Kod intenzivno karstifikovanih terena, debljina prelaznog pojasa može da bude i nekoliko stotina metara – npr. u dinarskom holokarstu Crne Gore i Hercegovine.

*Lebdeće ili lažne izdani su manje akumulacije slobodnih PV u okviru prelaznog pojasa zone aeracije. Formiraju se na "sočivima" ili prosljocima vodonepropusnih stena, u okviru rasprostranjenja vodopropusnih stena (slika 9.1.1).*

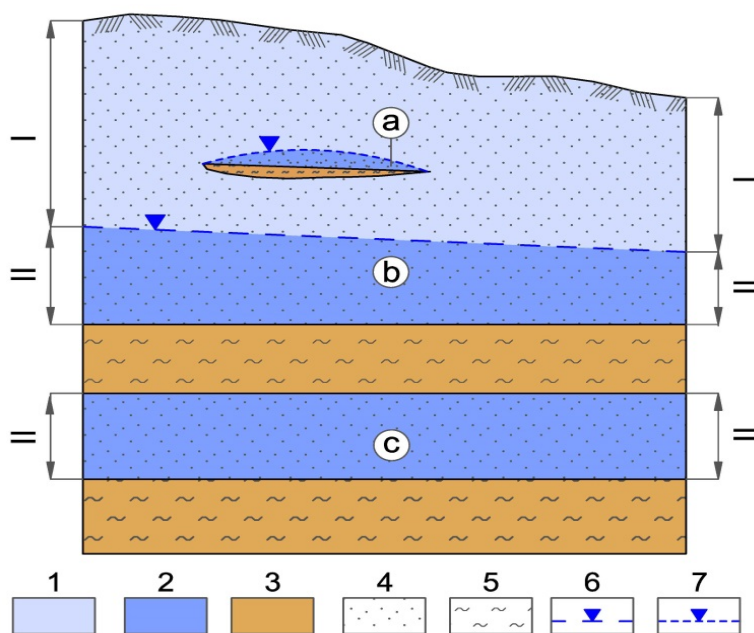


**Slika 9.1.1. Levo : Lebdeća izdan u rastresitim stenama [27,20]:** 1-zona aeracije; 2-zona zasićenja PV; 3-vodonepropusni prosljak; 4-pesak; 5-glina; 6-«pravi» nivo PV ; 7-nivo PV lebdeće/lažne izdani; 8-bunar; **Desno : Lebdeće izdani na sočivima boksita u okviru karstifikovanih krečnjaka [20]:** 1-nadizdanska zona; 2-izdanska zona; 3-vodonepropusno « sočivo »; 4-karstifikovani krečnjaci; 5-boksit; 6-padavine; 7-« pravi » nivo PV; 8-nivo PV lebdeće/lažne izdani; 9-infiltracija; 10-izvor koji drenira lebdeću izdan.

**Kapilarni pojas** je neposredno iznad zone zasićenja slobodnim PV. Uslov za njegovo formiranje je prisustvo kapilarnih pora u stenama. Vode kapilarnog pojasa su u prisnoj vezi sa slobodnim PV, što za posledicu ima i njegovu dinamičnost, odnosno, vertikalna kolebanja, koja zavise od (sezonskog, dnevnog) kolebanja nivoa PV. U periodima otapanja snega i obilnih kiša, kretanje ovog pojasa je naviše, a sušnom periodu naniže, zbog intenzivnog isparavanja.

## 9.2. ZONA ZASIĆENJA (IZDANSKA ZONA)

Obuhvata delove terena ispod nivoa slobodnih PV, u kojima su pore ispunjene slobodnim PV. Gornju granicu zone zasićenja čini zona aeracije ili vodonepropusne stene, dok donju granicu čine vodonepropusne stene (slika 9.2.1).



**Slika 9.2.1. Šeme zaleganja podzemnih voda [37,20]:** I(1)– zona aeracije; II(2)– zona zasićenja; a– lebdeća izdan; b– izdanska zona sa slobodnim nivoom; c– izdanska zona pod pritiskom; 3– vodonepropusna stena; 4– pesak; 5– glina; 6–slobodni nivo PV; 7–nivo lebdeće izdani

## 10. IZDANI

Slobodne PV se akumuliraju u različitim geološkim sredinama (stenama), sa različitim strukturama poroznosti, različitom vodopropusnošću i izdašnošću. **Geološke sredine potpuno ili delimično zasićene slobodnim PV, sposobne da akumuliraju i odaju PV, nazivaju se izdanima.** U domaćoj stručnoj praksi ravnopravno se koristi i (medjunarodno prihvaćeni) termin **akvifer** (eng. *aquifer*). Potpuno zasićene slobodnim PV su izdani pod pritiskom, a delimično zasićene su izdani sa slobodnim nivoom. U drugom slučaju, pored zone zasićenja, funkcionalni deo izdani čini i zona aeracije.

Izdani se formiraju na račun infiltracije atmosferskih i površinskih voda. Vode koje se infiltriraju kreću se verikalno naniže (pod dejstvom gravitacije) sve dok postoje superkaliparne pore, odnosno, do nailaska na podlogu (podinu) izgrađenu od vodonepropusnih stena, koja usporava/zaustavlja kretanje i uslovljava akumuliranje slobodnih PV.

Dve su osnovne klasifikacije izdani: **1-Na osnovu hidrodinamičkih karakteristika nivoa**  
**2-Na osnovu strukture poroznosti.**

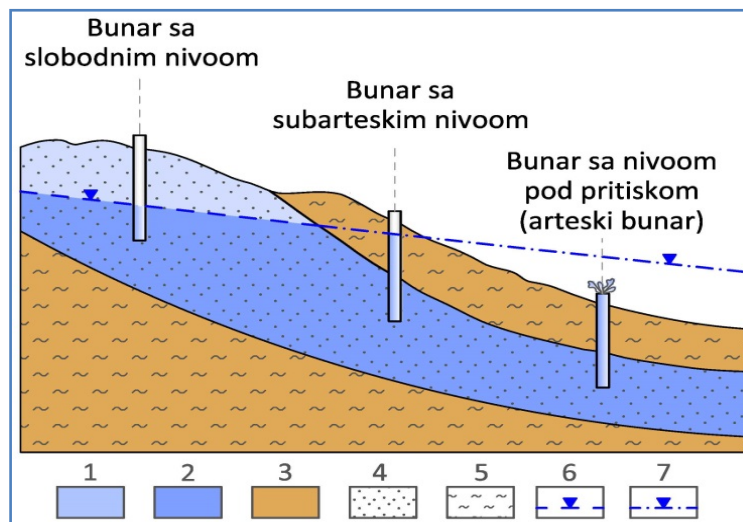
## 10.1. KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU HIDRODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA NIVOVA

Na osnovu hidrodinamičkih karakteristika nivoa izdani se dele na:

- izdani sa slobodnim nivoom i
- izdani (sa nivoom) pod pritiskom

U domaćoj praksi, za izdani sa slobodnim nivoom, koristi se i termin *freatske izdani*, dok se izdani pod pritiskom nazivaju *arteskim ili sapetim izdanima*.

Suštinska razlika između ova dva tipa je u tome što gornju granicu izdani sa slobodnim nivoom čini zona aeracije, dok je kod arteskog izdani to (relativno) vodonepropusna stena, odnosno, vodonepropusna povlata (slika 9.2.1). Posmatrano na širem prostoru, jedna izdan može da ima promenljiv hidrodinamički karakter, tako što će u jednom delu imati slobodan, a u drugom nivo pod pritiskom, odnosno (sub)arteski nivo (slika 10.1.1). Kod izdani sa subarteskim nivoom (ili subarteskog izdani), nivo PV je iznad gornje granice izdani, ali ne dopire do površine terena. Kod (pravih) arteskog izdani, nivo PV izbija iznad površine terena.



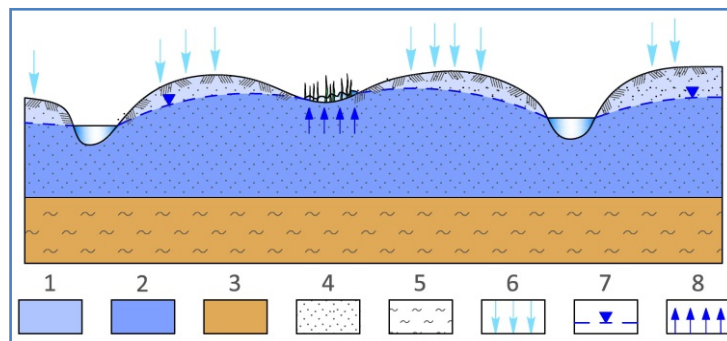
**Slika 10.1.1. Šema vodonosne sredine sa slobodnim nivoom u jednom i nivoom pod pritiskom u drugom delu [24, 20]:** 1– nadizdanska zona; 2– izdan; 3– vodonepropusna stena; 4– pesak; 5– glina; 6– slobodni nivo PV; 7– nivo PV pod pritiskom



### 10.1.1. Izdani sa slobodnim nivoom

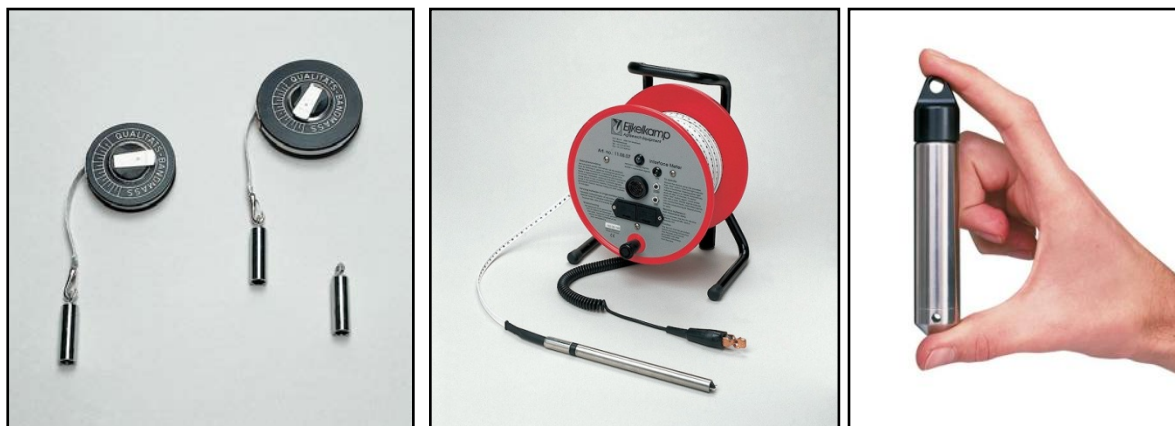
Izdani sa slobodnim nivoom čine zona zasićenja (izdan, u užem smislu) i zona aeracije (nadizdanska zona). Gornju granicu izdani čini površina terena, a donju vodonepropusna podloga. U pojedinim delovima terena ove izdani mogu imati i lokalni pritisak uslovljen litofacijalnim promenama stenske mase, ali se, generalno, definišu kao izdani sa slobodnim nivoom. Hranjenje izdani vrši se na račun infiltracije voda nastalih od atmosferskih taloga, površinskih voda, kao i na račun isticanja iz dubljih vodonosnih sredina. Njihova relativno mala dubina zaleganja i povezanost sa površinom tla i atmosferom, dovode do toga da su nivo i kvalitet PV podložni kolebanjima. Dostupne su za korišćenje, ali su podložne zagađivanju.

*Slobodni nivo izdani* je površina koja čini gornju granicu zone zasićenja, koja se izdiže ili spušta u zavisnosti od doticaja ili oticaja vode iz izdani. Posmatrano na širem području, to je najčešće blago zatalasana površina, saglasna reljefu terena (slika 10.1.1.1).



**Slika 10.1.1.1. Odnos reljefa terena i slobodnog nivoa izdani [38, 20]:** 1 – nadizdanska zona; 2 – izdanska zona; 3 – vodonepropusna podloga; 4 – pesak; 5 – glina; 5 – padavine; 6 – nivo PV; 7 – difuzno isticanje PV na površinu terena

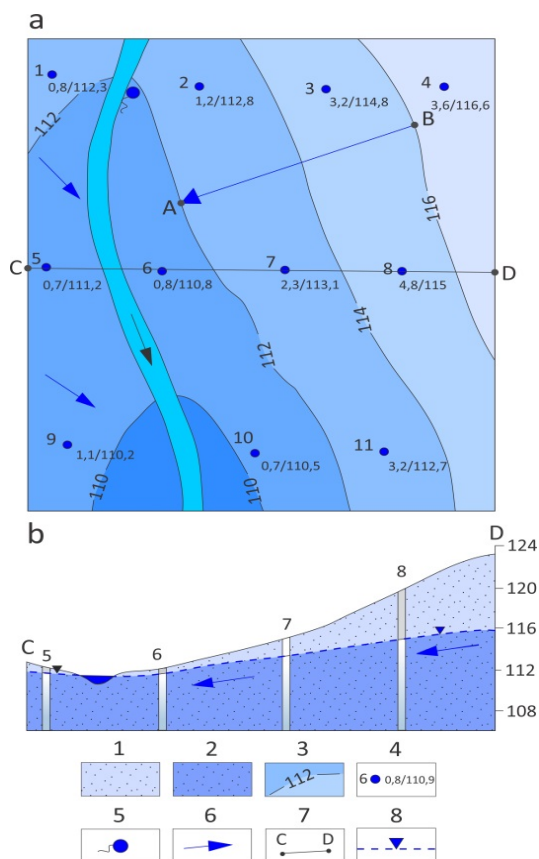
Dubina (do) nivoa PV u bunarima, osmatračkim bušotinama (pijezometrima), oknima i sl. objektima, meri se pomoću odgovarajućih instrumenata (slika 10.1.1.2): *bučkala*, *električnih nivomera sa graduisanom mernom pantljikom*, *data-logera (dajvera)* i sl.



**Slika 10.1.1.2. Levo: Bučkala; Sredina: Električni nivomer; Desno: Data-loger**

*Bučkala* se koriste za merenje nivoa PV na relativno malim dubinama, tako što sonda, karakterističnog (šupljeg) oblika, u dodiru sa nivoom PV, proizvodi karakterističan zvuk pištanja. Kod *električnih nivomera* (za merenje nivoa PV na većim dubinama), sonda, u dodiru sa vodom, "zatvara" električno kolo (PV je elektrolit), što proizvodi svetlosni i(li) zvučni signal. *Data-logeri* su sonde koje se ugrađuju u osmatrački objekat i, za razliku od prethodna dva načina merenja, služe za *kontinualno praćenje nivoa PV u jednom bunaru* (pijezometru), tokom dužeg vremenskog perioda, tako što, u zadatim vremenskim intervalima, registruje nivoe PV u sopstvenoj memoriji, odakle se podaci prenose u računar korisnika. *Data-logeri* su često multi-senzorski uređaji, koji, pored nivoa PV, registruju i temperaturu i elektroprovodljivost PV.

Podaci punktualnih merenja nivoa PV na jednom području se interpretiraju i prikazuju u formi karte *hidrozohipsi* i *hidrogeoloških profila* (slika 10.1.1.3). *Hidrozohipse* su linije koje spajaju sve tačke istih apsolutnih visina (kota) na slobodnoj površini izdanskih voda. S obzirom na podložnost kolebanju nivoa izdani, karta hidrozohipsi odražava samo trenutna/sezonska (u trenutku merenja) stanja nivoa. Radi objektivnog sagledavanja sezonskih kolebanja nivoa PV, merenja treba sprovesti u nekoliko navrata u toku godine.



**Slika 10.1.1.3. Karta hidrozohipsi - a i hidrogeološki profil terena – b [37, 20 – delimično izmenjeno]:**  
 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– hidrozohipse; 4– piježometar (sa leve strane je redni broj piježometra, a sa desne: u brojiocu dubina do nivoa izdani, a u imeniocu apsolutna kota nivoa izdani);  
 5– izvor; 6– smer kretanjaPV; 7– trasa hidrogeološkog profila; 8– nivo izdani na profilu

Na osnovu karte hidroizohipsi mogu se odrediti:

- pravac i smer kretanja izdanskih voda,
- hidraulički gradijent nivoa PV,
- dubina do nivoa PV na konkretnom punktu (npr. za potrebe izrade bunara)
- postojanje veze PV i površinskih voda.

*Pravac kretanja izdanskih voda* upravan je na hidroizohipse, a *smer* je od hidroizohipsi sa višim apsolutnim visinama, ka nižim. *Hidraulički gradijent (I)* dobija se iz odnosa:

$$I = \frac{H_B - H_A}{L_{B-A}} \quad (10.1.1.1)$$

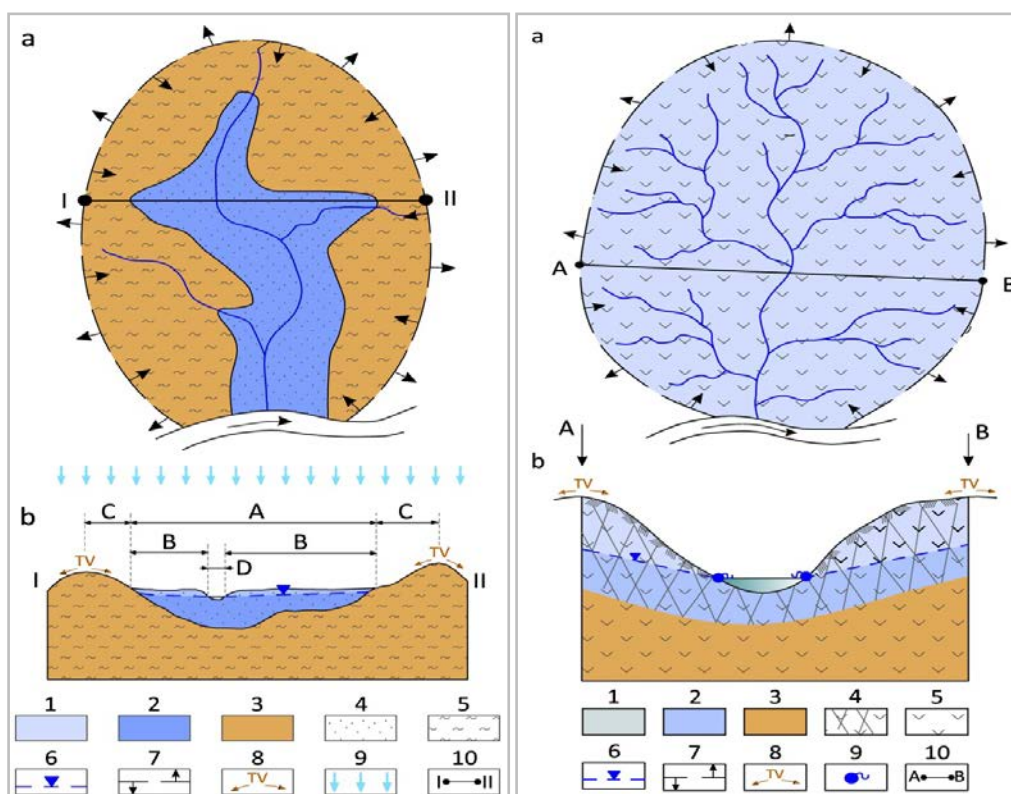
gde su:  $H_A$ ,  $H_B$  - kote nivoa PV (m) u tačkama A i B (slika 10.1.1.3.a);  $L_{B-A}$  - horizontalno rastojanje između tačkama A i B (m).

Ukoliko su hidroizohipse gušće, utoliko je nagib nivoa (hidraulički gradijent) veći i obrnuto.

**Elementi izdani sa slobodnim nivoom su [20]:**

- *oblast rasprostranjenja izdani,*
- *izdanska i nadizdanska zona,*
- *oblast hranjenja izdani*
- *sabirna oblast i*
- *zona isticanja/dreniranja izdani.*

***Oblast rasprostranjenja izdani*** je deo terena na kome je formirana izdan. Uslovljena je rasprostranjenjem geološke sredine u kojoj je izdan formirana (slika 10.1.1.4-levo). U sebe uključuje i zonu hranjenja i zonu dreniranja. Ponekad se poklapa sa slivom površinskog vodotoka (slika 10.1.1.4-desno).

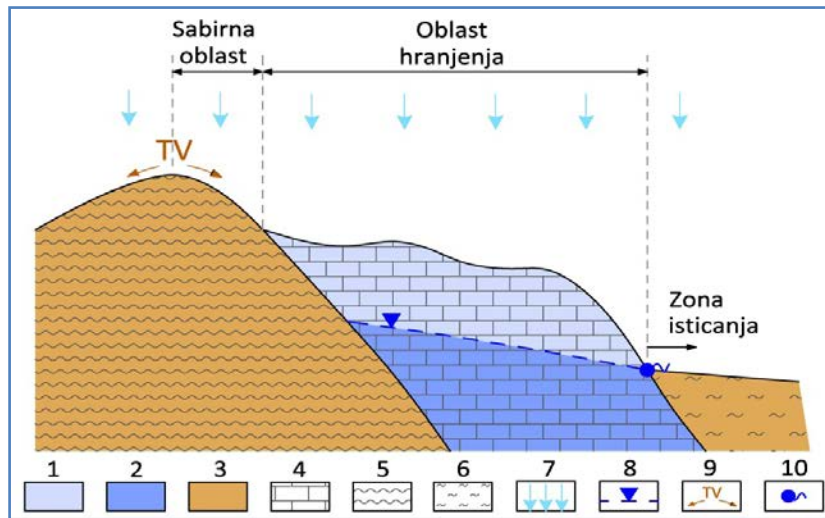


**Slika 10.1.1.4.** *Levo: Šema oblasti rasprostranjenja izdani u okviru aluvijalnog nanosa u (a) planu i (b) profilu [59, 20 – delimično izmenjeno]: A – oblast rasprostranjenja; B – oblast hranjenja; C – sabirna oblast; D – zona dreniranja izdani (u rečni tok); 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3- vodonepropusna sredina; 4– pesak; 5 – glina; 6 – nivo PV; 7 i 8 – granica slivnog područja (topografska vododelnica); 9 – padavine; 10– trasa profila; Desno: Šema oblasti rasprostranjenja izdani u okviru ispucalih stena u (a) planu i (b) profilu [20]: 1 – nadizdanska zona; 2 – izdanska zona; 3 – vodonepropusna sredina; 4–ispucale vulkanske stene; 5 – kompaktne vulkanske stene; 6– nivo izdani; 7 i 8 – granica slivnog područja (topografska vododelnica); 9– izvor; 10– trasa profila*

O osnovnim karakteristikama **izdanske i nadizdanske zone** već je bilo reči. *Donju granicu* izdanske zone čini vodonepropusna podina (vodonepropusne stene), koja, po litološkom sastavu, može da bude i identična stenama u kojima je formirana izdan: npr. masivne ili slabo ispucale/karstifikovane stene (slika 10.1.1.4 - desno). Može da bude i jasno izdvojena i (sub)horizontalna, što je čest slučaj kod izdani formiranih, npr., u okviru aluvijalnih nanosa (slika 10.1.1.4-levo), ili nepravilna, što je slučaj kod stena sa pukotinskom i kavernožnom poroznošću. *Debljinu izdanske zone* čini vertikalno rastojanje između nivoa izdani i vodonepropusne podloge. Promenljiva je u prostoru, u skladu sa uticajem geoloških, geomorfoloških i hidroloških faktora. Debljina izdanske zone, u jednoj istoj tački, tokom godine varira, u skladu sa sezonskim režimima padavina i evapotranspiracije. I *debljina nadizdanske zone* određena je uticajem pomenutih faktora. Kod izdani u aluvijalnim nanosima, uglavnom doseže do nekoliko metara (ispod površine terena), dok je u karstnim izdanima brdsko-planinskih regiona njena debljina reda veličine desetina do stotina metara.

**Oblast hranjenja izdani** čini deo terena na kome su vodopropusne stene nadizdanske zone otkrivene na površini terena, dok **sabirnu oblast** čine vodonepropusni delovi terena sa kojih, u oblast hranjenja, površinski dotiče voda (slike 10.1.1.4 i 10.1.1.5). Sabirna oblast se najčešće

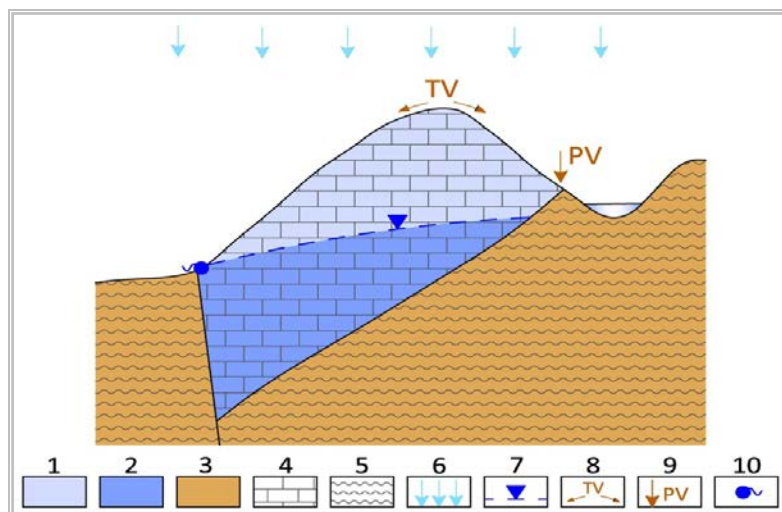
podudara sa topografskom vododelnicom (razvođem), ali su odstupanja (nepodudaranje topografske i podzemne vododelnice) moguća kod izdani u karstnim terenima (slika 10.1.1.6).



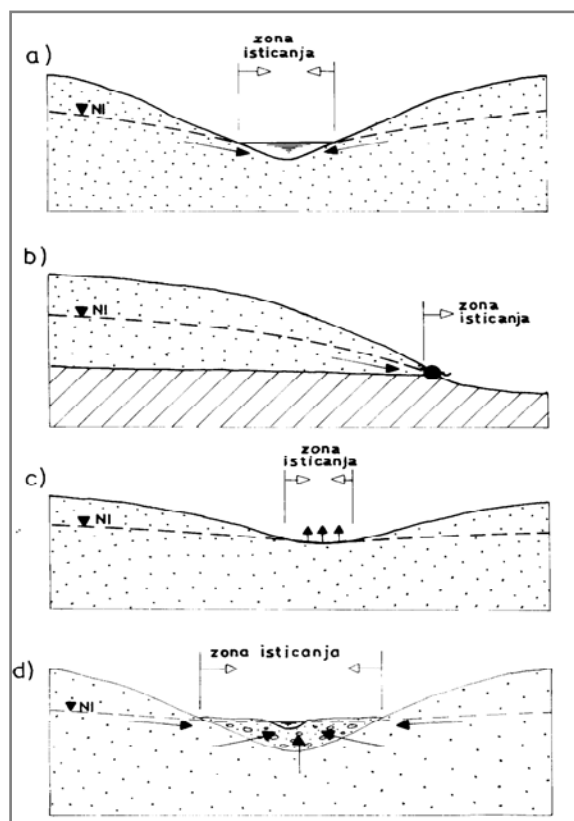
**Slika 10.1.1.5. Sabirna oblast i oblast hranjenja izdani u karstifikovanim krečnjacima [20]**

1– nadzidanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4– karstifikovani krečnjak;  
5– kristalaste stene; 6– glinoviti sedimenti; 7– nivo izdani; 8– topografska vododelnica; 9– padavine;  
10– izvor

**Zona isticanja (dreniranja) izdani** je deo terena u kome se izdan prirodno drenira (PV prirodno ističu). Isticanje može da bude: 1-otkriveno: izvori, pištevine ili 2-skriveno: direktno u rečne tokove, jezera, mora ili druge (susedne) izdani (slika 10.1.1.7).



**Slika 10.1.1.6. Nesaglasnost topografske i podzemne vododelnice [20]:** 1– nadzidanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4–karstifikovani krečnjaci; 5– čvrste kompaktne stene; 6–padavine 7–nivo izdani; 8–topografska vododelnica; 9 – podzemna (hidrogeološka) vododelnica; 10– izvor



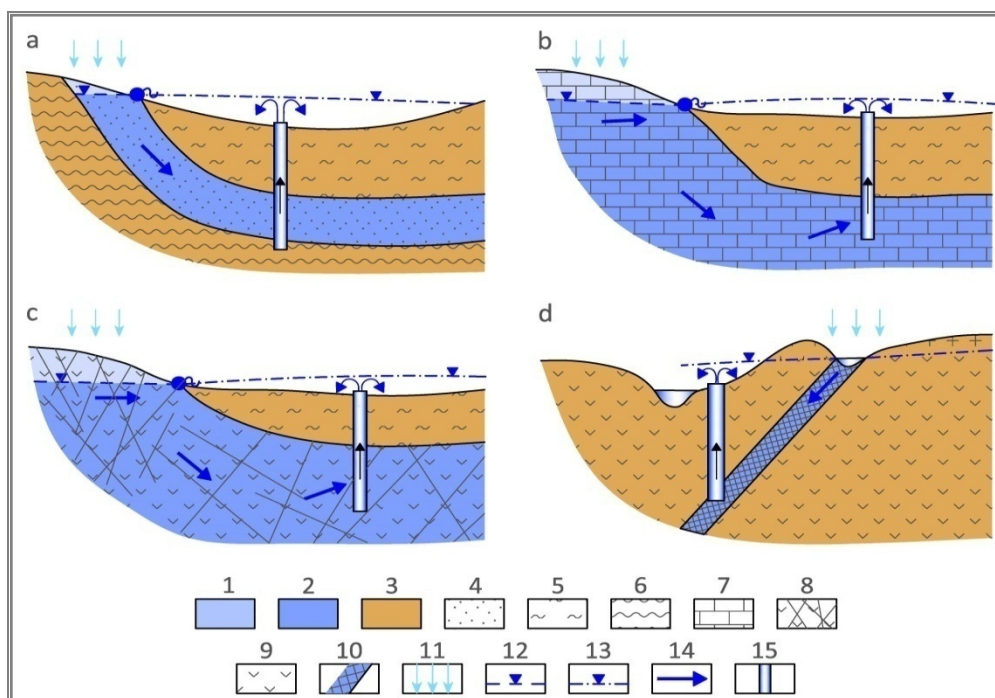
**Slika 10.1.1.7. Šeme dreniranja izdani [17]: a) - direktno u rečne tokove; b) - preko izvora; c)– difuzno, u vidu pištevina; d)– u druge izdani**

### 10.1.2. Izdani sa nivoom pod pritiskom

U njihovoj neposrednoj povlati su (relativno) vodonepropusne stene. PV je pod pritiskom višim od atmosferskog, tako da se, pri "otkrivanju" izdani bušenjem, (sub)artezni nivo PV izdiže iznad nivoa vodonepropusne povlate.

Pored do sada pomenutih, još neka od **bitnih svojstava izdani pod pritiskom su:**

- *Oblast hranjenja i oblast rasprostranjenja se ne poklapaju i često su znatno udaljene jedna od druge.*
- *Formirane su u sredinama svih strukturnih tipova poroznosti (slika 10.1.2.1), a predispozicija za njihovo formiranje je određena geološko-tektonska forma terena: sedimentacioni (artezni) baseni, rasedne zone, sinklinale, monoklinale, fleksure.*
- *Režim nivoa i kvaliteta PV znatno je stabilniji u odnosu na izdani sa slobodnim nivoom. Manje su podložne i zagađivanju sa površine terena, s obzirom na postojanje vodonepropusne povlate.*



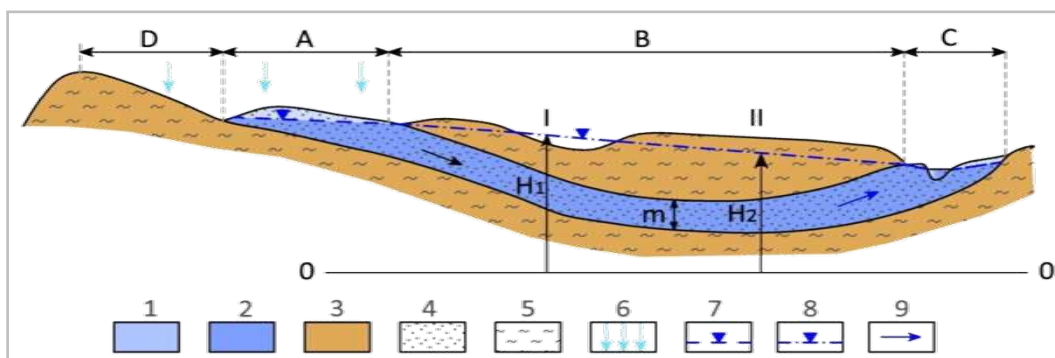
**Slika 10.1.2.1. Šeme arteskkih izdani u vodonosnim sredinama različitih struktura poroznosti [20 – delimično izmenjeno]:** a – međuzrnska; b – karstna; c – pukotinska i d – pukotinska u okviru rasedne zone; 1 – nadizdanska zona; 2 – izdanska zona; 3 – vodonepropusna sredina; 4 – pesak; 5 – glina; 6 – čvrste kompaktne stene; 7 – karstifikovani krečnjak; 8 – ispucale magmatske stene; 9 – kompaktne magmatske stene; 10 – rasedna zona; 11 – padavine; 12 – slobodni nivo izdani; 13 – nivo izdani pod pritiskom; 14 – smer kretanja podzemnih voda; 15 – artenska bušotina

**Faktori koji dovode do formiranja (sub)arteskog pritiska PV su:** *hidrostatički pritisci, geostatičko opterećenje, kojim na izdan deluje stenska masa u povlati, izmena poroznosti stena (kao rezultat formiranja novih minerala), prisustvo gasova u izdani (koji su poreklom iz rasednih zona ili zona sa magmatskom aktivnošću) i dr.*

Nivo izdani pod pritiskom, odnosno, visina do koje se nivo PV voda izdigne u bušotini, prilikom “otkrivanja” izdani, naziva se **pijezometarski nivo**. Zamišljena površina, koja povezuje punktuелno izmerene pritiske u izdani, naziva se **pijezometarska površina**. Predstavlja se **izopijestama** - linijama koje spajaju sve tačke sa istim veličinama pritisaka.

**Elementi izdani pod pritiskom su (slika10.1.2.2):**

- izdanska zona
- oblast hranjenja
- sabirna oblast
- oblast rasprostranjenja pritisaka
- oblast dreniranja izdani

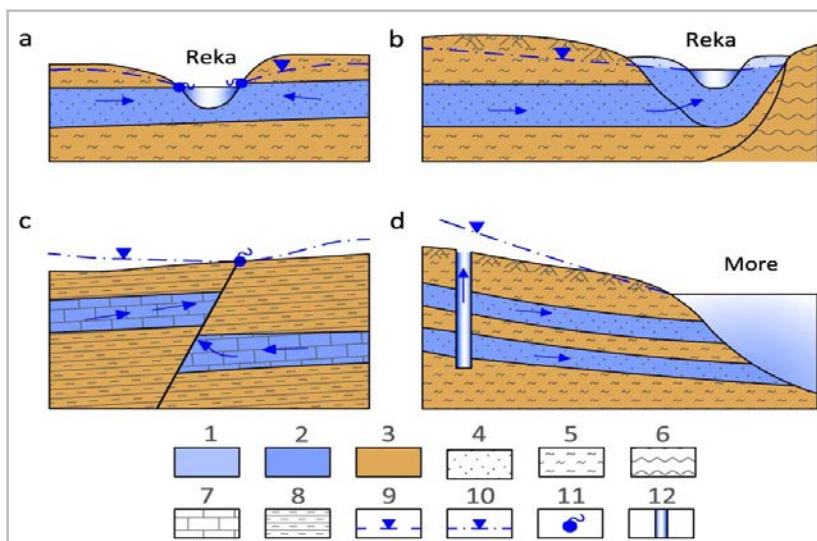


**Slika 10.1.2.2. Šema elemenata izdani pod pritiskom** [38, 20]: A- oblast hranjenja; B- oblast rasprostranjenja pritiska; C- zona dreniranja (u rečni tok); D- sabirna oblast; H1, H2 –pijezometarski nivoi u presecima I i II; m- debljina izdani; 1- nadizdanska zona u delu sa slobodnim nivoom; 2- izdanska zona; 3- vodonepropusna sredina; 4- pesak; 5- glina; 6- padavine; 7- slobodni nivo izdani; 8- nivo izdani pod pritiskom (pijezometarski nivo); 9- pravac kretanja PV

**Izdanska zona** je ograničena vodonepropusnom povlatom i podinom, koje čine gornju i donju granicu izdani. *Debljina izdanske zone (m)* je vertikalno rastojanje između podine i povlate.

**Oblast hranjenja** je deo terena na kome su vodonosne stene (u okviru kojih je formirana izdan) otkrivene na površini terena i u koji se infiltriraju površinske i vode od atmosferskih padavina. **Sabirnu oblast** čine vodonepropusni delovi terena sa kojih, u oblast hranjenja, površinski dotiče voda. **Oblast rasprostranjenja pritiska** obuhvata deo terena između oblasti hranjenja i oblasti dreniranja, a karakteriše se pritiscima/nivoima PV iznad povlate vodonosne sredine.

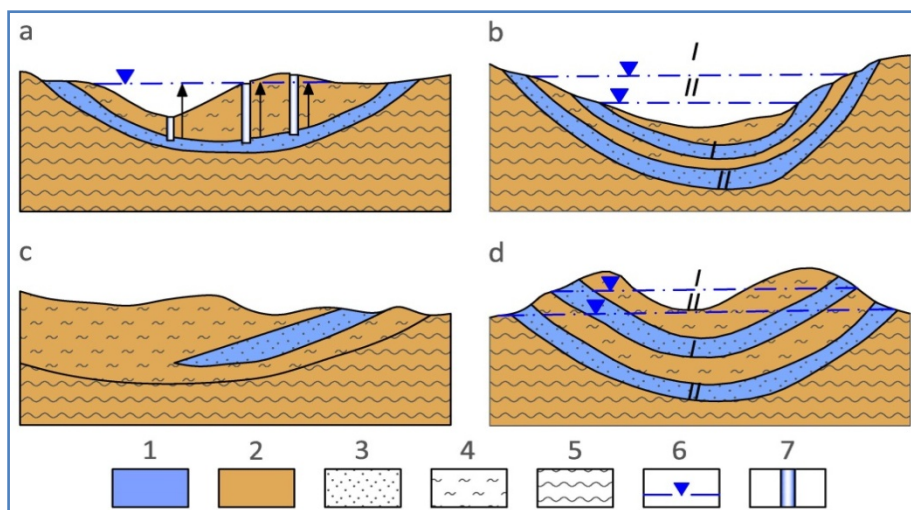
**Zona dreniranja** obuhvata delove terena u kojima se vrši otkriveno ili skriveno dreniranje PV, koji su hipsometrijski niži u odnosu na oblast hranjenja (slika 10.1.2.3).



**Slika 8.1.2.7 Šeme otkrivenog i skrivenog prirodnog dreniranja izdani pod pritiskom** [38, 20– delimično izmenjeno]: a- preko izvora; b- u aluvijalne nanose; c- duž raseda; d- submarinsko; 1- nadizdanska zona; 2- izdanska zona; 3- vodonepropusna sredina; 4- pesak; 5- glina; 6- čvrste kompaktne stene; 7- karstifikovani krečnjaci; 8- laporac; 9- slobodni nivo izdani; 10- nivo izdani pod pritiskom; 11- artesiani izvor; 12- bušotina sa nivoom pod pritiskom



**Arteski (hidrogeološki) baseni su** (hidro)geološke strukture sinklinalnog tipa, koje u sebi sadrže jedan ili više vodonosnih slojeva/horizontata, međusobno razdvojenih slojevima vodonepropusnih stena. Svojevrsne su im *hidrodinamička, hidrohemijska i temperaturna zonalnost, po vertikalnom profilu*, o kojima će više reći biti u narednim poglavljima.



**Slika 8.1.2.9. Šematski prikaz različitih tipova arteskkih basena** [53, 20]: **a** - sa jednim vodonosnim horizontom; **b** - sa dva vodonosna horizonta, u normalnom reljefu; **c** - sa vodonosnim horizontom u vidu monoklinale; **d** - sa dva vodonosna horizonta, u inverznom reljefu; 1- izdan; 2- vodonepropusne stene; 3- pesak; 4- glina; 5- čvrste kompaktne stene; 6- pijezometarski nivo; 7- (sub)arteske bušotine

\* \* \*

#### Kontrolna pitanja:

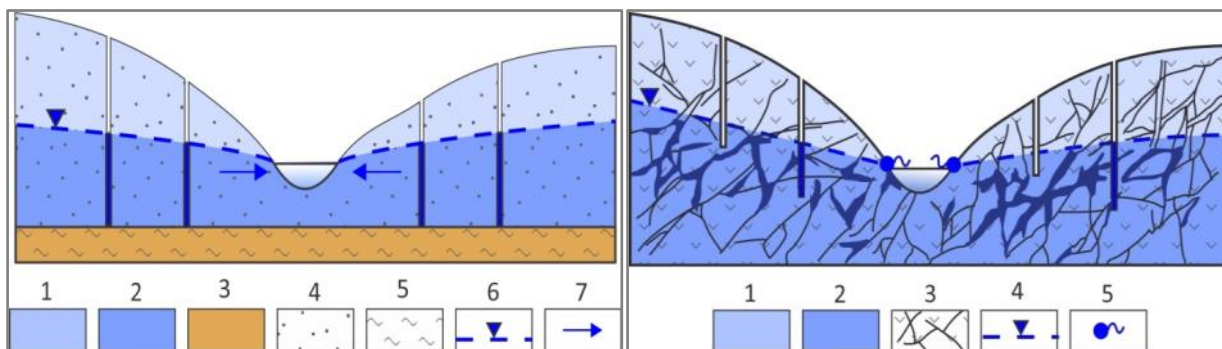
- 1/ Koje dve hidrofizičke zone razlikujemo u podzemnom delu hidrosfere ?
- 2/ Šta su lebdeće ili lažne izdani ?
- 3/ Šta čini donju granicu zone zasićenja PV ?
- 4/ Šta je izdan ?
- 5/ Koje su dve osnovne klasifikacije izdani ?
- 6/ Kako se dele izdani na osnovu hidrodinamičkih karakteristika nivoa ?
- 7/ Šta su hidroizohipse ?
- 8/ Navesti elemente izdani sa slobodnim nivoom.
- 9/ Prirodno isticanje (dreniranje) izdani može da bude...?
- 10/ U kojim terenima je moguća nesaglasnost topografskog i podzemnog (hidrogeološkog) razvođa ?
- 11/ Šta čini povlatu (sub)arteskkih izdani ? Kako to utiče na njihov režim i podložnost zagađenju ?
- 12/ U kojim geološko-tektonskim formama terena mogu da se formiraju izdani pod pritiskom ?

VIDEO  
**IZDANI (2)**

## 10.2. KLASIFIKACIJA IZDANI NA OSNOVU STRUKTURNOG TIPRA POROZNOSTI

Zavisno od strukture poroznosti stena u kojima su formirane, izdani se dele na (slika 10.2.1):

- **Zbijene** (ili *kontinualne*), formirane u okviru rastresitih stena sa međuzrnskom poroznošću (pesak, šljunak). Ovaj tip poroznosti (medjusobna povezanost pora) obezbedjuje da nivo PV može da se registruje (kontinualno) u svakoj tački rasprostranjenja izdani i predstavlja kontinualnu površinu.
- **Razbijene** (ili *diskontinualne*), formirane u okviru stena sa pukotinskom ili kavernoiznom poroznošću, što uslovljava akumuliranje PV samo u otvorenim pukotinama ili kavernama, a nivo izdani se ne može registrovati u svakoj tački njenog rasprostranjenja. U okviru razbijenih izdani razlikujemo: **pukotinske i karstne izdani**.



**Slika 10.2.1. Levo: Šematski profil zbijene izdani–nivo PV je registrovan u svim bušotinama: 1-nadizdanska zona; 2-izdanska zona; 3-vodonepropusna podina; 4-pesak; 5-glina; 6-nivo izdani; 7-smer kretanja PV; Desno: Šematski profil razbijene pukotinske izdani - nivo PV nije registrovan u svim bušotinama [20- delimično izmenjeno]: 1-nadizdanska zona; 2-izdanska zona; 3-ispucale magmatske stene; 4-nivo izdani; 5-izvor**

Postoje i *složene izdani*, koje predstavljaju kombinaciju navedenih osnovnih tipova. Najčešće su karstno-pukotinske, kod manje karstifikovanih karbonatnih stena i zbijeno-pukotinske, u zoni raspadanja čvrstih stena.

### 10.2.1. Zbijene izdani

Stene sa međuzrnskom poroznošću su, uglavnom, mlađe sedimentne stene, kvartarne ili neogene starosti. Zbijene izdani mogu da budu formirane u različitim stenama, u pogledu geneze i karakteristika sedimentacione sredine: *eluvijumu, deluvijumu, proluvijumu, eolskim sedimentima, različitim tipovima fluvijalnih (rečnih) sedimentata, sedimentima delti, glacijalnim, močvarnim, jezerskim i marinskim sedimentima*, što uslovljava njihove međusobne razlike po pitanju rasprostranjenja, debljine, hidrodinamičkih svojstava, vodopropusnosti, prihranjivanja i dreniranja, rezervi i kvaliteta PV.

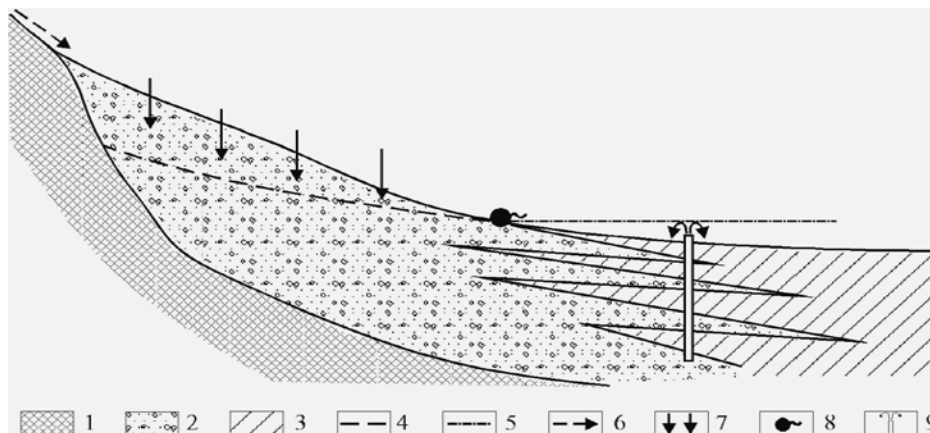
**Izdani u eluvijumu.** Eluvijum nastaje kao produkt raspadanja čvrstih stena. Nije klasiran po krupnoći, nezaobljenih je i neuslojen. Formira se na samom mestu raspadanja starijih/matičnih čvrstih stena, preko kojih i leži. Na horizontalnim površinama, eluvijumi mogu da imaju značajno

rasprostranjenje u planu, pa se nazivaju i “*kamena mora*”, u okviru kojih se formiraju izdani sa slobodnim nivoom. Zavisno od površine rasprostranjenja, debljine, geomorfoloških i klimatskih uslova, ove izdani mogu da sadrže i veće rezerve PV.

Na padinama, eluvijum se transportuje pod dejstvom gravitacije i deponuje u podnožjima padina, praveći *sipare*. U siparima se formiraju slabe izdani sa slobodnim nivoom, a u sušnim periodima, to su bezvodni (izdrenirani) delovi terena, s obzirom da se prihranjuju isključivo infiltracijom voda atmosferskih padavina. Sipari, ponekad, maskiraju izvore koji dreniraju karstnu ili pukotinsku izdan, formiranu u matičnoj steni.

**Izdani u deluvijumu.** Deluvijum je nanos u podnožju padina ili na stranama blažih padina, koji nastaje dejstvom povremenih/bujičnih tokova, nakon obilnih kiša ili topljenja snega. Odlikuje se neklasiranoćšu i nezaobljenoćšu materijala. Izdani su siromašne vodom, a u sušnim periodima, to su uglavnom bezvodni (izdrenirani) delovi terena.

**Izdani u proluvijumu.** Proluvijum je materijal nanet povremenim tokovima. Konusne forme proluvijalnog nanosa su *plavine*, a formiraju se na mestima gde (na uzdužnom profilu) velike nagibe padina smenjuju manji. U grubo-klastičnim nanosima plavina formiraju se izdani, koje se prihranjuju na račun infiltracije površinskih voda (koje teku preko njih) i atmosferskih taloga. Nivo PV uglavnom je slobodan. Na nižim kotama izdan se drenira preko izvora (slika 10.2.1.1).



**Slika 10.2.1.1. Šematski hidrogeološki profil kroz plavinu [17- delimično izmenjeno]:** 1– čvrsta stena; 2- šljunkovito-peskoviti nanos (plavina); 3- glina; 4- slobodni nivo PV; 5- pijeziometarski nivo; 6– smer kretanja površinskog toka; 7- infiltracija površinskih i atmosferskih voda; 8- izvor; 9– artenska bušotina

**Izdani u eolskim nanosima.** Raznovrsni akumulativni oblici/nanosi (peščani, prašinsti), nastali radom vetra, vezani su za pustinje, polupustinje i steppe, u oblastima sa aridnom (suvom) klimom. Izdani u eolskim naslagama imaju slobodan nivo PV, koji je, najčešće, na većim dubinama. Hranjenje se vrši na račun *infiltracije padavina*, a znatno manje na račun infiltracije površinskih vodotoka. *Podzemne vode pustinjskih regiona* uglavnom su sa *povišenom mineralizacijom*, što je posledica male količine padavina i visokih temperatura vazduha, odnosno, velikog isparavanja i usporenog hranjenja i kretanja PV.

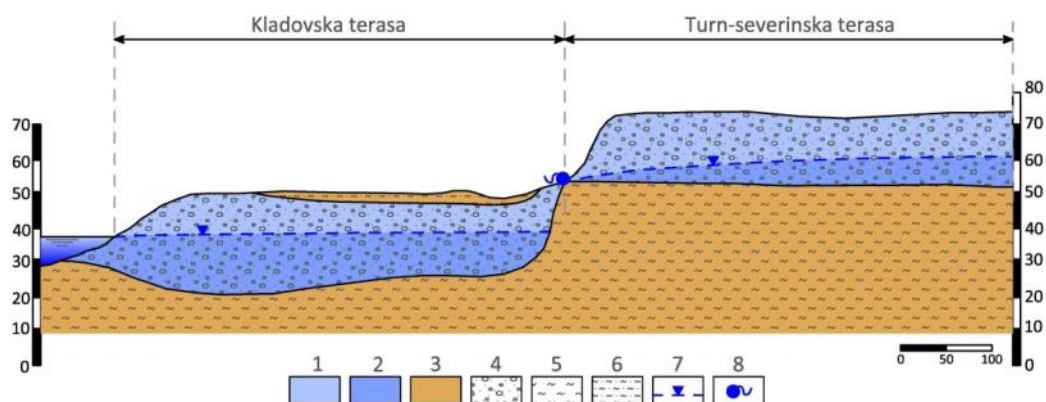
Poseban tip eolskih nanosa je *les*, koji nastaje *akumulacijom prašine* u relativno vlažnim oblastima, pod vegetacijom. Pored osnovne, međuzrnske poroznosti, za les je svojstvena i tzv. crevasta poroznost, nastala truljenjem biljaka. Izdani u lesnim naslagama su sa slobodnim nivoom, na relativno velikim dubinama i nisu od praktičnog značaja u pogledu rezervi PV.

**Izdani u rečnim sedimentima.** Akumulativni rečni/fluvijalni oblici nastaju sakupljanjem rečnog nanosa (šljunak, pesak, glina, drobina i dr.) na mestima gde slabi transportna moć rečnih tokova. U ove oblike spadaju: *aluvijalni nanosi (aluvijumi), rečne terase i rečna ostrva*.

*Izdani u aluvijalnim nanosima.* Aluvijalni nanosi prate konture rečnih tokova, u vidu relativno uzanih zona, čija širina može da varira od nekoliko metara do nekoliko kilometara, a debljina dostiže i do 100m, zavisno od karakteristika vodotoka. Nanos je heterogenog granulometrijskog sastva u planu i profilu i klasiran je po krupnoći. Aluvijumi planinskih oblasti razlikuju se od ravničarskih. Kod planinskih, prevlađuju grubozrne, šljunkovite i šljunkovito-peskovite naslage. Za ravničarske je svojstvena dvoslojevita građa: *donji (bazni) horizont je facija korita*, koju čine obluci, šljunkovi i peskovi dobrih filtracionih karaktersitika, dok *gornji (povlatni) horizont čini facija povodnja* (plavljenja), koju izgrađuju peskovita i šljunkovita glina, pesak i prašina.

Za planinske aluvijalne izdani svojstven je slobodni nivo PV, dok u ravničarskim terenima, usled višeslojne građe aluvijuma, nivo može da bude sa slabim pritiskom. Nivoi su relativno blizu površine terena, s obzirom da se ostvaruje dobra hidraulička veza sa rekom. Izuzetak čine aluvijalne izdani u aridnim (polu)pustinjskim regionima, gde nivo PV može da bude i na nekoliko desetina metara dubine. Načelno, u hranjenju ovih izdani učestvuju: vode površinskih tokova, atmosferske padavine, kao i PV susednih izdani. U aluvijalnim izdanima, posebno ravničarskim, mogu da se formiraju značajne rezerve PV, ali ih plitko zaleganje PV i dobra hidraulička veza sa površinskim tokom, čini podložnim zagađenjima.

*Izdani u rečnim terasama.* Rečne terase su nekadašnje aluvijalnih ravni, koje su “ostale” hipsometrijski više u odnosu na savremeni rečni tok, zbog njegovog usecanja u tlo. Javljaju se na dolinskim stranama većine reka, često po nekoliko njih, međusobno odvojenih strmim pregibima/otsecima (slika 10.2.1.2). Izgrađene su od peskovito-šljunkovitih naslaga.



**Slika 10.2.1.2. Šematski hidrogeološki profil kroz Dunavske terase u okolini Kladova [20]:**  
 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3 – vodonepropusna sredina; 4– peskovito-šljunkoviti sedimenti (facija korita); 5– glinoviti sedimenti; 6– muljeviti sedimenti (facija povodnja); 7– slobodni nivo izdani; 8– izvor

Izdani u terasama prihranjuju se na račun voda atmosferskih taloga i voda koje se slivaju sa okolnih padina. Zbog hipsometrijskog položaja u odnosu na rečni tok, hidraulička veza reka-izdan izostaje, što za posledicu ima relativno male rezerve PV. Dreniranje izdani je preko izvora, ili skriveno, u hipsometrijski niže terase ili aluvijum.

Izdani u rečnim ostrvima. Rečna ostrva ili ade nastaju u donjim tokovima velikih reka, na mestima smanjene energija vodenog toka, usled čega se rečni nanos taloži u vidu podvodnog spruda. Tako formiran sprud usporava oticaj vode i uslovljava taloženje novog materijala, sve dok se ne izdigne iznad nivoa reke, u vidu ostrva. *Karakteristike izdani u rečnim ostrvima praktično su identične onima u ravničarskim aluvijalnim izdanima*, s tim što su uslovi prihranjivanja još povoljniji, s obzirom da su sa svih strana okružene površinskim tokom.

**Izdani u deltama.** Delte su prostrane i, u pogledu faktora formiranja, izuzetno kompleksne sedimentacione sredine, koje su *pod uticajem: rečnog toka, vetra, morskih talasa, plime i oseke*. Ime su dobile po karakterističnom obliku (u vidu grčkog slova "delta":  $\Delta$ ) ušća reke Nil u Sredozemno more. Sastav sedimenata varira, od krupnozrnih do sitnozrnih klastita, uz učešće organogenog materijala. Izdani mogu da budu sa slobodnim ili nivoom pod pritiskom, a mineralizacija i hemijski sastav PV variraju u skladu sa uslovima sredine: u blizini mora, PV su hloridno-natrijumske, sa povišenom mineralizacijom, dok, sa udaljavanjem od mora, mineralizacija opada.

**Izdani u glacijalnim sedimentima.** Glacijalni sedimenti nastaju radom lednika (glečera) koji mehanički drobe stenu po kojoj "klize" i transportuju zdrobljeni materijal. Čestice su nesortirane i često nezaobljene - od krupnih blokova do glinovitih frakcija. Na osnovu geneze, razlikuju se: *morene, fluvio-glacijalni i limničko(jezersko)-glacijalni sedimenti*.

Fluvio- i limno-glacijalni sedimenti, pretežno šljunkovito-peskovitog sastava, pogodni su za formiranje (zbijenih) izdani, sa slobodnim ili nivoom pod pritiskom. PV su uglavnom malo-mineralizovane i dobrog kvaliteta za piće.

**Izdani u močvarnim sedimentima.** Sedimenti močvara stvarani su u uslovima plitke stajaće vode i bujne vegetacije i čine ih, uglavnom, prašina i mulj, sa ostacima vegetacije. Izdani su, uglavnom, sa slobodnim nivoom, a za PV su svojstvene niske pH-vrednosti i povišeni sadržaji gvožđa i organskih materija, koje im daju neprijatan miris i ukus. Nemaju praktičan značaj, zbog slabe vodopropusnosti i lošeg kvaliteta PV.

**Izdani u jezerskim sedimentima.** Jezerski/limnički sedimenti mogu biti klastični, hemijski i organogeni. Zbijene izdani sa slobodnim nivoom se formiraju u (klastičnim) šljunkovito-peskovitim sedimentima, u priobalnim zonama i slične su aluvijalnim izdanima.

*Kako je već rečeno, u okviru nekadašnjih jezerskih basena, a današnjih arteskkih basena, formirani su debeli sedimentni kompleksi, u okviru kojih se mogu izdvojiti jedan ili više peskovitih ili šljunkovitih vodonosnih slojeva pod pritiskom.*

**Izdani u marinskim rastresitim sedimentima.** Slično jezerskim, i u okviru nekadašnjih marinskih (morskih) basena formirani su debeli sedimentni kompleksi sa peskovito-šljunkovitim vodonosnim slojevima, sa malomineralizovanim ili slanim (hloridno-natrijumskim) PV.

*Savremeni oblici marinske sedimentacije su: šljunkovito-peskovite plaže, priobalni sprudovi, prevlake i peščana ostrva. Vodopropusnost im je dobra, što omogućava formiranje izdani, ali su PV (zbog uticaja mora) često sa povišenom mineralizacijom (bočatne), pa su, uglavnom, neupotrebljive ili ograničeno upotrebljive za vodosnabdevanje.*

### 10.2.2. Pukotinske izdani

Pukotinske (razbijene) izdani su formirane u čvrstim (magnatskim, metamorfnim, sedimentnim) stenama sa pukotinskom poroznošću. U načelu, ispućalost i vodonosnost magnatskih (posebno mlađih vulkanskih) stena, veće su u odnosu na sedimentne i metamorfne stene niskog stepena kristaliniteta. Na vodonosnost čvrstih stena utiču: petrološki sastav, stepen dijageneze i prisustvo glinovite i karbonatne komponente. Povećan sadržaj glinovite komponente čini stene elastičnijim i manje podložnim pucanju, pa time i manje vodopropusnim. Krute i ispućale stene, kakve su npr. konglomerati i breče (posebno kada sadrže i, u vodi rastvorljivu, karbonatnu komponentu), mogu da budu veoma vodonosne.

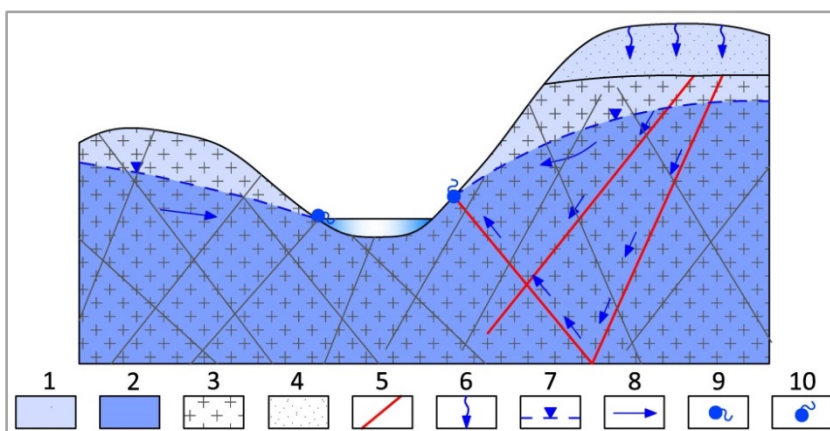
Ispućalost i vodopropusnost čvrstih stena menjaju se po celoj površini rasprostranjenja stenskog masiva, tako da, na relativno malim rastojanjima, mogu da se nađu i izrazito vodonosni i praktično bezvodni delovi (slika 10.2.1.-desno). Tokom filtracije, PV, u pukotinama, odlažu glinovite i druge mineralne čestice (kalcita, zeolita, kvarcita, pirita i dr.), što može da dovede do smanjenja poroznosti i vodopropusnosti stene.

Kod nekih čvrstih stena: lave, peščari i konglomerati, pored pukotinske, javljaju se i intergranularna ili šupljikava poroznost, tako da se u njima formiraju složene pukotinsko-zbijene izdani. Kod uslojenih sedimentnih stena, PV se kreću i kroz pukotine i po površima slojevitosti.

Pukotinske izdani mogu da budu sa slobodnim i nivoom pod pritiskom. Nivo pod pritiskom najčešće je uslovljen hidrostatičkim pritiscima PV u presecajućim pukotinama (rasedima), a ovakav hidrodinamički karakter uslovljava uzlazno kretanje PV i pojavu tzv. "uzlaznih" izvora (slika 10.2.2.1). Gasovi iz dubljih delova litosfere ili vodena para u mladim vulkanskim oblastima, mogu da stvore visoke pritiske u izdani i tzv. "gas-lift" sistem uzlaznog kretanja PV.

U načelu, u okviru pukotinske izdani jednog stenskog masiva, mogu da se izdvoje: **1-deo izdani iznad lokalnog erozionog bazisa; 2-deo izdani ispod lokalnog erozionog bazisa.**

**Deo iznad lokalnog erozionog bazisa** je formiran u plićim delovima masiva, sa preovlađujućim pukotinama fizičkog i hemijskog raspadanja. Zajedno sa zonom aeracije, debljina mu je reda veličine desetina metara, izuzetno i preko 100m. Nivo izdani je slobodan, a kretanje PV je silazno. Prihranivanje izdani je na račun infiltracije padavina i voda površinskih tokova, a dreniranje preko izvora slabih izdašnosti. Značajan uticaj hidro-meteorološkog faktora dovodi do vidnih sezonskih oscilacija nivoa PV i podložnosti zagađivanju sa površine terena. PV su, po pravilu, hladne i malomineralizovane.



**Slika 10.2.2.1. Šematski profil pukotinske izdan [20]:** 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– ispućali granit; 4–raspadnuti (grusirani) granit; 5– rased; 6– infiltracija padavina; 7– slobodni nivo izdani; 8–smer kretanja PV; 9– silazni izvor; 10– uzlazni izvor

**Deo ispod lokalnog erozionog bazisa** obuhvata PV koje su akumulirane u dubljim delovima terena, u okviru krupnijih tektonskih razlomnih zona. Vodonosne zone najčešće imaju izduženu formu: širina je od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, a dužina može da bude reda veličine desetina kilometara. Kretanje PV može da bude silazno i uzlazno. U zavisnosti od dubine zaleganja i drugih geoloških faktora, PV mogu da budu hladne i malomineralizovane ili sa povišenim temperaturama i(li) mineralizacijama.

### 10.2.3. Karstne izdani

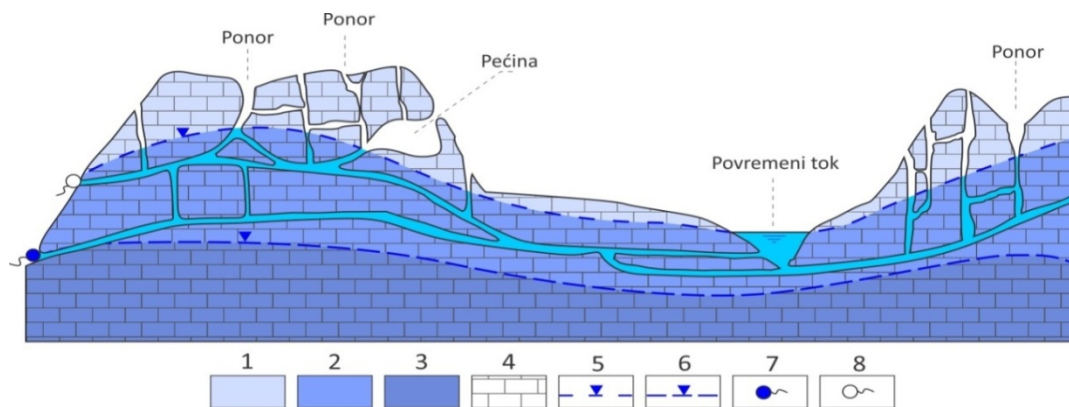
Formirane su u stenama sa kavernošnom (disolucionom) poroznošću. S obzirom da su, kako je ranije već istaknuto, karbonatni karstni tereni najrasprostranjeniji na Zemlji, u nastavku su izložene karakteristike izdani u okviru ovog tipa karstnih terena, u uslovima umerene klime.

U pogledu rasprostranjenja, kod karstnih izdani se mogu izdvojiti tri oblasti:

- *oblast rasprostranjenja*, koja može da se poklapa (otkriveni karst) ili ne poklapa (pokriveni karst) sa površinom razvića karsta,
- *oblast hranjenja*, koja odgovara površini na kojoj se odvija infiltracija atmosferskih i površinskih voda i
- *zona dreniranja*, koja može da bude hipsometrijski iznad ili ispod nivoa erozionog bazisa (npr. jezera, mora), odnosno, dreniranje izdani može da bude i podvodno.

Velike dimenzije karstnih kanala, njihova međusobna povezanost, veliki gradijenti pada podzemnih tokova i velika vodopropusnost površinskih zona karsta, imaju za posledicu vrlo brzo punjenje, ali i brzo pražnjenje/dreniranje izdani, odnosno izuzetno dinamičan režim i velike amplitude kolebanja nivoa PV (slika 10.2.3.1).





**Slika 10.2.3.1. Šematski profil karstne izdani** [20]: 1– nadizdanska zona; 2– zona kolebanja nivoa izdani; 3 – izdanska zona za vreme minimalnih nivoa PV; 4– karstifikovani krečnjaci; 5– maksimalni nivo izdani; 6– minimalni nivo izdani; 7– stalni izvor; 8– povremeni izvor

Uslovi hranjenja karstne izdani su, u načelu, daleko povoljniji nego kod drugih tipova izdani. Vrši se direktnom infiltracijom/poniranjem površinskih i atmosferskih voda, kroz ponore i proširene pukotine. Prihranjivanje je posebno obilno u prolećnom periodu, za vreme topljenja snega i izlučivanja obilnih padavina. U sušnom periodu, hranjenje karstnih izdani je veoma ograničeno, pa je i nivo PV je na velikim dubinama. Vode površinskih vodotoka (koji su najčešće povremeni) poniru (uviru) u koncentrične ponore ili ponorske zone. Ponori su najčešće formirani na dnu vrtača, a kod razvijenog holokarsta, na dnu uvala i(li) karstnih polja, kao najkrupnijih površinskih oblika karstne erozije. Linearni rasporedi vrtača i ponora ukazuju na pravce kretanja karstnih podzemnih tokova.

Dreniranje izdani najčešće je preko snažnih karstnih izvora (vrela), a u određenim uslovima i preko niza manjih izvora. Drenažni punktovi raspoređeni su najčešće duž trasa rečnih tokova i raseda, ili u zonama kontakta karsta sa vodonepropusnim stenama. Punktovi podvodnog (ispod nivoa erozionog bazisa) dreniranja karstne izdani zovu se *vrulje*.

Nivo izdani je diskontinualan i može da bude slobodan ili pod pritiskom. Nagnut je ka zoni isticanja. Pri intenzivnijem hranjenju karstne izdani, nivo se podiže, povećava se hidraulički gradijent podzemnog toka, ubrzava kretanje PV prema zoni dreniranja i povećava isticanje/izdašnost karstnih vrela. U ovakvim uslovima, zavisno od karakteristika karstnog reljefa, pojedine hidrogeološke pojave mogu da imaju dvostruku funkciju: u periodu niskih nivoa PV, funkcionišu kao ponori (preko kojih se izdan prihranjuje), a u periodu visokih nivoa, kao izvori (preko kojih se izdan drenira). Ovakve pojave zovu se *estavele*.

U dubljim delovima izdani, u zoni potpunog zasićenja PV, prevlađujući režim kretanja PV je laminaran, a u višim delovima (zona aeracije i sezonskog kolebanja nivoa PV), režim je često turbulentan.

Jasno se razlikuju dva godišnja perioda (sezone) sa različitim karakteristikama nivoa i zapremine PV karstne izdani. Tokom kišno/snežnog perioda, od oktobra do aprila, nivo izdani je u stalnom pokretu, a kolebanja su velika i česta. Drugi period, od maja do oktobra, odlikuje se relativno blagim oscilacijama nivoa, sa, uglavnom, konstantnim trendom sniženja. To je period pražnjenja ili recesije karstne izdani. Tokom perioda recesije, nivo karstne izdani se, u brdsko-planinskim terenima,

spušta za red veličine desetina metara, dok, npr., u holokarstu Hercegovine, oscilacije nivoa PV mogu da iznose i preko 300m [56]. Adekvatna su i kolebanja izdašnosti karstnih vrela. Maksimalne izdašnosti su, od nekoliko puta, pa do preko hiljadu puta veće od minimalnih, dok mnogi karstni izvori potpuno presušuju u recesionom periodu. Maksimalne izdašnosti karstnih vrela mogu da budu izuzetno velike: od nekoliko stotina l/s, do preko 100 m<sup>3</sup>/s, zavisno od veličine sliva izdani, godišnje količine i režima padavina, dubine karstifikacije i dr. faktora.

Za razliku od nivoa izdani i izdašnosti vrela, hemijski sastav i temperatura PV su relativno stabilni. U pitanju su, najčešće, hladne, hidrokarbonatno-kalcijumske vode.

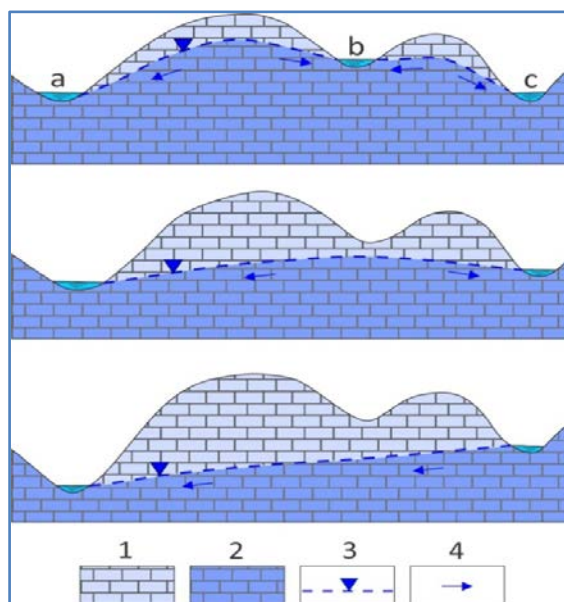
Jedna od bitnih karakteristika izdani u karbonatnom karstu jesu zamućenja voda na vrelima, nakon intenzivnih padavina ili otapanja snega. Naime, karstne kanale, kaverne i druge porne oblike delimično ispunjava crvenica - "terra rosa" (produkt hemijskog rastvaranja karbonatnih stena) ili neki drugi klastični nanos (glina, pesak), koji, nakon intenzivnih infiltracija voda u karstnu izdan, biva mehanički (snagom podzemnog toka) pomeren i, kao koloid u vodi, iznet iz izdani preko vrela. Pored ovog, specifičnog ("internog") zagadjenja PV, stoji konstatacija da su, u načelu, karstne izdani veoma podložne zagadjivanju sa površine terena, a zbog samog karaktera poroznosti sredine, brze vodozamene, prisne veze PV i površinskih voda i dr. Inače, PV karstne izdani imaju široku primenu u vodosnabdevanju, pri čemu su pomenuta podložnost zagadjivanju i velike oscilacije izdašnosti karstnih vrela, limitirajući faktori.

**Evolucija i vertikalna hidrodinamička zonalnost karstne izdani.** Karstna izdan je prostorno i vremenski veoma dinamična sredina, koja teži da svoj položaj prilagodi (hipsometrijski približi) zoni isticanja, odnosno erozionom bazu. Ta težnja usmerava karstne izdanske vode ka najbližem erozionom bazu. Čim ga dostignu, proces se nastavlja i dalje ukoliko postoji još niži (regionalni) erozioni bazis [59, 56]. Iz težnje karstne izdani da nivo spusti na veće dubine, nastaje neprestana "borba" između pojedinih erozionih bazisa za povećanje doticanja/isticanja karstnih voda, odnosno za povećanje sabirne površine (sliva) izdani. Krajnji rezultat takve borbe jesu česte "podzemne piraterije" i povećavanja zone hranjenja jedne izdani na račun druge, usled čega se javlja (ranije već pomenuta) nesaglasnost između hidrogeoloških i topografskih razvođa (slika 10.2.3.2). Posledica ovakvog razvoja karstne izdani jeste postepeno nestajanje površinskih tokova, od kojih, na kraju, ostaju samo povremeni rečni tokovi, ponornice, suve i "slepe" doline i periodično plavljene površine.

Ovakva evolucija karstne izdani proizvela je i njenu karakterističnu hidrodinamičku zonalnost po vertikalnom profilu. Cvijić izdvaja tri hidrografske (hidrodinamičke) zone [6]: **1-suva, 2-prelazna i 3-stalno vlažna** zona.

*Suva zona* je neposredno ispod površine terena i obiluje kavernama, kanalima i pukotinama, kroz koje se voda kreće približno vertikalno naniže, prema prelaznoj zoni.

*Prelaznu zonu* odlikuje prisustvo stalnih i povremenih vodnih pojava. U periodu padavina, prodiranje vode u dubinu ove zone je zaustavljeno ili usporeno, pa dolazi do sakupljanja vode i formiranja podzemnih tokova. Ova zona se nalazi iznad dna karstnih depresija, za koje su svojstveni povremeni (u kišnim sezonama aktivni) izvori.



**Slika 10.2.3.2. Šema evolucije karstne izdani i nastanka podzemne piraterije [40,20]: a, b i c – rečni tokovi na karstnoj podlozi; 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– slobodni nivo izdani; 4– smer kretanja PV**

*Stalno vlažna zona* je ispod nivoa karstnih depresija. Najveći deo PV iz nje otiče prema drenažnim zonama, ali usporeno. Tzv. “sifonalno” kretanje PV je često. Zbog ograničenih mogućnosti isticanja/oticanja, nivo izdani se, pri jačim padavinama, izdiže, tako da se ova zona, uslovno rečeno, povećava na račun prelazne.

### 10.3. OSTALI VIDOVI HIDROGEOLOŠKIH KARAKTERIZACIJA (TIPIZACIJA) TERENA

#### 10.3.1. Uslovno bezvodni tereni

U domaćoj literaturi i praksi, za delove terena koji se odlikuju niskom vodopropusnošću i izdašnošću, često se koristi i termin “*uslovno bezvodni delovi terena*”, gde atribut “uslovno” sugeriše ono što je već ranije rečeno, a to je da, praktično, ne postoje stene koje su potpuno bezvodne, a posebno ne na jednom širem prostoru (terenu). Hidrogeološka diferencijacija terena na (vodonosne) izdani, sa jedne strane i (uslovno) bezvodne delove terena, sa druge strane, najviše dolazi do izražaja kod izrade hidrogeoloških karata. Svaka hidrogeološka karta treba da se izradi u skladu sa propisanim/preporučenim standardima, kojima su, između ostalog, kvantitativno definisane veličine određenih hidrogeoloških parametara (hidrauličkog konduktiviteta, transmisivnosti, izdašnosti izvora i(li) bunara), koje predstavljaju granične vrednosti za diferencijaciju “izdan-bezvodni teren”. U bezvodne delove terena se najčešće svrstavaju oni izgrađeni od glinovitih i laporovitih stena, kao i od čvrstih kompaktnih (neispucalnih) stena – posebno metamorfnih, niskog stepena kristaliniteta. Sa praktične tačke gledišta, u terenima koji se, po pravilu, svrstavaju u (uslovno) bezvodne, u određenim slučajevima i minimalne raspoložive količine PV mogu da predstavljaju dragocen resurs za piće i individualno vodosnabdevanje domaćinstava.

### 10.3.2. Hidrogeološke strukture

Hidrogeološka struktura može da se definiše kao *geološko telo/struktura unutar čijih granica postoji kontinuitet zastupljenosti određenih hidrogeoloških svojstava stena i uslova formiranja rezervi i kvaliteta PV*. Ovaj termin se, poslednjih godina, sve ređe koristi, posebno u zapadnoj literaturi i praksi, gde je, uglavnom, zamenjen terminom akvifer/izdan. Kako će se i videti iz narednog izlaganja, *hidrogeološke strukture ne poistovećujemo sa tipovima izdani (zbijenim, razbijenim, sa slobodnim nivoom, pod pritiskom), već su to tipske geološke sredine, u kojima egzistuju određeni tipovi izdani*.

Dva su osnovna tipa geoloških sredina u kojima se formiraju hidrogeološke strukture:

- rastresite i poluvezane sedimentne stene, čija je osnovna karakteristika uslojenost i koje su vezane pretežno za ravničarske terene
- čvrste stene (magmatske, metamorfne i sedimentne) različitog stepena ispucalosti, odnosno karstifikovanosti, koje su vezane pretežno za brdsko-planinski reljef.

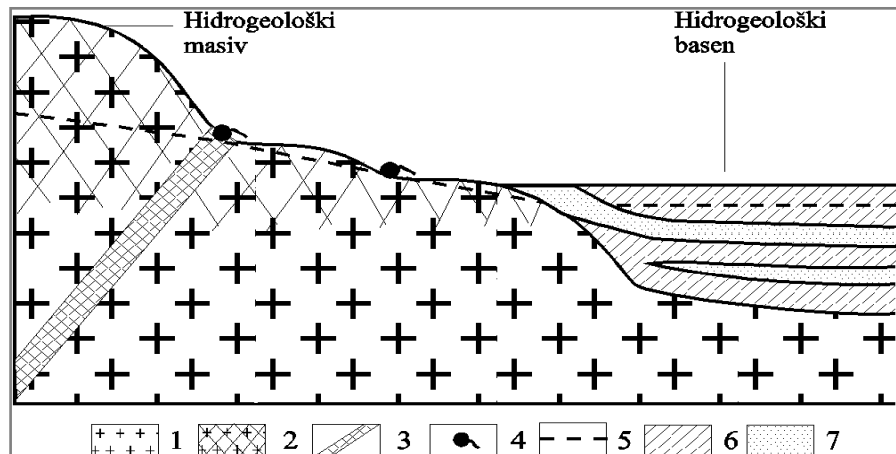
Hidrogeološke strukture, lokalne i regionalne, koje se formiraju u ova dva tipa geoloških sredina, prikazane su u tabeli 10.3.2.1. "Logika" gradacije je ta da je, npr., jedan vodonosni horizont sačinjen od nekoliko vodonosnih (i nekoliko vodonepropusnih) slojeva, da vodonosni kompleks sadrži nekoliko horizonata, a da je jedan (veći) hidrogeološki basen sačinjen od nekoliko kompleksa. Na slici 10.3.2.1, prikazana je šema prostornog i strukturno-(hidro)geološkog odnosa **dva osnovna tipa regionalnih hidrogeoloških struktura - masiva i basena**.

**Tabela 10.3.2.1. Hidrogeološke strukture [30, 17]**

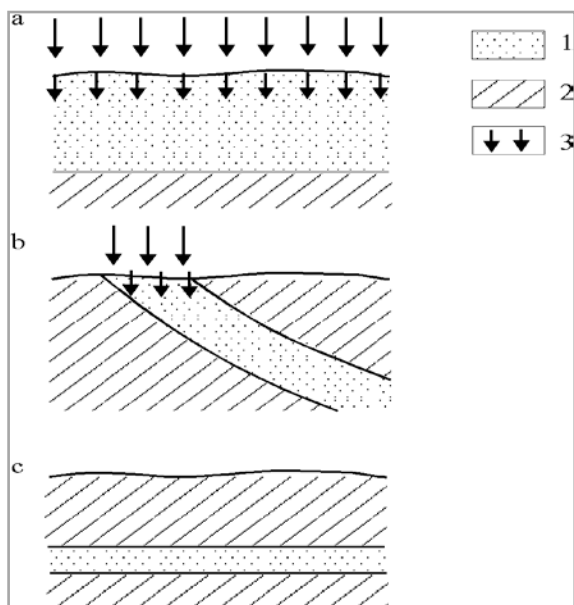
Geološka sredina	Hidrogeološke strukture					
	Lokalne					Regionalne
Rastresite i poluvezane sedimentne stene	Sloj	⇒	Horizont	⇒	Kompleks	⇒ Basen
Čvrste stene	Lokalna zona ili lokalni razlom	⇒	Regionalna zona ili regionalni razlom	⇒	Sveukupnost regionalnih zona ili razloma jednog područja	⇒ Masiv

**Druga klasifikacija hidrogeoloških struktura**, kao kriterijum uzima **otkrivenost (otvorenost) vodonosne sredine u odnosu na atmosferu**, na osnovu čega razlikujemo tri tipa hidrogeoloških struktura: **1-otvorene, 2-poluzatvorene i 3-zatvorene**, čije su osnovne odlike prikazane šematski na slici 10.3.2.2.

Za **otvorene hidrogeološke strukture** svojstvena je (potpuna) otkrivenost vodonosne sredine u odnosu na atmosferu, što uslovljava intenzivnu vodozamenu. Aluvijalni nanos predstavlja tipičan primer ovakve hidrogeološke strukture. **Poluzatvorene** se odlikuju delimičnom otkrivenošću vodonosne sredine u odnosu na atmosferu, pa je proces vodozamene usporen, u odnosu na otvorene strukture.



**Slika 10.3.2.1. Šema međusobnog prostornog i strukturalno-(hidro)geološkog odnosa hidrogeološkog masiva i basena [30, 17]:** 1- kompaktne magmatske stene; 2- vodonosne ispucale magmatske stene; 3 - vodonosni razlom; 4- izvor; 5- nivo PV; 6- vodonepropusna glina; 7- vodopropusni pesak



**Slika 10.3.2.2. Šeme hidrogeoloških struktura sa aspekta otkrivenosti vodonosne sredine [17]:** a) otvorene; b) poluzatvorene; c) zatvorene; 1 - vodonosna sredina; 2 - vodonepropusne stene; 3 – padavine i infiltracija

**Zatvorene strukture** su vodonosne sredine na većim dubinama, koje su vodonepropusnim stenama izolovane od atmosfere, a proces vodozamenje je veoma usporen.

\* \* \*

**Kontrolna pitanja:**

- 1/ Kako se dele izdani na osnovu strukturnog tipa poroznosti stena u kojima su formirane ?**
- 2/ U kojim tipovima sedimentacionih sredina mogu da se formiraju zbijene izdani ?**
- 3/ Koje zbijene izdani se, u načelu, odlikuju većom vodonosnošću – aluvijalne ili terasne ? Zašto ?**
- 4/ Ukratko izložiti osnovne načelne razlike između pukotinskih izdani iznad i ispod erozionog bazisa.**
- 5/ Kakvim režimom nivoa i izdašnosti se odlikuju karstne izdani ? Zašto ?**
- 6/ Ukratko izložiti karakteristike evolucije i vertikalnu hidrodinamičku zonalnost karstnih izdani ?**
- 7/ Šta su estavele, a šta vrulje.**
- 8/ Od kojih vrsta stena mogu da budu izgrađeni tereni koji se karakterišu kao uslovno bezvodni ?**
- 9/ Navesti dva osnovna tipa regionalnih hidrogeoloških struktura. U kojim tipovima geoloških sredina se oni formiraju ?**
- 10/ Prema kom kriterijumu se hidrogeološke strukture dele na otvorene i (polu)zatvorene ?**

VII DEO

**HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI**

## **11. HRANJENJE I DRENIRANJE IZDANI**

### **11.1. HRANJENJE IZDANI**

Pod hranjenjem izdani podrazumeva se doticaj voda u posmatranu izdan, što za posledicu ima povišenje nivoa izdani i povećanje (raspoloživih) količina, odnosno, rezervi PV. Hranjenje može da bude *prirodno i veštačko (antropogeno)*.

#### **11.1.1. Prirodno hranjenje izdani**

*Osnovni vid prirodnog hranjenja izdani jeste **infiltracija** voda od atmosferskih padavina i površinskih tokova i akumulacija, kao i (podzemni) doticaj iz susednih izdani.*

O procesu infiltracije, već je bilo dosta reči u poglavlju 8.1. (u sklopu izlaganja o osnovnim vidovima kretanja PV), tako da izlaganje u nastavku predstavlja nadgradnju već izloženog.

Već je istaknuto, da se *samo deo voda od atmosferskih padavina infiltrira u tlo*, dok se *ostatak raspoređuje na površinski oticaj i evapotranspiraciju*. Ova preraspodela zavisi od više faktora:

- temperature i vlažnosti vazduha,
- količine i intenziteta padavina,
- reljefa (nagiba) terena,
- prisustva i tipa vegetacionog pokrivača
- litološkog/granulometrijski sastava stena u zone aeracije
- deficita vlažnosti u zoni aeracije i dubina do nivoa podzemnih voda.

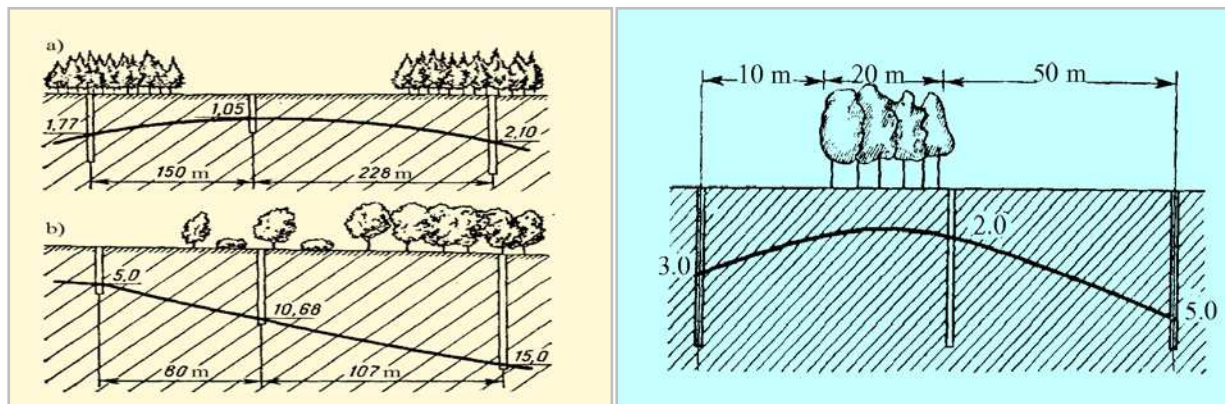
Kada je količina padavina mala, a isparavanje veliko, sva vlaga iz zemljišnog sloja može da ispari, pa infiltraciono hranjenje izdani izostaje. U ravničarskim terenima, izgradjenim od vodopropusnih peskova i šljunkova, veći deo palih voda može da se infiltrira u podzemlje i hrani izdan. Infiltraciono hranjenje je najefektnije pri dugotrajnim kišama slabijeg intenziteta i visokoj vlažnosti vazduha, koja limitira evapotranspiraciju. Intenzivno infiltraciono hranjenje izdani odvija se i u proleće, tokom (postepenog) otapanja snega. U područjima sa (umereno-)kontinentalnom klimom, veličina infiltracije ima sezonska (unutargodišnja) kolebanja, u skladu sa klimatskim odlikama posmatranog područja. U tabeli 11.1.1.1 uočljivo je da se najintenzivnija infiltracija odvija tokom perioda zima proleće (januar-maj), ne toliko zbog količina padavina, već zbog činjenice da su, u tom periodu godine, vlažnosti zemljišta i vazduha dovoljno velike, a temperature vazduha dovoljno niske, da pogoduju intenzivnoj infiltraciji. U drugom delu godine, i pored prosečno većih padavina, infiltracija do nivoa PV je praktično beznačajna, zbog visokih temperatura vazduha (i povećanog isparavanja), kao i zbog deficita vlage u zemljištu, čije namirivanje sprečava (dublju) infiltraciju do nivoa izdani.

**Tabela 11.1.1.1. Unutargodišnja raspodela veličina infiltracije za područje Srednje Evrope [82, 17]**

Mesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
Padavine (mm)	36	53	32	59	79	114	113	85	49	55	35	45	755
<b>Infiltracija (mm)</b>	<b>18</b>	<b>39</b>	<b>27</b>	<b>20</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	–	<b>6</b>	–	–	–	<b>4</b>	<b>132</b>
<b>Infiltracija (% od P)</b>	<b>50</b>	<b>74</b>	<b>84</b>	<b>34</b>	<b>16</b>	<b>4</b>	–	<b>7</b>	–	–	–	<b>9</b>	<b>17,5</b>



Prisustvo i vrsta vegetacionog pokrivača su bitni faktori uticaja na infiltraciju. Biljke su potrošači vode: upijaju vlagu iz tla, vrše transpiraciju viška vlage, sa njihovih površina voda isparava, što negativno utiče na hranjenje izdani, odnosno, *efektivnu infiltraciju*, posebno u sušnoj sezoni (slika 11.1.1.1.-levo). Ipak, prisustvo vegetacije može i da pogoduje prihranjivanju izdani (slika 11.1.1.2.-desno) - u sezoni topljenje snega drveće pravi senku i čini da se sneg sporije topi (što smanjuje površinski oticaj) i da sporije kopni (što smanjuje isparavanje).



**Slika 11.1.1.1.** *Levo: Dubina do nivoa izdani u pošumljenom i nepošumljenom terenu u Sankt-Petersburskoj (a) i Voronežskoj guberniji (b) u letnjem (sušnom) periodu; Desno: Nivoi PV u pošumljenom i nepošumljenom delu stepe u periodu topljenja snega [82, 17– delimično izmenjeno]*

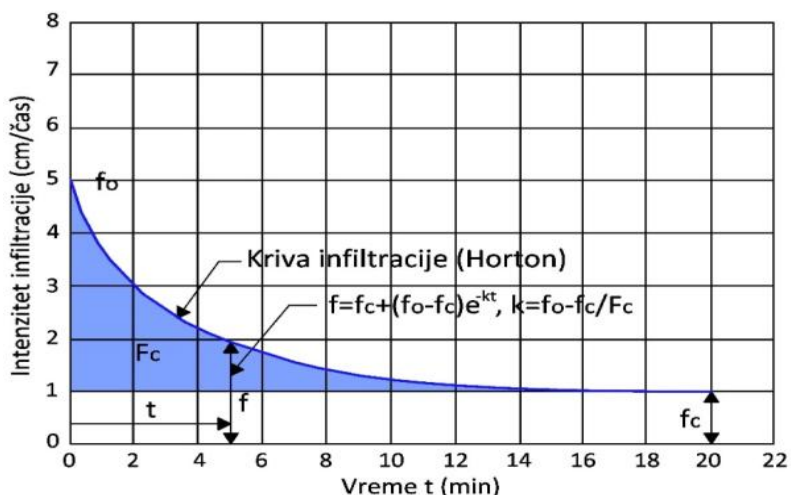
Na strmim padinama infiltracija je umanjena, a povećan je površinski oticaj, dok je u ravničarskim predelima obrnuto. Infiltracija je intenzivna u nepokrivenom karstu, posebno kada su u većoj meri zastupljeni karakteristični morfološki oblici: vrtače, uvale, ponori, jame i dr., kada se, kao dominantan vid infiltracije, javlja poniranje.

Bitna karakteristika infiltracije je promenljivost, kako prostorna (zavisno od sastava zemljišta, vegetacije, geoloških, geomorfoloških, klimatskih i dr. karakteristika konkretnih područja), tako i vremenska/sezonska, u granicama istog područja (zbog sezonskih promena klimatskih faktora: padavina, temperature i vlažnosti vazduha i dr.). Pored toga, *intenzitet infiltracije* na jednom području ima generalni trend pada, sa težnjom dostizanja konstantne konačne vrednosti, nakon određenog vremena. Ovaj trend se grafički prikazuje *krivom infiltracije* (slika 10.1.1.2).

Osim infiltracije padavina, izdani se **prihranjuju i infiltracijom voda iz rečnih tokova i površinskih (slatkovodnih) akumulacija**. Ovaj vid prihranjivanja odvija se najčešće u sušnom periodu godine, kada se nivoi izdani, usled slabog ili potpunog izostanka prihranjivanja od padavina spuste ispod nivoa erozionih bazisa. Tada se, po hidrauličkoj “logici”, voda iz reka ili jezera infiltrira do sniženog nivoa izdani, što, ponekad, dovodi i do presušivanja reka ili manjih jezera. Već je istaknuto da su ovi slučajevi česti u karstu, ali mogu da budu svojstveni i za terene u kojima su formirane zbijene i pukotinske izdani.

**Doticaj iz susednih izdani**, takođe, predstavlja vid prihranjivanja izdani. U okviru arteskih basena postoji “pretakanje” PV između pojedinih vodonosnih slojeva/horizontata. Karstna vrela (drenovi karstne izdani) često se javljaju na kontaktu karsta i nekarstnih (relativno) vodonepropusnih stena.

Medjutim, često se ne izdrenira sva voda karstne izdani preko vrela, već se deo “preliva”/infiltrira u kontaktnu (relativno vodonepropusnu) sredinu.



Slika 10.1.1.2. Tipška kriva trenda intenziteta infiltracije [72, 20]

### 11.1.2. Veštačko prihranjivanje izdani

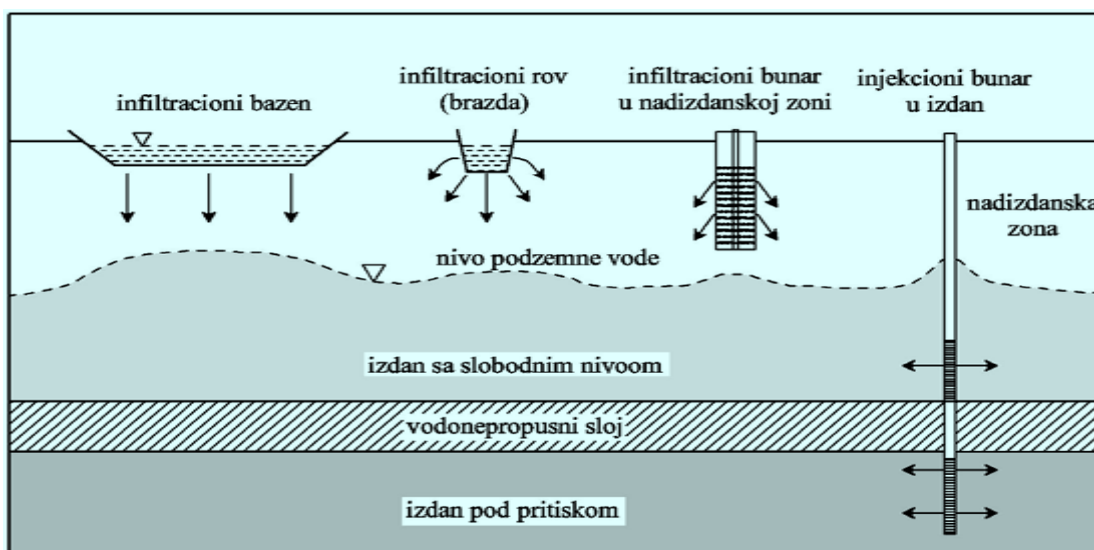
Veštačkom prihranjivanju izdani (površinskim vodama) se pribegava u slučajevima kada prirodno raspoložive rezerve PV nisu dovoljne za podmirenje određenih potreba i kada za to postoji prirodna (hidrološka, geološka, geomorfološka) predispozicija. Efekat veštačkog prihranjivanja je mogućnost zahvatanje većih (od prirodno raspoloživih/obnovljivih) količina voda iz konkretne izdani.

Neke od metoda veštačkog prihranjivanja izdani su: *infiltracioni bazeni i rovovi, infiltracioni i injekcioni bunari* (slika 11.1.2.1). Kod (plitkih) infiltracionih objekata, površinska voda se (gravitaciono) naliva u nadzidansku zonu, odakle se infiltrira do nivoa PV. Kod (dubokih) injekcionih bunara, površinska voda se (pod pritiskom) injektira direktno u izdan.

### 11.2. DRENIRANJE IZDANI

Pod dreniranjem izdani podrazumeva se *prirodno* pražnjenje izdani, kao i *veštačko*, koje sprovodi Čovek, a u funkciji je korišćenja ili odbrane od PV.

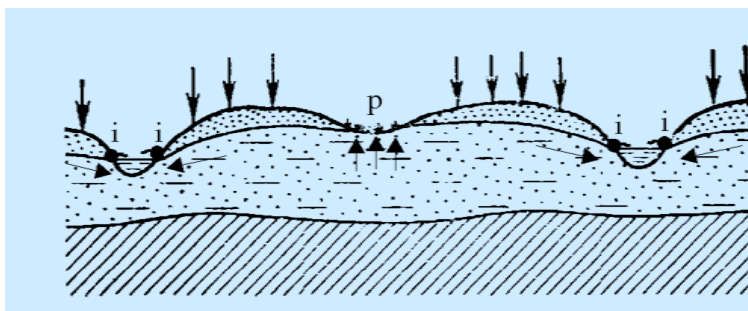
**Prirodno dreniranje izdani** može da bude **otkriveno i skriveno**. **Otkriveno** se odvija *isticanjem preko izvora*. **Skriveno** se odvija: *direktno u rečne tokove, jezera i mora, u susedne izdani i evapotranspiracijom*.



Slika 11.1.2.1. Šeme pojedinih metoda veštačkog prihranjivanja izdani [41 - adaptirano]

### 11.2.1. Izvori

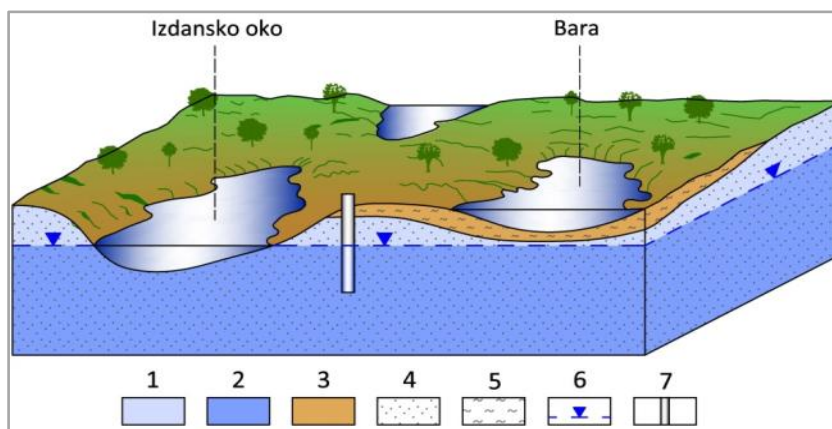
Izvori su prirodne pojave isticanja PV na površini terena. Pored *koncentrisanog* (punktuelnog) *isticanja*, u vidu *mlaza* (izvori), PV vode mogu isticati i *difuzno*, na širem prostoru, pri čemu najčešće dolazi do zamočvarivanja terena. Takve pojave se nazivaju *pištevina* i javljaju se kada erozioni usek u terenu nije dovoljno dubok da omogući slobodno (koncentrisano) isticanje PV (slika 11.2.1.1).



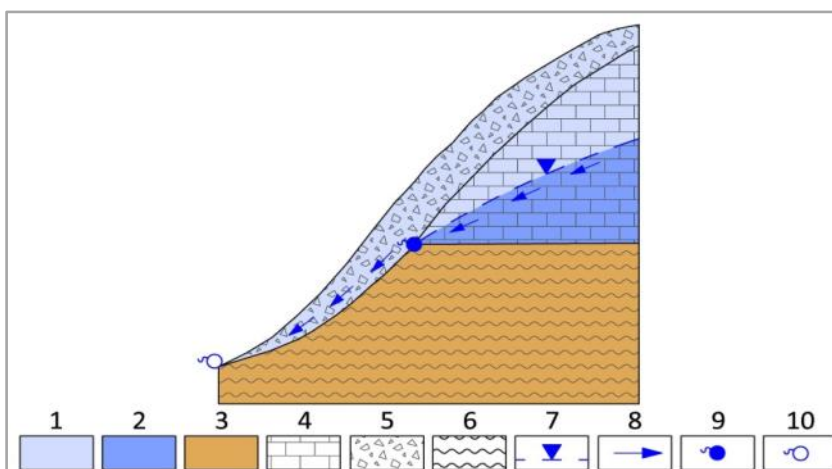
Slika 11.2.1.1. Šeme isticanja PV na površini terena [38, 17]: i- izvor; p- pištevina

U erozionim udubljenjima u tlu, čija su dna usečena ispod nivoa izdani, mogu da se pojave PV, koje tu “stoje” i dalje ne otiču (površinski). Ova udubljenja, koja su stalno ili povremeno ispunjena vodom, zovu se *izdanska oka*. Treba ih razlikovati od “obične” (površinske) bare, koja se formira na pripovršinskom vodonepropusnom zemljištu (slika 11.2.1.2).

U određenim slučajevima izvori mogu da budu maskirani/pokriveni drobinskim (deluvijalnim) nanosom. Izdanske vode se, u takvim slučajevima, kreću/proceđuju ispod ili kroz takav nanos i, na površini, pojavljuju u vidu *sekundarnih izvora* (slika 11.2.1.3).



**Slika 11.2.1.2. Šema izdanskog oka i površinske bare** [78, 20]: 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4– pesak; 5– glina; 6– nivo izdani; 7– bunar



**Slika 11.2.1.3. Primarni i sekundarni izvor** [38, 20 – delimično izmenjeno]: 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4– karstifikovani krečnjaci; 5 – sipar (krečnjačka drobina); 6– kompaktne kristalaste stene; 7– nivo karstne izdani; 8– smer kretanja PV; 9– primarni (karstni) izvor; 10– sekundarni izvor

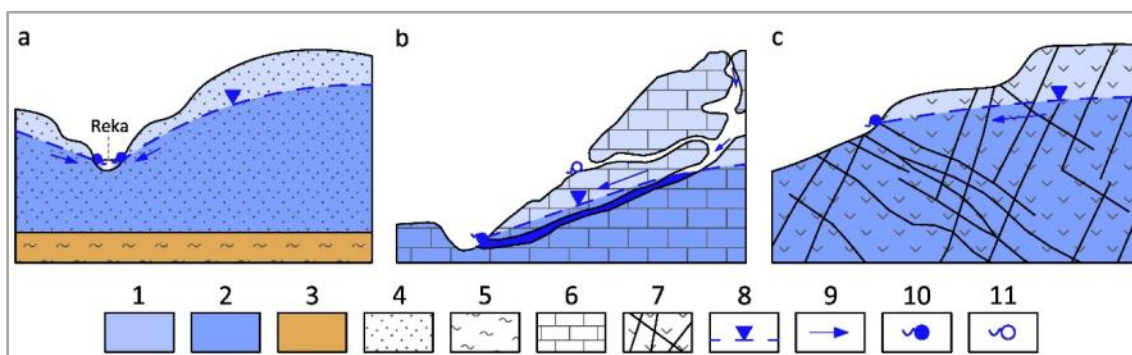
Izvori se najčešće javljaju u erodovanim depresijama u terenu i tektonski poremećenim zonama. Načini pojavljivanja izvora su različiti i prvenstveno uslovljeni uzajamnim dejstvom geološko-tektonskih faktora i lokalne hidrografske mreže. Na formiranje izvora utiču:

- eroziona i tektonska rasčlanjenost reljefa, koja uslovljava otkrivanje (presecanje) izdani rečnim dolinama, jarugama ili kotlinama
- prostorna nejednorodnost stena u pogledu poroznosti i vodopropusnosti: litološke/granulometrijske promene, promene u stepenu ispucalosti i karsitifikovanosti i dr.

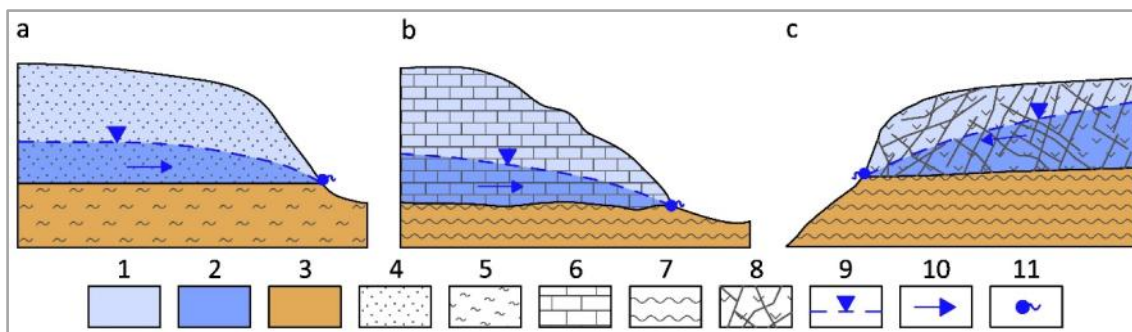
**Klasifikacije izvora.** Nije moguće izvesti jednu sveobuhvatnu/univerzalnu klasifikaciju izvora, s obzirom na brojne aspekte/faktore njihovog formiranja i funkcionisanja. Postojeće klasifikacije zasnivaju se, uglavnom, samo na pojedinima od njih: *mehanizmu isticanja, tipu izdani koji dreniraju, (ne)postojanosti isticanja, veličini izdašnosti, temperaturi voda, mineralizaciji voda i dr.*

Na osnovu **mehanizma isticanja**, izvori se dele se na dve osnovne grupe: **1-silazni (gravitacioni)** i **2-uzlazni**.

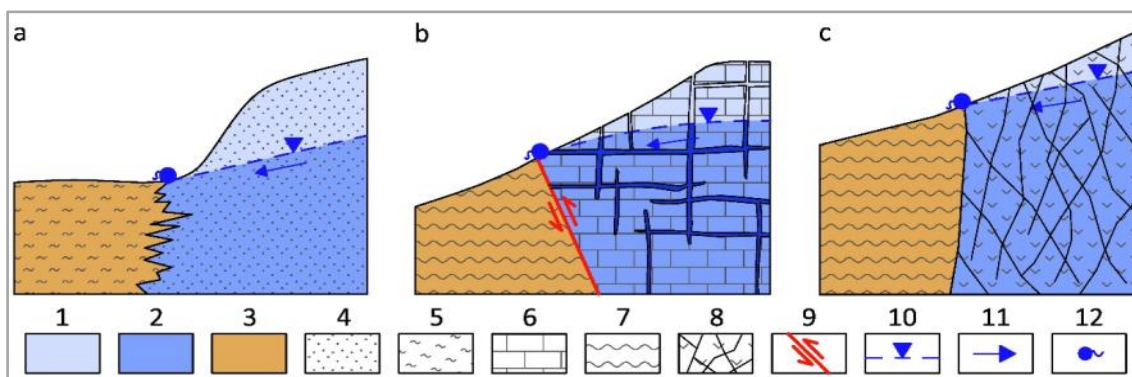
**Silazni izvori** dreniraju izdani sa slobodnim nivoom, a PV ističu pod dejstvom gravitacije. Pojavljuju se na mestima gde su erozioni useci (depresije) doprli do nivoa izdani ili na kontaktu izdani sa vodonepropusnim stenama. U skladu sa tim, *silazni izvori se dele na tri podgrupe: 1-depresione (slika 11.2.1.4) , 2-kontaktne (slika 11.2.1.5) i 3-barijerne (slika 11.2.1.6).*



**Slika 11.2.1.4. Depresioni izvori različitih tipova izdani [20]: a –zbijena izdan; b –karstna; c –pukotinska; 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4–pesak; 5– glina; 6– karstifikovani krečnjak; 7– ispucale magmatske stene; 8– nivo izdani; 9– smer kretanja PV; 10– stalni izvor; 11– povremeni izvor**



**Slika 11.2.1.5. Kontaktni izvori različitih tipova izdani [20]: a –zbijena izdan; b –karstna; c –pukotinska; 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona; 3– vodonepropusna sredina; 4–pesak; 5– glina; 6– karstifikovani krečnjak; 7– ispucale magmatske stene; 8– kristalaste stene; 9– nivo izdani; 10– smer kretanja PV; 11– izvor**

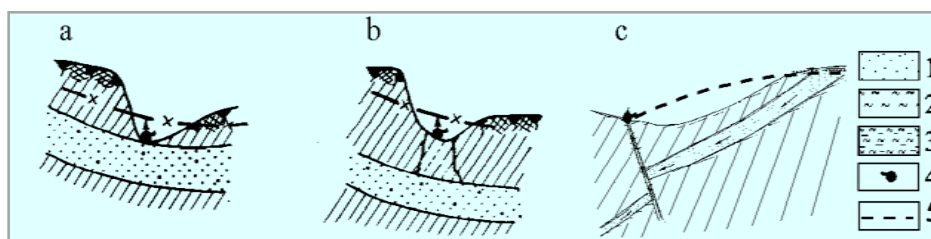


**Slika 11.2.1.6. Barijerni izvori različitih tipova izdani [20]: a – zbijena izdan; b – karstna; c – pukotinska; 1 – nadizdanska zona; 2 – izdanska zona; 3 – vodonepropusna sredina; 4 – pesak; 5 – glina; 6 – karstifikovani krečnjak; 7 – kristalaste stene; 8 – ispucale magmatske stene; 9 – rased; 10 – nivo izdani; 11 – smer kretanja PV; 12 – izvor**

Depresioni izvori se, zbog već pomenutih uslova nastanka, nazivaju i *erozionim*. Kontaktni izvori se pojavljuju u zoni kontakta (drenirane) izdani sa vodonepropusnom podinom. Isticanje *barijernih (ili prelivnih) izvora* uslovljeno je postojanjem „barijere“ od vodonepropusnih ili slabije propusnih (u odnosu na dreniranu izdan) stena, koja stoji na putu filtracije PV. Po „liniji manjeg otpora“, PV menja smer filtracije tako što obilazi barijeru, odnosno, „preliva“ preko nje i ističe u vidu izvora.

**Uzlazni ili arteski izvori** dreniraju izdani pod pritiskom svih strukturnih tipova poroznosti. Ređe se sreću od silaznih. Karakteriše ih *relativno ustaljen režim isticanja i kvaliteta voda*. Predispozicija za njihovu pojavu može da bude: „otkrivanje“ arteskih izdani erozijom vodonepropusne povlate (slika 11.2.1.7.a), prisustvo partija vodopropusnijih stena (litofacijalna promena) u okviru vodonepropusne povlate arteske izdani (slika 11.2.1.7.b), kao i prisustvo raseda (slika 11.2.1.7.c).

S obzirom da se preko uzlaznih izvora dreniraju dublje izdani, PV su često sa povišenom mineralizacijom i(li) temperaturom, a isticanje može da bude praćeno i pojavom gasova.



**Slika 11.2.1.7. Šeme pojavljivanja uzlaznih izvora [17-delimično izmenjeno]: a – erozija vodonepropusne povlate; b – prisustvo partija vodopropusnijih stena u okviru vodonepropusne povlate; c – prisustvo raseda; 1 – vodonosni pesak; 2 – vodonepropusne gline; 3 – relativno vodo(ne)propusni glinoviti peskovi; 4 – uzlazni izvor; 5 – nivo izdani pod pritiskom**

**Na osnovu postojanosti isticanja, razlikujemo: 1-stalne i 2-povremene (ili intermitentne) izvore.** Nepostojano isticanje, odnosno, (sezonsko) *presušivanje izvora, najčešće je posledica sezonskog deficita PV u izdani, zbog smanjenog (ili potpunog odsustva) hranjenja u sušnom periodu.* Često se javljaju u sklopu karstnih izdani (slika 11.2.1.4.b), zbog njihovih već pomenutih svojstava: brzog punjenja i pražnjenja i velikih amplituda kolebanja nivoa PV. Povremeni izvori mogu da budu i drenažni punktovi lebdećih izdani (slika 9.1.1).

Poseban vid povremenih izvora, čiji nepostojani karakter isticanja nema veze sa deficitom voda, jesu *gejziri i izvori u oblastima višegodišnjeg zamrzavanja tla.*

*Gejziri se javljaju u savremenim vulkanskim oblastima, čiji je povremeni, ali ritmični (od minuta do meseci) karakter isticanja generisan delovanjem pritiska pregrejanih gasova i vodene pare. Izvori u oblasti višegodišnjeg zamrzavanja tla najčešće imaju sezonski karakter i ističu samo tokom nekoliko najtoplijih meseci u toku godine, kada tlo nije (u potpunosti) zamrznuto. Izuzetak mogu da budu pojedini uzlazni izvori, koji dreniraju izdani ispod zone zamrzavanja, koji imaju relativno postojanu izdašnost i kvalitet voda.*

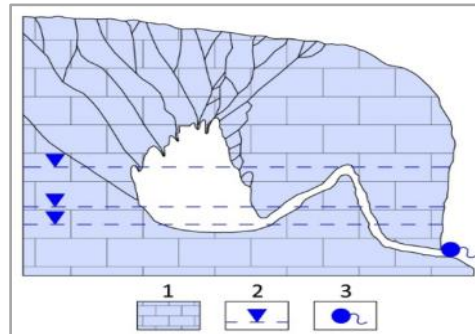
**Na osnovu genetske veze sa određenim tipom izdani,** izdvajaju se: *1- izvori koji dreniraju zbijene izdani, 2- izvori koji dreniraju pukotinske izdani i 3- izvori koji dreniraju karstne izdani.*

U nastavku su izložene bitne karakteristike *karstnih izvora, kao najraznovrsnijih u pogledu specifičnosti pojavljivanja i funkcionisanja.* U tom pogledu, izdvajaju se sledeće grupe izvora: *karstna vrela, potajnice, estavele, bočatni izvori i vrulje.*

**Karstna vrela** su snažni izvori koji mogu da budu silaznog i uzlaznog karaktera, stalni ili povremeni, u vidu jednog koncentrisanog mlaza ili nekoliko manjih pojava (razbijena izvorska zona). Većina vrela javlja se po obodima karstnih polja, rečnih i jezerskih dolina ili obala mora. Kako je već istaknuto, njihova *bitna odlika su značajna kolebanja izdašnosti: maksimalne izdašnosti su od nekoliko puta, pa do preko hiljadu puta veće od minimalnih, dok mnogi karstni izvori potpuno presušuju u recesionom periodu.* Maksimalne izdašnosti karstnih vrela mogu da budu izuzetno velike: od nekoliko stotina litara u sekundi, do preko 100 m<sup>3</sup>/s, zavisno od veličine sliva izdani, godišnje količine i režima padavina, dubine karstifikacije i drugih faktora.

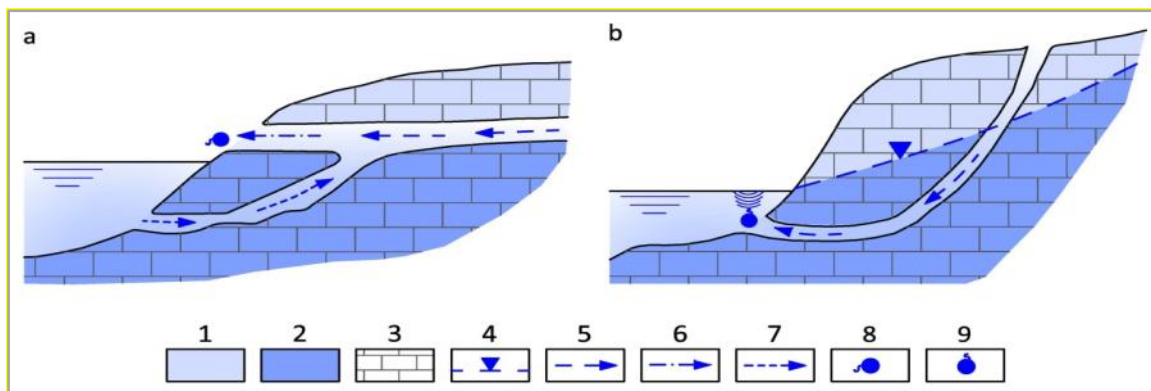
**Potajnice** su retka vrsta karstnih izvora, kod kojih voda ne ističe stalno, već u određenim vremenskim intervalima i razlikuju se od "običnih" (sezonskih) povremenih izvora. Njihov specifični karakter isticanja posledica je postojanja kaverne i (karstnog) kanala u vidu krive natege, koji su međusobno povezani (slika 11.2.1.8). Kada se kaverna napuni vodom (koja dotiče iz brojnih kanala na "tavanici") do određene visine, voda počinje da otiče kroz kanal, koji funkcioniše kao kriva natega i prazni kavernu. Voda ističe sve dok se nivo vode u kaverni ne spusti do nivoa ulaza u kanal, kada oticanje prestaje i kreće novi ciklus punjenja kaverne vodom.

**Estavele** su, kako je već pomenuto, karstne pojave sa dvostrukom hidrogeološkom funkcijom, koje, u zavisnosti od stanja nivoa izdani, u jednom (sušnom) periodu rade kao ponori, a u drugom (periodu visokih nivoa PV), kao izvori.



**Slika 11.2.1.8. Šema potajnice** [71, 20]: 1– karstifikovani krečnjak; 2– nivo PV; 3– izvor (potajnica)

**Bočatni izvori** su formirani na morskim obalama, uglavnom u nivou ili nekoliko metara iznad nivoa mora. U recesionim (niski nivou karstne izdani) periodima daju poluslanu (bočatnu) vodu, usled mešanja slanih/morskih i “slatkih”/izdanskih voda (slika 11.2.1.9.a). Prodori slanih voda u karstnu izdan odvijaju se duž karstnih kanala, preko kojih se, u vreme visokih nivou izdani, u suprotnom smeru, vrši isticanje “slatkih” karstnih voda ispod nivoa mora. Punktovi dreniranja izdani ispod nivoa mora ili jezera zovu se **vrulje** (slika 11.2.1.9.b).



**Slika 11.2.1.9. Šeme karstnih izvora u priobalju mora** [76, 20-delimično izmenjeno]: a– bočatni izvor; b – vrulja; 1– nadizdanska zona; 2–izdanska zona; 3–karstifikovani krečnjak; 4– nivo izdani; 5–kretanje slatkih voda; 6–kretanje (pomešanih) bočatnih voda; 7–kretanje slanih voda; 8– bočatni izvor; 9– vrulja

**Merenje izdašnosti (proticaja) izvora.** Kao punktovi otkrivenog dreniranja izdani, izvori su, u hidrogeološkim istraživanjima, veoma značajni, zbog mogućnosti neposrednog i preciznog merenja izdašnosti (proticaja) i analiza kvaliteta dreniranih voda. U zavisnosti od (procenjene) veličine proticaja, koriste se sledeće tri metode merenja: **1- sudom poznate zapremine, 2- oštroičnim prelivima i 3- hidrometrijskim krilom.**

*Merenje sudom poznate zapremine sprovodi se kod izvora male izdašnosti (reda veličine nekoliko l/s), sa koncentrisanim mlazom isticanja, tako da sva voda koja ističe, može da se prihvati sudom. Veličina proticaja se određuje po obrascu:*

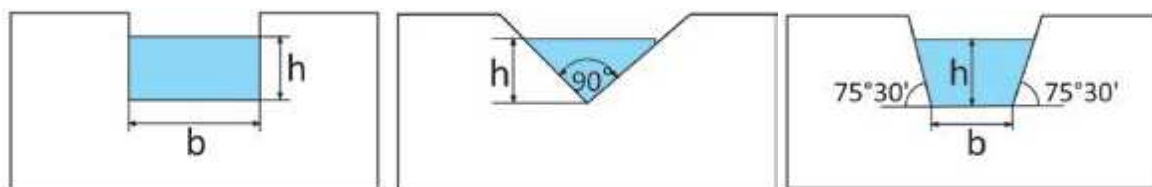


$$Q = \frac{V}{t}$$

(11.2.1.1)

gde je: **Q**– proticaj (l/s); **V**- zapremina suda (l) i **t**- vreme za koje se sud napuni vodom (s).

Oštroivični hidrometrijski prelive su pregrade pravilnog geometrijskog preseka (slika 11.2.1.10), koje se postavljaju na uređenim profilima, u koritima manjih površinskih vodotoka, nizvodno od izvora. Parametri na osnovu kojih se izračunava veličina proticaja su: širina prelivnog praga (b) i visina vodenog stuba na prelivu (h).



**Slika 11.2.1.10. Tipovi hidrometrijskih oštroivičnih prelive:** Levo: Pravougaoni; Sredina: Tompsonov (trougaoni); Desno: Čipoletijev (trapezoidni)

Merenja proticaja hidrometrijskim krilom primenjuju se na uređenim profilima u koritima površinskih vodotoka, nizvodno od izvora velikih izdašnosti – najčešće snažnih karstnih vrela. Broj izmerenih obrtaja propelera hidrometrijskog krila (slika 11.2.1.11), u jedinici vremena, direktno je proporcionalan brzini površinskog toka, pa time i veličini proticaja. Merenja se vrše na nekoliko reprezentativnih “vertikala” na uređenom mernom profilu, pa se, na osnovu dobijenih podataka, sprovodi proračun ukupnog proticaja kroz merni profil.



**Slika 11.2.1.11. Hidrometrijska krila [98]**

## 11.2.2. Evapotranspiracija

Evapotranspiracija, kao vid skrivenog dreniranja PV, može da se razloži na: 1-*isparavanje iz zone aeracije i sa slobodne površine izdani* i 2- *transpiraciju biljaka*.

Veličina *isparavanja iz zone aeracije* zavisi od stepena zasićenosti tla vodom, litološkog/granulometrijskog sastava i poroznosti stena, njihove vlažnosti i kapilarnosti. Do

potpunog zasićenja poroznog prostora, u gornjem delu zone aeracije, dolazi posle dužih, obilnih kiša, kada se kapilarni pojas "popne" skoro do površine tla i tada je isparavanje praktično jednako potencijalnom. Sa sniženjem nivoa PV i visine kapilarne vlage, isparavanje se smanjuje. *Transpiracija* je apsorbovanje (dreniranje) vode iz tla (nadizdanske zone i(li) izdani) od strane biljaka, koja može da dovede do osetnog sniženja nivoa PV, posebno u sušnom periodu godine (slika 11.1.1.1-levo). Intenzitet transpiracije i njenog uticaja na sniženje nivoa PV zavisi (pored geoloških svojstava tla i njegove (ne)zasićenosti vodom) i od gustine vegetacionog pokrivača, fizioloških karakteristika biljnih vrsta, dubine korena, faze razvića i dr.

### **11.2.3. Ostali vidovi skrivenog dreniranja izdani**

U prethodnim poglavljima su već navedeni neki karakteristični primeri *dreniranje u susedne izdani*, dok će detaljniji osvrt na *dreniranje u reke, jezera i mora* biti dat u poglavlju 13.

### **11.2.4. Veštačko dreniranje izdani**

Pod *veštačkim dreniranjem izdani* podrazumeva se dreniranje PV različitim vrstama vodozahvata (bunarima, galerijama i dr.) od strane ljudi, za različite potrebe: vodosnabdevanje, odvodnjavanje i navodnjavanje poljoprivrednih površina, odvodnjavanje rudnika, tunela, urbanih područja, komercijalno korišćenje voda specifičnog kvaliteta (flaširanje, balneoterapiju, toplifikaciju, ekstrakciju korisnih sirovina i dr.). Veštačko dreniranje sve je prisutniji, a često i najveći rashodni element u bilansu PV nekih područja. Primeri prekomerne eksploatacije PV u Svetu su brojni, posebno u (polu)sušnim područjima, najčešće zbog obilnog navodnjavanja poljoprivrednih površina.

\* \* \*

#### **Kontrolna pitanja:**

**1/ Osnovni vid prirodnog hranjenja izdani je...?**

**2/Kako prisustvo vegetacionog pokrivača može da utiče na intenzitet infiltracije ?**

**3/Da li je infiltracija veća na strmim padinama ili u zaravnjenim terenima ? Zašto ?**

**4/Navesti metode veštačkog prihranjivanja izdani ?**

**5/ Šta su pištevine a šta izdanska oka ?**

**6/Kako se dele izvori na osnovu mehanizma isticanja ?**

**7/Šta je suštinska razlika između depresionih i kontaktnih izvora ?**

**8/ Šta je predispozicija za pojavu arteskkih (uzlaznih) izvora ?**

**9/ Navesti vidove (mehanizme funkcionisanja) povremenih izvora.**

**10/ Navesti metode merenja izdašnosti izvora i ukratko objasniti kako funkcionišu oštroični preliivi.**

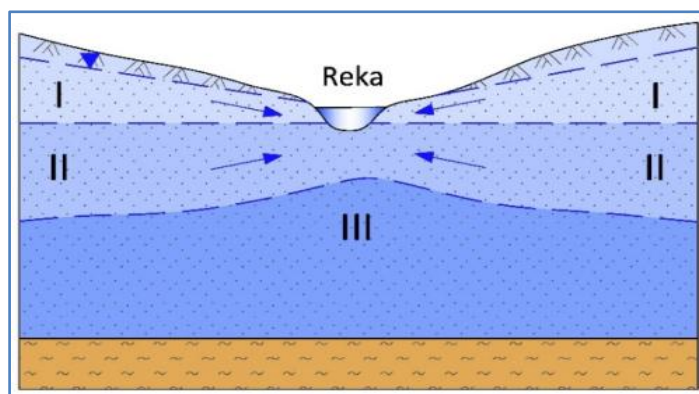
## VIII DEO

**-HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA-  
-UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA-**

## 12. HIDRODINAMIČKA ZONALNOST PODZEMNIH VODA

Iz prethodnog izlaganja o uslovima i načinima hranjenja i dreniranja izdani, zaključujemo da postoje razlike u pogledu hidrodinamičkih svojstava i brzine vodozamene PV u vertikalnom profilu izdani, odnosno, hidrogeološke strukture. Ove razlike se ispoljavaju kao *hidrodinamička zonalnost PV*. Karakteristike hidrodinamičke zonalnosti konkretnog područja formiraju se pod uticajem sledećih faktora (Dragišić, 1997): 1-*prostornog odnosa između oblasti hranjenja i dreniranja PV*; 2-*geološko-tektonske građe područja*; 3-*poroznosti, vodopropusnosti i izdašnosti vodonosne sredine*; 4-*otkrivenosti (prema atmosferi) i dubine zaleganja vodonosne sredine*; 5-*reljefa terena i dubine usecanja rečnih tokova*; 6-*klimatskih karakteristika podneblja*.

Na osnovu intenziteta/brzine vodozamene PV, u vertikalnom profilu se, načelno, izdvajaju tri hidrodinamičke zone (slika 12.1): **I-Zona intenzivne vodozamene**, **II- Zona usporene vodozamene** i **III-Zona veoma usporene vodozamene**.



**Slika 12.1. Šema hidrodinamičke zonalnosti PV** [20]: I- zona intenzivne vodozamene; II- zona usporene vodozamene; III- zona veoma usporene vodozamene

U načelu, sa povećanjem dubine, otežava se i hranjenje i dreniranje PV, umanjuje se poroznost i vodopropusnost stena, pa samim tim i brzina kretanja PV i intenzitet vodozamene.

Kvantitativno vrednovanje (intenziteta) vodozamene, može da se iskaže preko *koeficijenta vodozamene* ( $K_v$ ):

$$K_v = \frac{Q}{Q_w} \quad (12.1)$$

gde je:  $Q$ - zapremina godišnjeg podzemnog oticaja iz posmatrane izdani (hidrogeološke strukture);  $Q_w$  - ukupna zapremina PV u posmatranoj izdani (hidrogeološkoj strukturi).

Zona intenzivne vodozamene je najplića, otvorena je prema atmosferi i ostvaruje prisnu hidrauličku vezu (hranjenje-dreniranje) sa površinskim vodotocima i akumulacijama. Odlikuju je *obilno hranjenje i dreniranje i velika brzina filtracije PV*. U vertikalnom profilu, ova zona se, okvirno, prostire do dubina dna korita većih reka ili površinskih akumulacija. Zavisno od konkretnih geoloških, geomorfoloških i hidrometeoroloških svojstava područja, debljina ove zone može da

dostigne i više stotina metara, npr., u brdsko-planinskim, intenzivno karstifikovanim terenima. PV vode ove zone su malomineralizovane i nalaze svoju primenu kao resursi za vodosnabdevanje (piće) i navodnjavanje poljoprivrednog zemljišta. U načelu, *potpuna vodozamena u ovoj zoni izvrši se za manje od sto godina* ( $K_v > 0.01$ ).

*Zona usporene vodozamene* obuhvata delimično otkrivene vodonosne sredine, na dubinama ispod zone aktivnog dreniranja PV, odnosno, ispod kote usecanja korita reka i akumulacija, pa je i efekat dreniranja ove zone značajno manji. U poređenju sa zonom intenzivne vodozamene, PV se kreću znatno sporije i odlikuju se povišenim mineralizacijama i temperaturama. *Potpuna vodozamena odvija se u okvirnom intervalu od sto do milion godina* ( $K_v = 1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-6}$ ).

*Zona veoma usporene vodozamene* je najdublja, sa gotovo potpuno ograničenim mogućnostima za obnavljanje rezervi PV ( $K_v < 1 \times 10^{-6}$ ). PV su termalne, visokomineralizovane (rasolne), najčešće konatne, često sa izrazito povišenim koncentracijama određenih hemijskih elemenata ili jedinjenja.

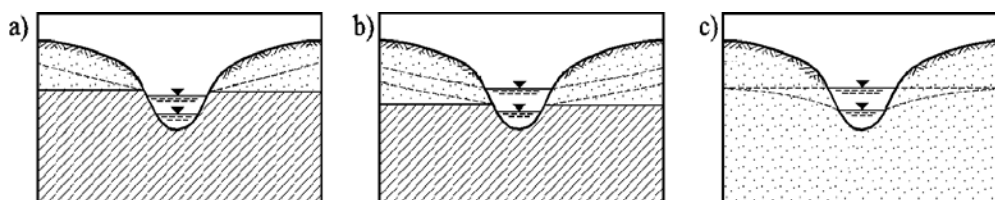
Iz prethodnog izlaganja je uočljivo da je *hidrodinamička zonalnost praćena hidrohemijском zonalnošću*, odnosno, da se dužina "boravka" PV u podzemlju i njihovog kontakta sa stenama kroz koje se filtriraju, odražava na njihov hemijski sastav i veličinu mineralizacije. O ovome, kao i o vezi termalnosti PV sa dubinom, više reči će biti u IX delu.

### **13. UZAJAMNI ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA**

O odnosu između izdani i površinskih voda već je bilo reči u prethodnim poglavljima, tako da izlaganje u nastavku predstavlja nadgradnju već izloženog. Izdvajaju se **два osnovna vida ovih odnosa** : **1- u kontinentalnim oblastima** i **2- u primorju**.

#### **13.1.ODNOSI IZDANI I POVRŠINSKIH VODA U KONTINENTALNIM OBLASTIMA**

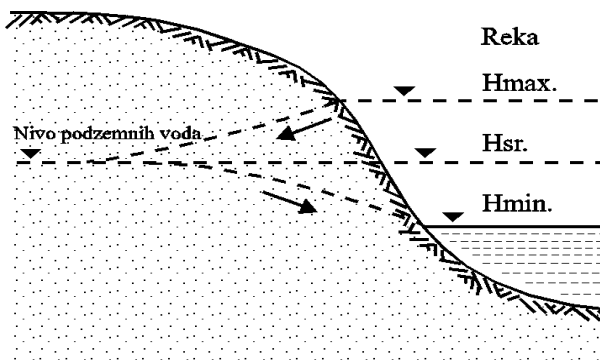
Uzajamni odnosi izdani i površinskih voda su raznovrsni i uslovljeni su nizom prirodnih i antropogenih faktora: geološkom građom područja/sliva, hidrogeološkim karakteristikama, morfologijom dolina reka ili akumulacija, dubinom usecanja rečnih korita, karakteristikama godišnjeg hidro-meteorološkog ciklusa, antropogenim izmenama terena (hidrotehnički objekti (brane, nasipi, kanali, drenaže podzemnih voda), urbanizacija, intenzivna poljoprivreda, rudarska aktivnost i dr.). U načelu,  *mogu da se izdvoje tri osnovne šeme njihove uzajamne hidrauličke veze*: **1- hidraulička veza odsustvuje** (slika 13.1.1.a); **2- postoji povremena hidraulička veza** (slika 13.1.1.b) i **3- hidraulička veza je postojana** (slika 13.1.1.c).



**Slika 13.1.1. Osnovne šeme uzajamnog odnosa izdani i površinskih voda [17]**

Kada postoji, veza izdani i površinskih voda odvija se kroz dva suprotna procesa: **1-** dreniranje izdani u površinske tokove/akumulacije i **2-** hranjenje izdani na račun infiltracije površinskih voda. Ovakav vid uzajamne hidrauličke veze najbolje je izražen kod plitkih zbijenih izdani sa slobodnim nivoom, koje su formirane u rečnim i jezerskim dolinama.

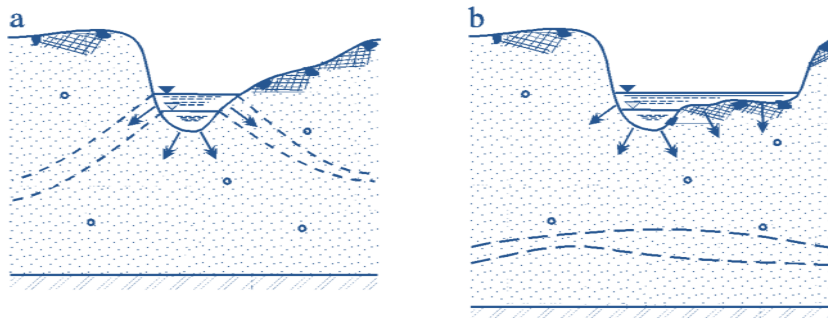
U oblastima sa vlažnom i umerenom klimom, karakter uzajamne hidrauličke veze se menja tokom godine. U periodu niskih rečnih vodostaja ( $H_{min}$ ), reke imaju ulogu prirodnog drena, pa se njihov (površinski) oticaj najvećim delom (ili u celosti) formira na račun dreniranja aluvijalne izdani, duž rečnog toka, odnosno, nivo PV je nagnut ka reci (slika 13.1.2).



**Slika 13.1.2. Tipični nivoi i smerovi kretanja voda u oblastima sa vlažnom i umerenom klimom [17]**

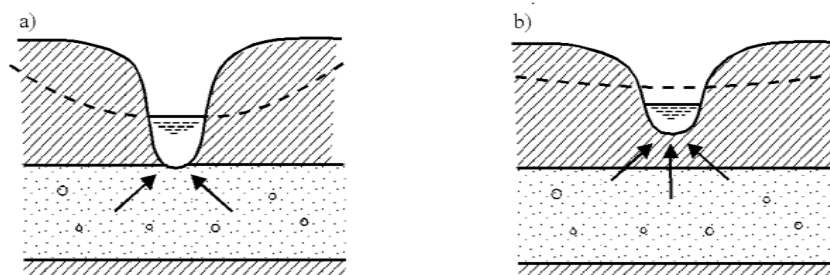
U sezoni padavina ili topljenja snega, rečni vodostaj (koji, zbog odsustva otpora porozne sredine, raste brže od nivoa PV) dostiže svoj maksimum ( $H_{max}$ ) i tada se uspostavlja obrnuta smer hidrauličke veze - od reke ka izdani (slika 13.1.2). Nakon perioda povodnja, nivo reke postepeno opada, do minimalnog ( $H_{min}$ ), kada se ponovo uspostavlja dreniranje izdani u reku.

U aridnim oblastima, u terenima izgrađenim pretežno od (debelih) peskovitih naslaga, nivo PV najčešće ima nagib od reke, odnosno, rečne vode se infiltriraju do nivoa izdani (slika 13.1.3.a), ili se nivo izdani nalazi na većoj dubini, pa nema direktne hidrauličke veze (slika 13.1.3.b).



**Slika 13.1.3. Šeme odnosa površinskih voda i izdani u aridnim oblastima [82, 17 – delimično izmenjeno]: a – hidraulička veza postoji (“reka hrani izdan”); b – nema direktne hidrauličke veze**

Kod duboko usečenih rečnih korita, može da se ostvari i veza između površinskih i voda *artenske izdani* (slika 13.1.4).

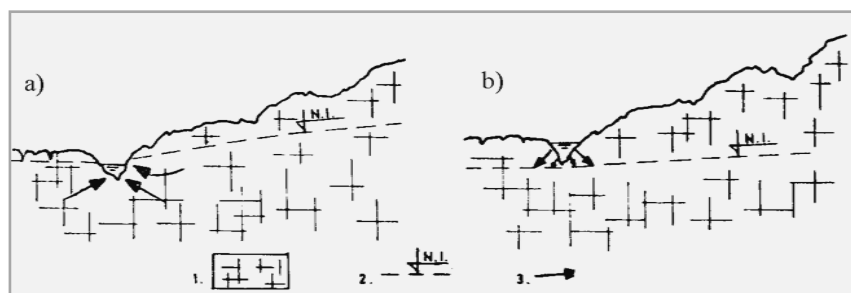


**Slika 13.1.4. Šeme hidrauličke veze površinskih voda i arteske izdani [17-delimično izmenjeno]: a– preko rečnog korita usečenog u arteskou izdan; b- kroz relativno vodo(ne)propusni deo povlate arteske izdani**

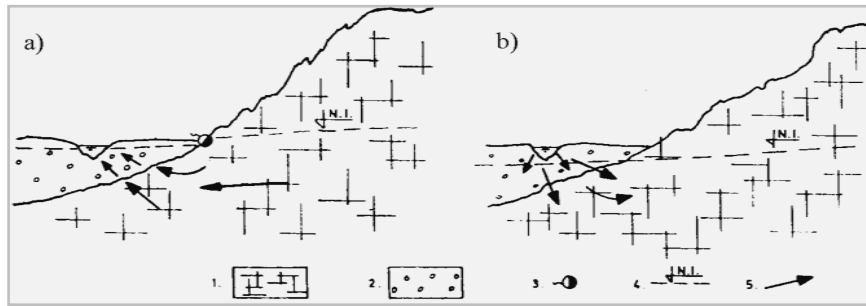
U karstnim terenima, odnosi površinskih voda i izdani uglavnom su veoma kompleksni i dinamični i zavise od stepena i dubine razvijenosti karsta, dubina i sezonskih oscilacija nivoa karstne izdani, prostornog odnosa sa nekarstnim formacijama i dr. Osnovna specifičnost infiltracije u karstu je (naglo) poniranje površinskih tokova, sa velikim kapacitetima “gutanja” ponora koji mogu da iznose i više desetina  $m^3/s$  vode.

Da li će, u određenom periodu, površinski tokovi ili akumulacije postojati ili ne, zavisi od odnosa između količine vode dospele na karstni teren i infiltracionog kapaciteta stena. U sušnim periodima godine, većina površinskih tokova i akumulacija u karstu presušuje, a površinske vode, dotekle sa susjednih nekarstnih terena, poniru ubrzo po stupanju na karstnu podlogu.

U načelu, hidraulička veza nepresušanih površinskih tokova (ili akumulacija) i karstne izdani može da bude *neposredna* i *posredna*. *Neposredna* se ostvaruje kod rečnih (ili jezerskih) korita usečenih u krečnjačke stene, bez prisustva aluvijalnih (ili jezerskih klastičnih) naslaga (13.1.5). *Posredna* veza se ostvaruje posredstvom vodopropusnih aluvijalnih (ili jezerskih klastičnih) naslaga (slika 13.1.6).



**Slika 13.1.5. Šema neposredne hidrauličke veze površinskih voda i karstne izdani [79-delimično izmenjeno]: a) “izdan hrani reku” u uslovima visokih nivoa PV; b) “reka hrani izdan” u uslovima niskih nivoa PV; 1- karstifikovani krečnjaci; 2- nivo karstne izdani; 3- smer kretanja vode**



**Slika 13.1.6. Šema hidrauličke veze površinskih voda i karstne izdani posredstvom vodopropusnog aluvijalnog nanosa [79-delimično izmenjeno]: a) "izdan hrani reku"; b) "reka hrani izdan"; 1- karstifikovani krečnjaci; 2- aluvijalni nanos; 3- karstno vrelo; 4- nivo izdani; 5 - smer kretanja vode**

## 13.2. ODNOS IZDANI I POVRŠINSKIH VODA U PRIMORJU

Hidraulička veza koja se ostvaruje između morske vode i izdani u priobalju može da ima dve posledice: 1- *zaslanjivanje malomineralizovanih izdanskih voda zbog prodora (intruzije) morske vode u priobalje* i 2- *„zaslađivanje“ morske vode u zonama dreniranja izdani*.

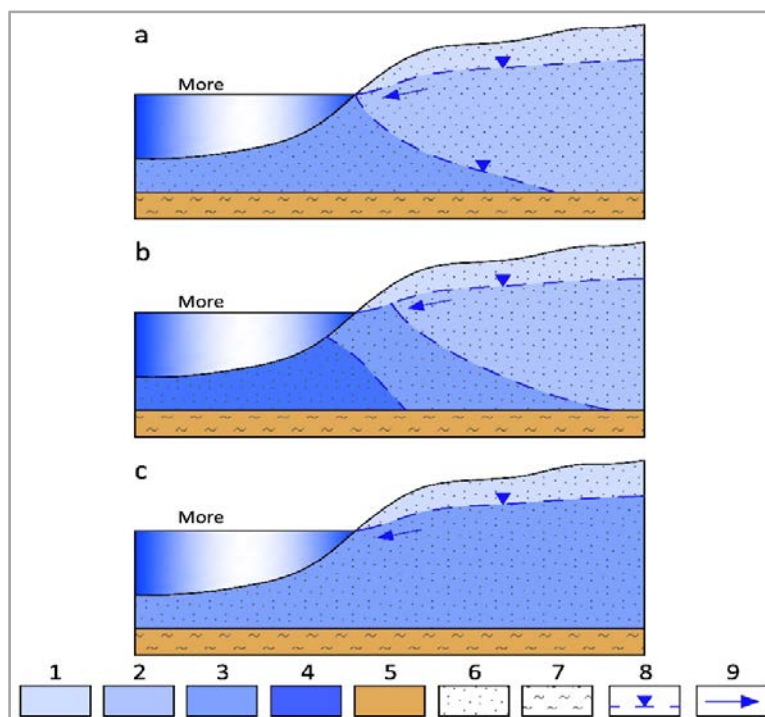
Karakter i posledice ove veze zavise od: vodopropusnosti i strukturnog tipa poroznosti stena koje izgrađuju priobalje (obalu i morsko dno), sezonskih hidrometeoroloških uslova, hipsometrijskog položaja i gradijenta nivoa izdani, režima plime i oseke, saliniteta mora i dr.

Ova veza je naročito „intenzivna“ kod primorskih karstnih izdani, zbog specifične strukture poroznosti stena i dimenzija karstnih kanala, kojima se, u periodima visokih nivoa izdani, PV brzo transportuje prema drenažnoj zoni, gde se, preko vrulja ili priobalnih karstnih vrela, vrši obilno i brzo dreniranje izdani i osetno zaslađivanje morske vode. Nakon pražnjenja i značajnog sniženja nivoa izdani, u sušnom periodu, smer veze se menja, pa tada (gušća) morska voda prodire u izdan i zaslanjuje je.

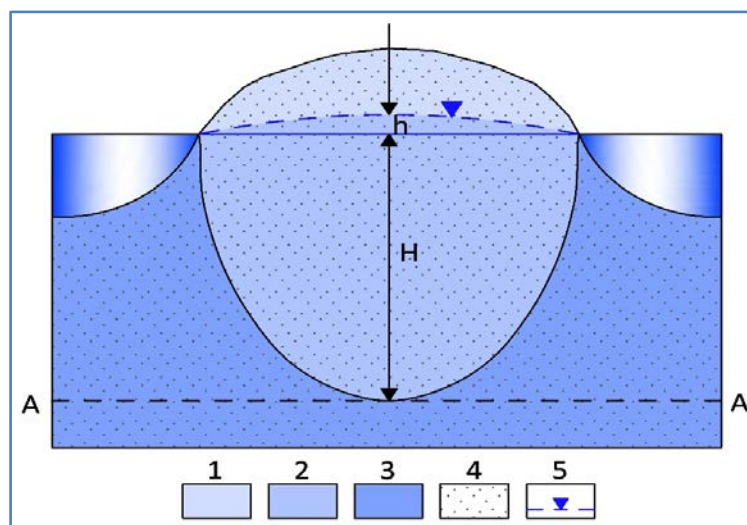
Tipični odnosi na relaciji more-primorska izdan, mogu da se šematizuju kao na slici 13.2.1.

Problem zaslanjivanja primorskih/ostrvskih slatkovodnih izdani je prevashodno praktične prirode, zbog ograničenih mogućnosti zahvatanja i korišćenja (slatkih) PV. Primarni pristup ovom problemu jeste dobra šematizacija međusobnih prostornih i hidrauličkih odnosa slanih i slatkih voda. Kada su u pitanju zbijene izdani, njihov međusobni odnos se šematizuje tako da slatkovodni deo izdani (PV manje gustine) poput sočiva „pluta“ na zaslanjenim PV, koje se odlikuju većom gustinom (slika 13.2.2).





**Slika 13.2.1. Osnovne šeme uzajamnih odnosa (razgraničenja i mešanja) izdanskih i morskih voda** [37, 20-delimično izmenjeno]: a– oštra granica; b– postoji prelazna (bočatna) zona; c– postepeno zaslanjivanje (granica ne postoji); 1– nadizdanska zona; 2– izdanska zona sa slatkim vodama; 3– izdanska zona sa bočatnim vodama; 4– izdanska zona sa slanim vodama; 5– vodonepropusna podina izdani; 6– pesak; 7– glina; 8– nivo PV; 9– smer kretanja PV



**Slika 13.2.2. Odnos slatkih i slanih voda na ostrvima i primorju** [11, 20]: 1– nadizdanska zona; 2– slatkovodna izdanska zona; 3– izdanska zona sa slanim vodama; 4– pesak; 5– nivo izdani

Dubina do granice razdvajanja slanah i slatkih voda, odnosno, debljina slatkovodne izdanske zone, određuje se na osnovu *Giben-Herbergovog zakona*:

$$H\rho'_w = H + h \quad (12.2)$$

odakle je:

$$H = 38 h \quad (\text{za } \rho'_w = 1.026 \text{ g/cm}^3 \text{ i } \rho_w = 1.000 \text{ g/cm}^3) \quad (12.3)$$

gde je: **H**– debljina slatkovodne izdanske zone ispod nivoa mora; **h**– debljina slatkovodne izdanske zone iznad nivoa mora;  $\rho'_w$  – gustina slane PV;  $\rho_w$ – gustina slatke PV.

Ovakva šematizacija se zasniva na pretpostavci da nema (osetnijeg) mešanja slatkih i slanah voda duž granice kontakta/razdvajanja, što je, u načelu, moguće kod zbijenih izdani, koje se odlikuju malim brzinama kretanja PV i malim debljinama bočatne zone.

Najintenzivniji prodori slanah voda odvijaju se u karstne priobalne izdani, kod kojih, zbog same prirode/strukture poroznosti, velikih brzina kretanja PV i velikih kolebanja nivoa PV, gornja šematizacija nije primenjiva.

\* \* \*

#### Kontrolna pitanja:

- 1/ Pod uticajem kojih faktora se formiraju karakteristike hidrodinamičke zonalnosti nekog područja ?
- 2/ Koje tri hidrodinamičke zone mogu da se izdvoje u vertikalnom profilu ?
- 3/ Šta je koeficijent vodozamene ?
- 4/ Tri osnovne šeme uzajamne veze izdani i površinskih voda u kontinentalnim oblastima su...?
- 5/ Objasniti sezonsku promenljivost hidrauličke veze reka-izdan u uslovima umerene i vlažne klime.
- 6/ Koje dve posledice može da ima hidraulička veza površinske-podzemne vode, koja se ostvaruje u primorju ?
- 7/ Da li je uticaj slanah morskih voda veći u zbijenoj ili karstnoj izdani ? Zašto ?

IX DEO

**KVALITET PODZEMNIH VODA (1)**

## **14. UVODNE NAPOMENE**

Čista (bez primesa) voda je bezbojna i prozirna tečnost, bez ukusa i mirisa, koja ključa na 100°C, mrzne na 0°C i ima gustinu od 1 g/cm<sup>3</sup>. Sastoji se od 11,11 % vodonika i 88,89 % kiseonika. U prirodi postoje tri izotopa vodonika: <sup>1</sup>H –protijum i <sup>2</sup>H – deuterijum, koji su stabilni i <sup>3</sup>H – tricijum, koji je radioaktivan. I kiseonik ima tri izotopa: <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O i <sup>18</sup>O i svi su stabilni. Različitim kombinacijama ovih izotopa može da se formira 18 različitih molekula vode, ali je u prirodi daleko najzastupljenija (sa preko 99%) voda čiji su molekuli izgađeni od <sup>1</sup>H i <sup>16</sup>O. *U prirodi ne postoji "čista" voda. Sve prirodne vode predstavljaju vodene rastvore*, u kojima vrste i koncentracije rastvorenih materija zavise od velikog broja faktora.

U prethodnim izlaganjima o PV, u prvom planu je bio aspekt njihovog kvantiteta, odnosno, (raspoloživih) količina: počev od bilansa voda, preko poroznosti, hidrogeoloških svojstava stena i tipova izdani, do uslova hranjenja i dreniranja PV i njihovog međusobnog odnosa sa površinskim vodama, dok je *kvalitet PV* pominjan, uglavnom, uzgred. Pojam "**kvalitet PV**" veoma je kompleksan i njime je obuhvaćen veliki broj parametara, na osnovu čijih vrednosti (veličina) se izvodi ocena o kvalitetu PV i njenoj upotrebljivosti za određene namene: piće, navodnjavanje, prehrambene tehnologije, korišćenje u balneološke ili toplotno-energetske svrhe i dr. Pored toga, određeni kvalitet PV može da bude indikativan i u pogledu uslova i vremena njihovog formiranja, zatim, u pogledu prospekcije ležišta različitih vrsta mineralnih sirovina ili npr. neželjenog uticaja PV (korozija, inkrustacija) na konstruktivne elemente građevinskih i rudarskih objekata, vodovodnih sistema, bunarskih konstrukcija i dr.

**Prirodni kvalitet PV** generisan je uticajem sledećih agenasa: **1- atmosferskih padavina i površinskih voda** (tokova i slatkovodnih basena), čija infiltracija predstavlja osnovni vid hranjenja izdani; **2- stena i minerala u zemljinoj kori**, sa kojima PV, tokom svoje filtracije i, u manjoj meri, infiltracije, ostvaruje kontakt i hemijske interakcije; **3- organskih materija i mikroorganizama na i u tlu**, koje PV, u određenoj meri, apsorbuje tokom infiltracije; **4- dubine izdani i njene otvorenosti prema atmosferi i površini terena**, od kojih zavisi brzina vodozamene i dužina kontakta PV sa stenama kroz koje se filtriraju, što se značajno odražava na njihov hemijski sastav i veličinu mineralizacije; **5- magmatskih i tektonskih procesa**, koji na kompleksan način utiču na hidrogeohemijske i geotermalne uslove u zemljinoj kori, pa tako i na kvalitet PV; **6- voda mora i okeana**, koje, pri određenim uslovima, mogu osetno da utiču na kvalitet PV primorskih izdani.

Kada je prirodni kvalitet PV narušen antropogenim uticajem, govorimo o *zagađenju PV*. Formiranje kvaliteta PV počinje već u atmosferi, gde kišne kapi rastvaraju/apsorbuju gasove i čvrste materije, a nastavlja se po dospeću atmosferskih padavina na tlo, tokom infiltracije i filtracije PV. Na ovom putu, voda može da apsorbuje i neke *zagađujuće materije* (hemijske, mikroorganizme) koje su (nus)produkti ljudskih aktivnosti (rudarenje, industrijska i naftna postrojenja, intenzivna poljoprivreda, urbanizacija i dr.) i unese ih u izdan, čime se narušava prirodni kvalitet PV, odnosno, biva *zagađena*. To podrazumeva neupotrebljivost ili ograničenu upotrebljivost PV za različite ljudske potrebe, a prvenstveno za piće, korišćenje u poljoprivredi i prehrambenoj industriji.

Osnovni parametri kvaliteta PV su: **1- fizička svojstva; 2- hemijski sastav i 3- mikrobiološka svojstva**. Ispitivanje i određivanje parametara kvaliteta sprovodi se na uzorcima PV u, za to, specijalizovanim laboratorijama, dok manji broj parametara može da bude određen na samom terenu, pomoću odgovarajućih terenskih pribora. Za vode koje su namenjene za ljudsku upotrebu

(piće, vodosnabdevanje, prehrambena industrija, navodnjavanje zemljišta) postoje odgovarajući standardi kvaliteta, u vidu *maksimalnih dozvoljenih veličina/koncentracija* (tzv. "MDK") fizičkih svojstava, komponenti hemijskog sastava i vrsta i broja mikroorganizama.

## **15. FIZIČKA SVOJSTVA PODZEMNIH VODA**

Fizička svojstva PV, koja su neposredni pokazatelji njihovog kvaliteta su: *temperatura, prozračnost, boja, miris, ukus i elektroprovodljivost*. Osim temperature, sva ostala fizička svojstva PV u tesnoj su vezi sa njihovim hemijskim sastavom. Osim elektroprovodljivosti, sva ostala fizička svojstva mogu da se opažaju ljudskim čulima.

**Temperatura PV** varira u širokim granicama, u zavisnosti od fizičko-geografskih uslova i geološke građe terena, uslova prihranjivanja i dubine izdani i dr. faktora. U oblastima većitog leda, visokomineralizovane PV mogu da imaju temperaturu  $-5^{\circ}\text{C}$ , ponekad i nižu. Temperatura voda plićih izdani, na srednjim geografskim širinama, a zavisno od lokalnih klimatskih i hidrogeoloških uslova, varira od  $5$  do  $15^{\circ}\text{C}$ . Podzemne vode u zonama mladih vulkana i dubokih raseda mogu da imaju temperaturu iznad  $100^{\circ}\text{C}$  (gejziri Islanda, Japana, SAD i dr.). Dubokim (3-4 km) bušenjima otkrivene su pregrejane PV sa temperaturama od  $150^{\circ}\text{C}$  i višim.

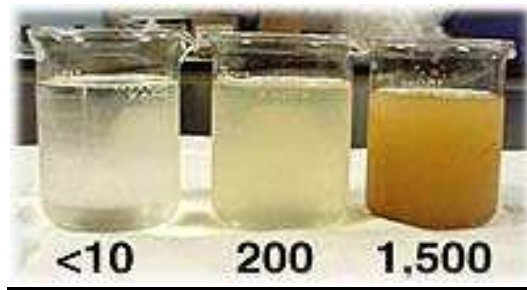
Najveća kolebanja temperature PV su kod plićih izdani, koje su najizloženije uticaju sezonskih hidrometeoroloških kolebanja. Ispod granice sezonskih kolebanja, nalazi se tzv. *neutralni pojas*, na dubini na kojoj se ne oseća uticaj sunčeve radijacije, niti dubinskog (endogenog, geotermalnog) toplotnog toka, tako da u njemu, praktično, nema sezonskih kolebanja temperature. Dubina zaleganja neutralnog pojasa na evropskom kontinentu je, okvirno, 12-15,5 m, a temperatura PV i geološke sredine je bliska prosečnoj godišnjoj temperaturi vazduha konkretnog područja. Ispod neutralnog pojasa, temperatura se, u načelu, povećava sa dubinom u skladu sa *geotermnim stepenom*.

**Geotermni stepen** je parametar kojim se definiše trend porasta temperature zemljine kore (pa time i temperature PV) sa dubinom, u konkretnoj oblasti. Prosečna veličina ovog parametra u zemljinoj kori iznosi oko  **$33\text{m}/1^{\circ}\text{C}$** . Od ovog proseka značajno odstupaju mlade vulkanske oblasti i oblasti većitog leda.

Optimalna temperatura voda za piće je  $8-12^{\circ}\text{C}$ . Vode sa nižim temperaturama ne deluju blagotvorno na ljudski metabolizam, dok vode sa višim temperaturama nisu osvežavajuće.

**Prozračnost (ili mutnoća) PV** zavisi prevashodno od količine u njoj suspendovanih i koloidnih mineralnih i organskih materija. Najveći deo PV je prozračan. Do замуćenja PV često dolazi na karstnim vrelima, nakon obilnih kiša ili intenzivnog topljenja snega, kada značajno uvećani i turbulentni proticaji PV kroz karstne kanale, podižu talog gline ili crvenice. Mera, odnosno, veličina prozračnosti (izražena u *NTU* – "nephelometric turbidity unit") određuje se *nefelometrijom*, laboratorijskom tehnikom propuštanja svetlosti kroz (zamućeni) uzorak vode (slika 15.1).

**Boja PV** zavisi od sadržaja mineralnih i organskih materija. PV su najčešće bezbojne. Tonove žute boje, PV dobijaju od organskih materija. PV tresetišta i blatišta, usled prisustva humusnih i fulvinskih kiselina, imaju žuto-mrku boju. Hidroksidi gvožđa, vodi daju žuto-crvenu, jedinjenja mangana-tamno sivu, a sulfata bakra-plavu boju. Voda za piće treba da bude bezbojna.



**Slika 15.1. Uzorci vode sa različitim veličinama NTU [99]**

**Miris PV** zavisi od sadržaja mineralnih i organskih materija i gasova. PV najčešće nemaju miris. Jedan od karakterističnih, neprijatnih mirisa vodi daje povišen sadržaj gasa  $H_2S$ . Ustajale vode u plitkim bunarima i blatištima, takođe imaju neprijatan miris. Miris, po pravilu neprijatan, vezan je, u najvećem broju slučajeva, za bakterijsko razlaganje organske materije. Voda za piće treba da je bez ikakvog mirisa, osim mineralnih voda koje su, na mestu pojavljivanja, preporučene za piće u ograničenim količinama.

I **ukus PV** zavisi od sadržaja mineralnih i organskih materija i gasova. Hidrokarbonati kalcijuma i magnezijuma, kao i povišen sadržaj  $CO_2$ , daju vodi prijatan ukus. Veće količine organskih materija u PV stvaraju sladunjav ukus, dok  $NaCl$  daje slan,  $MgSO_4$  i  $Na_2SO_4$  gorak, a povišen sadržaj gvožđa, lužast ukus. Ukus je, često, relativan, subjektivan pojam, jer zavisi od ukusa pojedinca.

*Prozračnost, boja, miris i ukus su organoleptička svojstva PV, koja često bivaju primarni indikatori njihovog zagađenja.*

PV su prirodni elektroliti i njihova **elektroprovodljivost** je direktno proporcionalna količini rastvorenih mineralnih materija. Iskazuje se veličinom *specifične električne provodljivosti* ( $\mu S/cm$ ).

## **16. HEMIJSKI SASTAV PODZEMNIH VODA**

PV su složeni hemijski rastvori, čija se mineralizacija (količina rastvorenih materija) koleba u granicama od nekoliko mg/l do nekoliko stotina g/l. U njima je potvrđeno prisustvo više desetina komponenti hemijskog sastava, u vidu prostih jona, nedisosovanih molekula, gasova, koloida i suspendovanih čestica. Raznovrstan hemijski sastav PV rezultat je njihovog uzajamnog dejstva sa materijama u litosferi, atmosferi i biosferi. PV rastvaraju stene i gasove, obogaćuju se produktima aktivnosti biljnog i životinjskog sveta, prenose rastvorenu materiju itd.

### **16.1. POREKLO RASTVORENIH MATERIJU U PODZEMNIM VODAMA**

U nastavku je dat detaljniji osvrt na to kako agensi formiranja (prirodnog) kvaliteta PV, koji su navedeni u poglavlju 14, doprinose formiranju hemijskog sastava PV.

**Atmosferske padavine** imaju nizak sadržaj rastvorenih mineralnih materija i gasova, u opsegu od nekoliko do nekoliko desetina mg/l. Antropogena emisija (gasova i čađi) i vulkanska aktivnost "obogaćuju" (zagađuju) atmosferu: ugljen-dioksidom, sumpor-dioksidom, amonijakom, metanom,

česticama prašine i dr., dok vetrovi u atmosferu unose čestice soli sa površine mora i okeana, kao i raznovrsne čestice tla. Na putu ka površini zemlje, padavine rastvaraju postojeću materiju i uvećavaju svoju mineralizaciju. U načelu, sadržaj rastvorenih materija u kiši ili snegu opada od početka padavina. Što su padavine intenzivnije, to je njihova mineralizacija manja.

**Vode rečnih tokova i slatkovodnih jezera** značajno utiču na formiranje hemijskog sastava PV u zoni intenzivne vodozamene, odnosno, u plićim izdanima, sa kojima su u prisnoj hidrauličkoj vezi.

**Stene i minerali** su najznačajniji izvor komponenti hemijskog sastava PV, kroz njihov međusobni neposredni kontakt u porama, kroz koje se PV kreće. Svaka stena, u određenoj meri, sadrži minerale koji su rastvorljivi ili podložni hemijskom raspadanju, pa je rastvaranje stena je najvažniji agens formiranja hemijskog sastava PV. Rastvaranje je posebno izraženo kod rastvorljivih naslaga halita, gipsa i anhidrita u kojima se, upravo rastvaračkim dejstvom vode, formiraju karakteristični karstni oblici. PV u ovakvim terenima imaju, po pravilu, povišenu mineralizaciju, sa dominantnim jonima natrijuma i hlora, u naslagama halita, odnosno, kalcijuma i sulfata, u naslagama gipsa i anhidrita.

Veliki deo stena zemljine kore sastoji se od minerala čija je rastvorljivost u vodi veoma niska: *karbonati, silikati, sulfidni minerali i dr.* Međutim, njihova rastvorljivost u PV se aktivira u prisustvu određenih (prirodnih) reagenasa:

- karbonatne stene, u prisustvu ugljendioksida, postaju jedan od glavnih izvora rastvorljive materije (kalcijuma i (hidro)karbonata) u PV
- praktično nerastvorljivi silikati, u prisustvu CO<sub>2</sub> i određenih sojeva bakterija, prelaze u vodeni rastvor, formirajući hidrokarbonatne ili silicijumske PV
- sulfidni minerali, u prisustvu kiseonika i određenih sojeva bakterija, oksidišu, pri čemu dolazi do obogaćivanja PV jonima SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i metalima (Fe, Cu, Mo, As, Zn, i sl.); takve vode imaju sniženu pH vrednost i agresivno/rastvarački deluju na okolne stene, što ih, opet, obogaćuje mineralnim materijama.

Više detalja o hemijskim reakcijama na relaciji PV – stena biće u nastavku.

**Organske materije**, koje predstavljaju produkte ili ostatke živih organizama, u PV dospevaju iz humusa, lesa, tresetišta, naslaga uglja, bituminoznih stena, nafte, nekih karbonatnih stena i dr. Rastvaranje organskih materija dovodi do povećanja koncentracija organskih kiselina, fenola i drugih organskih jedinjenja u PV. Pored toga, pojedine vrste organskih kiselina utiču na (hidrohemijsku) migrativnost elemenata, kao što su: Fe, Cu, Zn, U i dr.

Od **dubine izdani i njene otvorenosti prema atmosferi i površini terena**, zavisi brzina vodozamene i dužina kontakta PV sa stenama kroz koje se filtriraju, kao i (hidro)geohemijski uslovi sredine, što se značajno odražava na njihov hemijski sastav i veličinu mineralizacije. O hemijskoj zonalnosti PV u vertikalnom profilu, više reči će biti u nastavku.

**Magmatizam i tektonika**, *Magmatskom i, posebno, vulkanskom aktivnošću*, hemijske komponente iz dubljih delova Zemlje, dovode se u kontakt sa (relativno plitkim) PV. Karakteristične vulkanogene komponente u PV su gasovi i teški metali. Od gasova su zastupljeni: ugljendioksid, sumporvodoničnik,

kiseonik i vodonik, a od teških metala: Cu, Pb, Zn, Ni, Mo i dr. U kraterima vulkana, PV mogu da imaju izuzetno veliku kiselost (pH<2) i mineralizaciju (50-60 g/l).

*Tektonski rasedi* često su (privilegovani) putevi za kretanje PV, pri čemu se one „prelivaju“ iz jednog u drugi vodonosni horizont ili zonu i (mešanjem) menjaju svoj hemijski sastav. Isto tako, duž raseda se, ascedentno (iz dubokih delova terena), mogu kretati gasovi i drugi mineralni fluidi, koji dolaze u kontakt sa PV i obogaćuju njihov hemijski sastav.

O **morskim/okeanskim vodama**, koje, pri određenim uslovima, osetno utiču na kvalitet PV primorskih izdani, kao i o mehanizmima tog uticaja, već je bilo reči u poglavlju 13. Drugi aspekt su (takođe, već pomenute) duboke sedimentogene (konatne, fosilne) slane PV, koje su ostale “zarobljene” u slojevima formiranim u nekadašnjim morskim basenima i koje se, u uslovima veoma spore vodozamene, odlikuju izuzetno visokim mineralizacijama, sa dominantnim sadržajem hlorida.

## 16.2. FORMIRANJE HEMIJSKOG SASTAVA PODZEMNIH VODA

Detaljniji osvrt je dat na *hemijske reakcije u sistemu PV-stena* i na *hidro-(geo)hemijsku zonalnost PV*, kao najznačajnije agense/mehanizme formiranja hemijskog sastava PV.

### 16.2.1. Osnovne hemijske reakcije u sistemu voda-stena

Osnovne hemijske reakcije koje se odvijaju u sistemu voda-stena su (Dragišić i Živanović, 2014): ***rastvaranje minerala, taloženje, kompleksacija, redoks reakcije, sorpcija i jonska izmena.***

Voda je jedan od najboljih rastvarača u prirodi. Pod **hemijskim rastvaranjem minerala** podrazumeva se prevođenje mineralne materije, u vidu jona, u vodeni rastvor. Minerali su jonska jedinjenja, čije rastvaranje znači raskidanje jonske veze (između pozitivnih i negativnih jona) u kristalnoj rešetki (tabela 16.2.1.1), odnosno, njihovo međusobno udaljavanje i prevođenje u rastvor, pri čemu rastvoreni joni bivaju okruženi molekulima vode i hidratišu.

**Tabela 16.2.1.1. Reakcije i proizvodi rastvaranja pojedinih minerala [26, 20 - delimično izmenjeno]**

<b>Minerali</b>	<b>Reakcije</b>
<b>Soli:</b> -halit -silvin -fluorit	$\text{NaCl} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ $\text{KCl} \leftrightarrow \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ $\text{CaF}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^-$
<b>Sulfati:</b> -gips -anhidrit	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CaSO}_4 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
<b>Karbonati:</b> -kalcit -dolomit -siderit	$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$ $\text{FeCO}_3 \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
<b>Silikati:</b> - kvarc, kalcedon	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Si}(\text{OH})_4$
<b>Feldspati</b>	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 7\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{AlSiO}_4$

**Hemijsko taloženje** je proces koji je suprotan rastvaranju i predstavlja prevođenje (rastvorenih) supstanci iz vodenog rastvora u čvrstu fazu. Može da bude inicirano: *zasićenošću rastvora, promenom temperature i pritiska, promenom redoks uslova, promenom koncentracije rastvorenih gasova i dr.*



**Kompleksacija** je formiranje kompleksnog jedinjenja u vodenom rastvoru, koje se ostvaruje povezivanjem jedinjenja sa manjkom elektrona i jedinjenja sa viškom elektrona.

**Redoks reakcije**, odnosno, procesi *oksidacije (otpuštanje elektrona)* i *redukcije (primanja elektrona)*, od velikog su značaja za formiranje hemijskog sastava PV. U ovim procesima, značajnu ulogu mogu da imaju mikroorganizmi, kada ih zovemo *biohemijskim redoks reakcijama* (tabela 16.2.1.2).

**Tabela 16.2.1.2. Primeri biohemijskih redoks reakcija [60, 20 - delimično izmenjeno]**

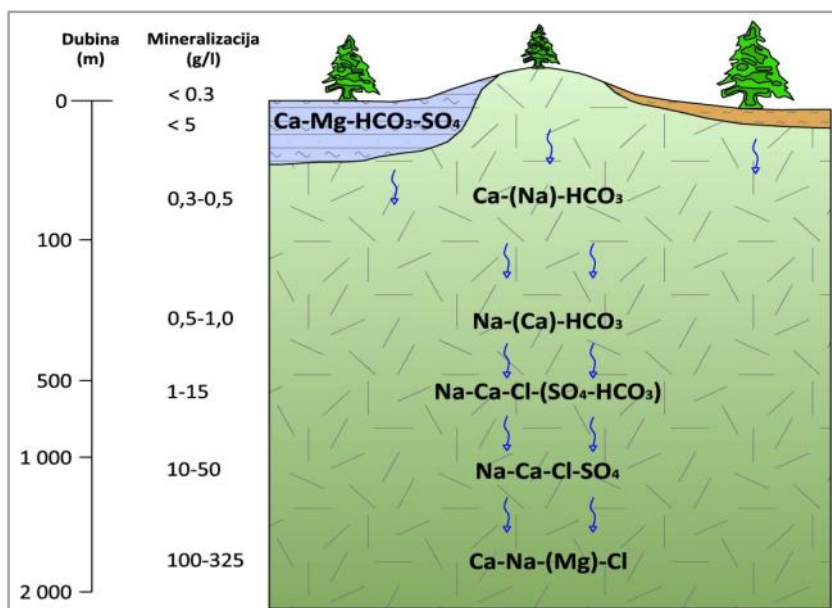
Denitrifikacija: $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{5}\text{NO}_3^- + \frac{1}{5}\text{H}^+ = \frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{10}\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \frac{7}{20}\text{H}_2\text{O}$
Redukcija mangana: $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{MnO}_2(\text{s}) + \text{H}^+ = \frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{Mn}^{2+} + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$
Redukcija gvožđa: $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{H}^+ = \frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \text{Fe}^{2+} + \frac{11}{4}\text{H}_2\text{O}$
Redukcija sulfata: $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{8}\text{H}^+ = \frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{8}\text{HS}^- + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$
Generacija metana: $\frac{3}{4}\text{H}_2\text{O} = \frac{1}{8}\text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{8}\text{CH}_4$
Oksidacija gvožđa: $\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4}\text{O}_2(\text{g}) + 5\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 2\text{H}^+$
Oksidacija sulfida: $\frac{1}{8}\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \frac{1}{4}\text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{4}\text{H}^+$
Nitrifikacija (a): $\frac{1}{6}\text{NH}_4^+ + \frac{1}{4}\text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{6}\text{NO}_2^- + \frac{1}{3}\text{H}^+ + \frac{1}{6}\text{H}_2\text{O}$
Nitrifikacija (b): $\frac{1}{2}\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{2}\text{NO}_3^-$

**Sorpcija** je reverzibilna reakcija, u kojoj se rastvoreni joni, iz vodenog rastvora, vezuju za površinu čvrstih čestica porozne sredine (*adsorpcija*) i obrnuto – odvajanje supstance od čvrste faze i vraćanje u rastvor (*desorpcija*). Sorpcija zavisi od karakteristika porozne sredine: poroznosti, veličine čestica, sadržaja gline i dr., kao i od karakteristika rastvorenih jona. **Jonska**, odnosno, **katjonska izmena** je srodna sorpciji i predstavlja zamenu katjona sa površine čestice stene sa katjonima iz vodenog rastvora. Jedan od najčešćih slučajeva je da se joni **Ca<sup>2+</sup>** iz PV adsorbuju na čestice porozne sredine, a joni **Na<sup>+</sup>** sa čvrste faze prelaze u PV.

### 16.2.2. Hidro-geohemijska zonalnost

Uslovljena je dubinom zaleganja PV i njihovom otvorenosti prema atmosferi i površini terena, od kojih zavisi brzina vodozamene i dužina kontakta PV sa stenama, kao i oksido-redukcioni, sorpcioni i dr. hemijski uslovi geološke sredine i njena temperatura. Sve ovo se značajno odražava na hemijski sastav i veličinu mineralizacije PV. Hemijska zonalnost PV, u vertikalnom profilu, najbolje je izražena u starim (tektonikom i magmatizmom neporemećenim) *kristalastim štitovima* (slika 16.2.2), kao i u okviru debelih (neporemećenih) sedimentnih kompleksa *arteskkih basena*.

U načelu, u najplićoj zoni (intenzivne vodozamene) preovlađuju malomineralizovane hidrokarbonatno-kalcijumske ( $\text{HCO}_3^-$ -Ca), ređe magnezijumske vode. Sa dubinom, hidrokarbonatni anjoni ( $\text{HCO}_3^-$ ) bivaju postepeno smenjivani sulfatima ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), uz povećanje ukupne mineralizacije PV, dok, u najdubljim zonama, sa visoko-mineralizovanim PV, najčešće preovlađuju hloridi (Cl).



**Slika 16.2.2. Hidrohemijska zonalnost kanadskog kristalastog štita [29, 20]**

Kod katjona, ova vertikalna zonalnost nije toliko izražena. Na većim dubinama, u procesima katjonske izmene, najčešće  $\text{Ca}^{2+}$  u PV biva zamenjen natrijumom ( $\text{Na}^+$ ) iz stena.

Odstupanja od ovakve šematizacije hemijske zonalnosti PV, pa čak i inverzije, postoje u oblastima sa savremenom magmatskom/tektonskom aktivnošću, u naftonosnim i aridnim područjima i dr.

### 16.3. OSNOVNI POKAZATELJI HEMIZMA PODZEMNIH VODA

Veličine osnovnih pokazatelja (parametara) hemizma PV nisu direktni pokazatelji prisustva različitih komponenti u PV, već su indikativni u pogledu hidro-geohemijskih uslova sredine i pružaju osnovnu predstavu o mogućem prisustvu i migraciji pojedinih komponenti hemijskog sastava PV. *Osnovni pokazatelji su: ukupna mineralizacija, tvrdoća, pH vrednost i redoks potencijal.*

**Ukupnu mineralizaciju** čini suma svih čvrstih (mineralnih i, u manjoj meri, organskih) komponenti rastvorenih u PV. Veličina joj se određuje na osnovu (neisparenog) *suvog ostatka*, nakon laboratorijskog isparavanja uzorka PV na temperaturi od  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Izražava se u *mg/l ili g/l*.

Postoji veliki broj klasifikacija PV na osnovu ukupne mineralizacije, a jedna od češće navođenih je prikazana u tabeli 16.3.1. Kod većine njih se, kao *malomineralizovane*, izdvajaju PV sa *mineralizacijom do 1 g/l* (koja predstavlja i preporučenu gornju granicu za vode za svakodnevno pijenje), dok se, za graničnu vrednost između voda visoke mineralizacije i rasola, uglavnom uzima 35 g/l, što je veličina prosečnog saliniteta morske vode na Zemlji.

**Tabeli 16.3.1. Klasifikacija podzemnih voda na osnovu veličine ukupne mineralizacije [31-adaptirano]**

Tip vode	Mineralizacija (mg/l)
Niske mineralizacije	<1.000
Neznatne mineralizacije	1.000 – 3.000
Umerene mineralizacije	3.000 – 10.000
Visoke mineralizacije	10.000 – 35.000
Rasoli	>35.000

**Tvrdoća** (ili ukupna tvrdoća) **PV** rezultat je prisustva određenih komponenti hemijskog sastava:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  i dr. Pored ukupne tvrdoće, razlikujemo karbonatnu (ili privremenu) i nekarbonatnu (ili stalnu) tvrdoću. Karbonatna tvrdoća je posledica rastvorenih bikarbonata kalcijuma i magnezijuma, dok nekarbonatna odražava prisustvo rastvorenih hlorida, sulfata i nitrata kalcijuma i magnezijuma.

U domaćoj praksi, veličina tvrdoće vode se najčešće izražava u nemačkim stepenima (°dH):

$$1^{\circ}\text{dH} = 10 \text{ mg/l CaO} = 7,2 \text{ mg/l MgO} = 0,357 \text{ mg.ekv/l Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \quad (16.3.1)$$

Jedna od češće korišćenih klasifikacija voda na osnovu tvrdoće data je u tabeli 16.3.2.

**Tabela 16.3.2. Klasifikacija voda prema tvrdoći - po Klutu [17]**

Tvrdoća (°dH)	Klasa vode
0 - 4	Veoma meka
4 - 8	Meka
8 - 12	Umereno tvrda
12 - 18	Dosta tvrda
18 - 30	Tvrda
> 30	Vrlo tvrda

**pH vrednost** pokazuje aktivnost/koncentraciju jona vodonika u PV. Vodonik je najrasprostranjeniji hemijski element u hidrosferi, a njegova koncentracija u velikoj meri generiše i karakteriše hidrohemijske procese. Koncentracija jona vodonika u vodenim rastvorima, nezavisno od njihovog porekla, određuje se preko jonskog proizvoda vode:

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}^+][\text{OH}^-] \quad (16.3.2)$$

Veličina  $K_{\text{H}_2\text{O}}$  je postojana i u značajnoj meri zavisna od temperature, a u manjoj meri od pritiska. Pri temperaturi od 25°C, jonski proizvod vode iznosi  $10^{-14}$

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14} \quad (16.3.3)$$

U neutralnom rastvoru (vodi) koncentracije jona  $H^+$  i  $OH^-$  su jednake, što znači da je koncentracija jona vodonika  $10^{-7}$ , odnosno  $pH = 7$ . **Pri  $pH < 7$  rastvor je kiseo**, a pri  **$pH > 7$  - bazni**. Praktično, vrednost  $pH$  jednaka je stepenu koncentracije vodonikovih jona, sa obrnutim predznakom. Bez obzira kakva je reakcija rastvora, proizvod koncentracije jona  $H^+$  i  $OH^-$  je postojan.

Disocijacija molekula vode, koja se, u PV, odvija u beznačajnom obimu, praktično nema uticaja na  $pH$  vrednost, već je ista u najvećoj meri uslovljena sadržajem ugljene kiseline i njenih jona, prisustvom organskih kiselina, gasova, mikroorganizama, hidrolizom soli teških metala i dr. Veličina  $pH$  kod PV varira u širokom opsegu, okvirno 2-11, a najčešće je 5-8. Vode za piće treba da imaju  $pH=6.5 - 8.5$ .

**Redoks potencijal PV (Eh)** je mera stepena oksidacije ili redukcije u ispitivanoj hidrogeološkoj sredini. Izražava se u milivoltima (mV). Kod (prirodnih) PV, varira u opsegu od -400 do +700 mV. Negativne vrednosti Eh svojstvene su za redukcionu sredinu, a pozitivne za oksidacionu, dok vrednosti  $Eh = 100-300$  mV, ukazuju na sredine sa prelaznim oksido-redukcionim uslovima. Eh vrednost utiče na  $pH$  vrednost, kao i na uslove migracije određenih hemijskih komponenti u PV.

#### 16.4. KOMPONENTE HEMIJSKOG SASTAVA PODZEMNIH VODA

Komponente (sastojci) hemijskog sastava PV su brojne i raznovrsne. U tabeli 16.4.1. prikazane su i, na osnovu zastupljenosti i hidrohemijskog značaja, klasifikovane, do sada poznate komponente hemijskog sastava PV. Ovom tabelom nisu obuhvaćene organske materije, gasovi, kao ni izotopi pojedinih hemijskih elemenata koji su od značaja za određivanje starosti, porekla i uslova formiranja PV, o kojima će, takođe, biti reči u nastavku.

Najzastupljenije glavne ili primarne komponente, koje određuju mineralizaciju i hemijski tip PV su: glavni anjoni ( $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ), glavni katjoni ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  i  $Mg^{2+}$ ), i jedinjenja silicijuma. Komponente koje ne određuju osnovni hemijski sastav PV, ali formiraju njihove specifične tipove, nazivaju se sporednim ili sekundarnim komponentama:  $K^+$ ,  $Fe^{2+(3+)}$ ,  $B$ ,  $Sr$ ,  $F$ ,  $CO_3^{2-}$  i jedinjenja azota. Glavne i sporedne komponente čine grupu makrokomponenti.

Sve ostale komponente, odnosno, hemijski elementi, nazivaju se mikrokomponentama i(li) komponentama u tragovima, zato što, generalno, imaju (veoma) niske koncentracije. Iako ne određuju hemijski tip PV, imaju uticaj na formiranje njihovih specifičnih hemijskih svojstava.

##### 16.4.1. Glavne komponente

###### Glavni anjoni

**Hidrokarbonat ( $HCO_3^-$ ) ili bikarbonat** je najzastupljeniji anjon u malo-mineralizovanim PV, gde najčešće dospeva kao proizvod rastvaranja karbonata kalcijuma (i magnezijuma), uz prisustvo ugljen-dioksida:



Tabela 16.4.1. Komponente hemijskog sastava PV [8, 32, 20 –delim. izmenjeno]

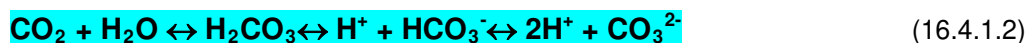
MAKROKOMPONENTE		Cink (Zn)	Niobijum (Nb)
GLAVNE kompon. (>5 mg/l)	Sporedne kompon. (0,01–10,0 mg/l)	Fosfat (PO <sub>4</sub> )	Olovo (Pb)
		Galijum (Ga)	Kalaj (Sn)
Kalcijum (Ca)	Kalijum (K)	Germanijum (Ge)	Kobalt (Co)
Magnezijum (Mg)	Gvožđe (Fe)	Hrom (Cr)	Rubidijum (Rb)
Natrijum (Na)	Stroncijum (Sr)	Indijum (In)	Rutenijum (Ru)
Hidrokarbonat (HCO <sub>3</sub> )	Bor (B)	Iterbijum (Yb)	Selen (Se)
Hlorid (Cl)	Fluor (F)	Itrijum (Y)	Skandijum (Sc)
Sulfat (SO <sub>4</sub> )	Karbonat (CO <sub>3</sub> )	Jod (J)	Srebro (Ag)
Jedinjenja Silicijuma	Jedinjenja azota	Kadmijum (Cd)	Talijum (Tl)
<b>Mikrokomponente i komponente u tragovima (&lt;0,1 mg/l)</b>		Kalaj (Sn)	Titanijum (Ti)
		Kobalt (Co)	Torijum (Th)
Aluminijum (Al)	Berilijum (Be)	Lantan (La)	Uran (U)
Antimon (Sb)	Bizmut (Bi)	Litijum (Li)	Vanadijum (V)
Arsen (As)	Brom (Br)	Mangan (Mn)	Volfram (W)
Bakar (Cu)	Cerijum (Ce)	Molibden (Mo)	Zlato (Au)
Barijum (Ba)	Cezijum (Cs)	Nikl (Ni)	Živa (Hg)

Hidrokarbonati su deo karbonatnog sistema u PV, koji (pored HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) čine i: CO<sub>2</sub> (ugljen-dioksid), CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (karbonatni jon) i H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ugljena kiselina) i čije su koncentracije, u PV, u tesnoj vezi sa njenom pH vrednošću (tabela 16.4.1.1).

Tabela 16.4.1.1. Procentualni sadržaji komponenti karbonatnog sistema u zavisnosti od pH vrednosti PV – na 20 °C [24, 20 – delim. izmenjeno]

pH	Ugljena kiselina (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Hidrokarbonatni jon (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Karbonatni jon (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )
3,00	99,96	0,04	
4,00	99,60	0,4	
5,00	96,00	4,0	
6,00	70,60	29,4	
6,38	50,00	50,00	
7,00	5,20	94,80	
8,00	2,30	97,70	
9,00		96,00	4,00
10,00		70,6	29,40
10,38		50,0	50,00
11,00		5,2	94,80
12,00		2,3	97,70

Dinamički balans između komponenti karbonatnog sistema zove se karbonatna ravnoteža:



**Sulfati ( $SO_4^{2-}$ )** u PV najčešće dospevaju kao proizvod rastvaranja gipsa ( $CaSO_4 \cdot H_2O$ ) i anhidrita ( $CaSO_4$ ), ili oksidacijom sulfida u rudnim ležištima. Sumpor ulazi u sastav organskih jedinjenja, pa i pliče PV mogu da sadrže sulfate. Na većim dubinama, gde izostaje kiseonik, prisustvo  $SO_4^{2-}$  je retko. U aridnim oblastima, sulfati dospevaju u PV pri rastvaranju zaslanjenih tla, koja sadrže gips i neke druge vrste sulfata.

**Hloridi ( $Cl^-$ )** se odlikuju visokom migrativnošću, s obzirom da ne formiraju teško rastvorljive soli. Njihov glavni izvor u PV je NaCl. Sadržaj jona  $Cl^-$  u malo-mineralizovanim PV vlažnog klimata iznosi 5-20 mg/l, a aridnog, 100-300 mg/l. Najveći deo hloridnih PV formira se u starim morskim basenima, u kojima je, tokom procesa sedimentacije, „zarobljen“ deo morske vode. Rasolne (konatne) vode mogu da sadrže i do 200 g/l hloridnih jona.

### Glavni katjoni

**Natrijum ( $Na^+$ )** je prisutan u svim PV, posebno u dubljim izdanima. Njegove visoke koncentracije svojstvene su za konatne i PV sonih ležišta. U PV magmatskih i metamornih kompleksa dospeva rastvaranjem natrijumovih feldspata i feldspatoida. Već pomenutim procesom jonske izmene, jone  $Ca^{2+}$  iz PV zamenjuju  $Na^+$  joni glinovitih stena. U malo-mineralizovanim PV koncentracije  $Na^+$  su u rangu od nekoliko mg/l do oko 200 mg/l. U načelu, sa povećanjem mineralizacije PV, raste i sadržaj  $Na^+$ , tako da u rasolnim vodama može da iznosi do 25 g/l.

Prisustvo **kalcijuma ( $Ca^{2+}$ )** svojstveno je za malo-mineralizovane hidrokarbonatne i sulfatne PV i visoko-mineralizovane hloridne PV. Njegov glavni izvor u PV su karbonatne stene (krečnjaci, mermeri i dolomiti), amfiboli, feldspati, pirokseni, aragonit, minerali glina i gips-anhidritske stene. U načelu, u malo-mineralizovanim PV, njegovi sadržaji su manji od 100 mg/l, dok u rasolima može da ima koncentraciju i do 75 g/l.

**Magnezijum ( $Mg^{2+}$ )** je, u načelu, u PV zastupljen u manjim koncentracijama od  $Ca^{2+}$ , sa kojim deli slična hemijska svojstva. PV sa preovlađujućim magnezijum-katjonom su retke i uglavnom su vezane za peridotitsko-serpentiniteske stene. U PV najčešće dospeva iz magnezijumovih karbonata (magnezita i dolomita) i sulfata, silikata iz grupe serpentina, olivina i dr.

### Jedinjenja silicijuma

Nakon kiseonika, silicijum je najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori. Najčešće se javlja kao  **$SiO_2$**  (*silicijum-dioksid ili silika*), čija je slaba rastvorljivost razlog za relativno niske koncentracije silicijuma u PV, u kojima se javlja i u vidu *silicijumske kiseline ( $H_4SiO_4$  i  $H_3SiO_4^-$ )*. Osnovni izvor silicijuma u PV su silikatni minerali, minerali glina, amorfni silicijum, opal, rožnaci.

U načelu, koncentracije silicijuma u PV najveće su u zonama savremenog vulkanizma (reda veličine stotina mg/l) i u nekim rasolima (najveća do sada registrovana koncentracija je 4 g/l), dok se kod „običnih“ PV kreću u opsegu od nekoliko do nekoliko desetina mg/l.

## 16.4.2. Sporedne komponente

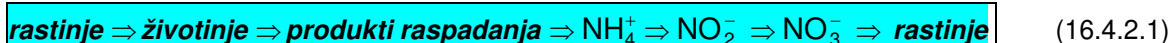
**Kalijum ( $K^+$ )** je, po hemijskim svojstvima, sličan jonu natrijuma, ali su njegove koncentracije u PV znatno niže, bez obzira na dobru rastvorljivost njegovih soli (KCl,  $K_2SO_4$  i dr). Razlog za to je

njegovo učešće u formiranju sekundarnih (glinovitih i dr.) minerala, a i biljke ga apsorbuju iz vode. Migrativnost u PV mu je niska, upravo zbog lake adsorpcije od strane glina.

U PV dospeva rastvaranjem soli kalijuma (koje učestvuju u građi sonih ležišta) i kalijumovih feldspata magmatskih stena. U malo-mineralizovanim PV, maksimalne koncentracije ovog jona su do 10% u odnosu na jon  $\text{Na}^+$ . U vodama termalnih izvora njegove koncentracije dostižu 100 mg/l, a u rasolima do 25 g/l.

**Karbonatni jon ( $\text{CO}_3^{2-}$ )** je, kako je već rečeno, deo karbonatnog sistema i u PV je manje zastupljen od  $\text{HCO}_3^-$ . Koncentracija  $\text{CO}_3^{2-}$  u PV u tesnoj je vezi sa pH vrednošću (tabela 16.4.1.1).

**Jedinjenja azota** se, u PV, javljaju u vidu jona  $\text{NH}_4^+$  (amonijum jon),  $\text{NO}_2^-$  (nitrit-jon) i  $\text{NO}_3^-$  (nitrat-jon). Kruženje azota (ili azotni ciklus) se, u prirodi, odvija po sledećoj šemi:



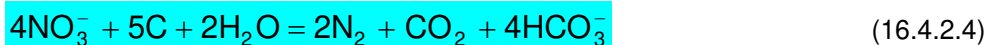
Rezultat preobražaja složenih organskih jedinjenja je amonijum jon ( $\text{NH}_4^+$ ), koji je, u prisustvu kiseonika (u plićim izdanima) nepostojan i koji, u prisustvu bakterija *Nitrosomonas*, oksidiše (nitrifikuje) po šemi:



Nitritni joni ( $\text{NO}_2^-$ ) su nepostojani i, dalje, oksidišu u nitratne jone:



U anaerobnim uslovima, proces je obrnut – *denitrifikacija*, pri čemu se izdvaja slobodan azot:



Povišene koncentracije  $\text{NH}_4^+$  mogu da se jave u dubljim izdanima arteskkih basena i u vezi su sa ležištima nafte i gasa. Ovaj jon može da bude i neorganskog porekla.

Povišene koncentracije nitrit-jona ( $\text{NO}_2^-$ ) u PV indikator su prisustva patogenih bakterija, odnosno, zagađenja.

Nitrat-jon ( $\text{NO}_3^-$ ) u PV ukazuje na potpunu oksidaciju azotovih jedinjenja. Veštačka azotna đubriva, sa poljoprivrednih površina, jedan su od glavnih izvora *nitrata* u PV i jedan od najzastupljenijih vidova zagađenja PV.

**Gvožđe** je, po zastupljenosti, četvrti element u Zemljinoj kori, ali su mu koncentracije u PV relativno niske, zbog slabe rastvorljivosti njegovih jedinjenja: oksida (hematit, magnetit i dr.), hidroksida (limonit i dr.), sulfida (pirit, halkopirit i dr.), karbonata i silikata. U PV se javlja u vidu dva katjona:  **$\text{Fe}^{3+}$  (feri-jon)** i  **$\text{Fe}^{2+}$  (fero-jon)**. Načini migracije gvožđa u PV zavisi od Eh i pH vrednosti. U jako kiselim sredinama (Eh>600mV, pH<3), gvožđe migrira u vidu  $\text{Fe}^{3+}$ , ali u neznatnim koncentracijama. Najčešće migrira u vidu kompleksa, sa jonima  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  i  $\text{SO}_4^{2-}$ , kao i sa organskim kompleksima. Migracija u formi  $\text{Fe}^{2+}$  odvija se u PV sa povišenim koncentracijama  $\text{CO}_2$ .

U prisustvu kiseonika,  $Fe^{2+}$  je nepostojan i lako prelazi u  $Fe^{3+}$ . Reakcija  $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$  široko je rasprostranjena u prirodi i ima veliki hidro-geohemijski značaj. U većini slučajeva se odvija uz učešće gvožđevitih bakterija.

Sadržaji gvožđa u „običnim“ PV, po pravilu su manji od 0,5 mg/l. Kisele vode termalnih vulkanskih izvora, kao i rudničke vode sulfidnih ležišta, mogu da sadrže i do nekoliko g/l gvožđa.

**Fluor** se, u prirodi, javlja u sastavu minerala fluorita, apatita, kriolita i liskuna, čijim rastvaranjem dospeva u PV, gde, najčešće, migrira u vidu anjona **F**. Njegove koncentracije, generalno, ne prelaze 10 mg/l. Najniže su u malomineralizovanim (slatkim) vodama bogatim humusnim jedinjenjima, dok se povišeni sadržaji sreću u pojedinim alkalnim vodama, termalnim vodama savremenih vulkanskih oblasti i rasolima.

**Bor se**, u prirodi, javlja u sastavu minerala borata, čijim rastvaranjem dospeva u PV, u vidu **borne kiseline** ( $H_3BO_3$ ) i (pri  $pH > 10$ ) anjona  $B(OH)_4^-$ . PV u savremenim vulkanskim oblastima, kao i one morskog porekla, sadrže veće količine bora.

**Stroncijum (Sr)** je zemnoalkalni metal, ali je u PV vidno manje prisutan od kalcijuma. U PV dospeva rastvaranjem njegovih karbonatnih i sulfatnih minerala: stroncijanita ( $SrCO_3$ ) i celestina ( $SrSO_4$ ). Koncentracije u PV su, uglavnom, niže od 1 mg/l, ali, sa povećanjem mineralizacije PV, načelno, raste i njegov sadržaj, pa u nekim rasolima može dostići i nekoliko g/l.

\* \* \*

#### Kontrolna pitanja:

- 1/ Prirodni kvalitet PV generisan je uticajem sledećih agenasa...?
- 2/ Koji su osnovni parametri kvaliteta PV ?
- 3/ Navesti fizička svojstva PV ?
- 4/ Od čega zvisi elektroprovodljivost PV ?
- 5/Kako brzina vodozamene utiče na hemijski sastav PV ?
- 6/ Navesti i ukratko objasniti osnovne hemijske reakcije u sistemu voda-stena ?
- 7/ U kojim geološkim strukturama je najbolje izražena hidrohemijska zonalnost ? Zašto ?
- 8/ Navesti osnovne pokazatelje hemijskog sastava PV ? U kojim jedinicama se iskazuje tvrdoća PV ?
- 9/ Kako se određuje i u kojim jedinicama se iskazuje veličina ukupne mineralizacije PV ?
- 10/ Navesti glavne i sporedne makrokomponente hemijskog sastava PV.
- 11/ Koja jedinjenja čine karbonatni kompleks u hemijskom sastavu PV ? Kakav uticaj ovde ima pH ?
- 12/ Ukratko opisati kruženje azota u prirodi. Na šta ukazuju povišene koncentracije  $NO_2^-$  i  $NO_3^-$  u PV ?



X DEO

## KVALITET PODZEMNIH VODA (2)

### 16.4.3. Mikrokomponente u podzemnim vodama

Ne određuju hemijski tip PV, ali mogu da imaju značajan uticaj na formiranje njihovog specifičnog kvaliteta - npr. vode sa povišenim sadržajem jedne ili nekoliko *mikrokomponenti* mogu da budu deklarirane kao prirodne mineralne vode, pogodne (preporučene) za balneološke tretmane kupanjem i(li) pijenjem. U PV je otkriveno više desetina mikrokomponenti u vidu : prostih jona, molekula, koloidnih i lebdećih čestica, kao i u vidu minerala i organskih kompleksa.

Izvori mikrokomponenti u PV najčešće su rudni minerali (Zn, Cu, Pb, Ag, Mo, U, As), akcesorni minerali (Be, Se), organske materije (J, Mo), morska voda (J), kao i magmatske, metamorfne i halogene stene (Li, Rb, Cs). Mikrokomponente mogu imati i izrazito visoke koncentracije u PV: jod i litijum u rasolnim vodama, a bakar, cink i mangan, u izrazito kiselim rudničkim vodama.

O vodama specifičnog kvaliteta (ne samo u pogledu povišenih sadržaja mikrokomponenti) biće više reči u poglavlju 19.

### 16.4.4. Organske materije u podzemnim vodama

To su supstance čiju osnovu građe čini ugljenik, a koje potiču od ostataka ili životnih produkata biljaka, životinja i mikroorganizama. U plitke izdani dospevaju pod uticajem spoljnih (prirodnih i antropogenih) faktora, dok su, u dubokim izdanima, genetski vezane za samu geološku, odnosno, vodonosnu sredinu. PV u zoni (dubokih) naftnih ležišta bogate su organskim materijama i njihov sadržaj može dostići i stotine mg/l. Tipična komponenta PV naftnih ležišta su *naftenske kiseline*.

PV plitkih izdani sadrže brojne organske komponente, od kojih su najzastupljenije *huminske materije*, koje čine 80-90 % sadržaja od ukupne organske materije (humusa) u zemljištu i u koje spadaju: *huminske i fulvinske kiseline i humini*

*Huminske kiseline* su supstance koje su rastvorljive u baznoj sredini. U (prirodnoj) vodi su obično u vidu koloida, asocirane sa mineralima glina ili oksidima gvožđa i aluminijuma. U molekulu huminskih kiselina nalaze se karboksilne, estarske, etarske, fenolne, alkoholne, karbonilne grupe. *Fulvinske kiseline* se bolje rastvaraju (od huminskih) i u vodi su u rastvorenom stanju. *Humini* su heteropolimeri sa značajnim sadržajem bitumena, koji su (bez obzira na pH vrednost sredine) praktično nerastvorni u vodi.

Prisustvo huminskih materija u sirovoj vodi za piće je nepoželjno, zato što joj menjaju organoleptičke osobine (žućkasta boja, neprijatan miris), kao i zbog toga što se, hlorisanjem vode, iz njih generišu toksična organohlorna jedinjenja. Sadržaj im se određuje preko utroška  $\text{KMnO}_4$  ili  $\text{O}_2$  u uzorku vode.

### 16.4.5. Gasovi u podzemnim vodama

Rastvoreni ili slobodni, *gasovi u PV* mogu da budu različitog porekla: *iz atmosfere, produkti biohemijjskih procesa, produkti magmatizma, metamorfizma i radioaktivnosti*. Pri smanjenju pritiska, rastvoreni gasovi prelaze u slobodne. *Rastvorljivost gasova u vodi se smanjuje sa povećanjem temperature*, a rastvorljivost nekog gasa, na određenoj temperaturi, proporcionalna je njegovom parcijalnom pritisku, u skladu sa *Henrijevim zakonom*:

gde je:  $c$ – veličina rastvorljivost gasa,  $p$ – parcijalni pritisak i  $k$ – Henrijeva konstanta.

U gasove atmosferskog porekla, koji mogu da budu prisutni u PV, spadaju:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  i, ređe, plemeniti gasovi:  $Ne$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ ,  $Rn$ . Gasovi biohemijske geneze u PV su:  $H_2S$ ,  $CO_2$  i ugljovodonici:  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$  i  $C_4H_{10}$ .

U gasove koji su *produkti magmatizma i metamornih procesa* spadaju:  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  i dr., dok u one koji su *produkti radioaktivnih raspada* spadaju:  $He$ ,  $Ar$ ,  $Rn$  i dr.

Azot ( $N_2$ ) je najzastupljeniji gas u PV i uglavnom je atmosferskog porekla. Može da bude i proizvod vulkanskih i biohemijskih (razlaganje organske materije u ležištima nafte) procesa.

Kiseonik ( $O_2$ ) je, u PV, prvenstveno atmosferskog porekla, a može da bude i proizvod fotosinteze vodenog rastinja. Njegovo prisustvo u PV ima veliki biološki i geohemijski značaj. U dubini Zemljine kore, kiseonik se troši na oksidaciju organskih materija, gvožđa, sulfida i drugih materija, što dovodi do smanjenja njegove koncentracije, pa na dubinama ispod 1 km najčešće izostaje.

Ugljen-dioksid ( $CO_2$ ) je, u Zemljinoj kori, najčešće proizvod metamorfizma karbonatnih stena. Ovako generisani  $CO_2$  se, ascedentno (uzlazno), kreće duž (tektonskih) raseda i dospeva u (pliće) PV različitih geneza i tipova. Zavisno od pritiska i temperature, njegov sadržaj u PV je 1–3000 mg/l, retko i do 20 g/l. Velike količine  $CO_2$  troše se pri rastvaranju karbonatnih i silikatnih stena i formiranju malomineralizovanih hidrokarbonatnih voda, u zoni intenzivne vodozamene. PV sa povišenim koncentracijama  $CO_2$  zovu se *ugljokiselim* (mineralnim) vodama ili „*kiseljacima*“.

Vodonik ( $H_2$ ), u PV, može da bude proizvod: disocijacije vode, razlaganja organskih materija i hidrolize sulfata teških metala (Fe, Cu, Al i dr), u zonama oksidacije ležišta sulfida. Prisutan je i u dubokim PV (redukciona sredina) i u oblastima savremenog vulkanizma.

Vodoniksulfid ( $H_2S$ ). U dublje izdani dospeva kao proizvod anaerobnog razlaganja organskih jedinjenja koja sadrže sumpor. U PV egzistuje u vidu rastvorenog  $H_2S$ , jona  $HS^-$  (hidrosulfid) i  $S^{2-}$  (sulfid). U dubokim delovima Zemljine kore,  $H_2S$  je produkt razlaganja sumporovih jedinjenja i redukcije sulfata, pri visokim temperaturama i pritiscima.

Od *ugljovodonika*, metan ( $CH_4$ ) je najčešća komponenta gasnog sastava PV. Prisutan je u (dubljim) PV naftonosnih i ugljonosnih oblasti. U plitkim PV ga ima u zonama močvara, blatišta i tresetišta.

Od *plemenitih gasova*, u PV se najčešće javljaju oni koji su produkti radioaktivnog raspada: *helijum* ( $He$ ), *argon* ( $Ar$ ) i *radon* ( $Rn$ ).

#### 16.4.6. Izotopski sastav i radioaktivnost podzemnih voda

*Nestabilni nuklidi* (atomi/atomska jezgra), koji imaju tendenciju ka spontanoj promeni u druge vrste nuklida, kroz različite reakcije raspada (dezintegracija) i emisije radioaktivnog zračenja, zovu se *radionuklidi ili radioaktivni izotopi*. Njihovo svojstvo (tendencija) da prelaze u stabilnija stanja (uz oslobađanje energije) naziva se *radioaktivnost*.

Pored radioaktivnih, postoje i *stabilni izotopi*, koji *ne ispoljavaju radioaktivnost*, a mogu da budu njen produkt. Kako je već rečeno, u stabilne izotope spadaju i  $^2\text{H}$  (D),  $^{17}\text{O}$  i  $^{18}\text{O}$ , koji, u građi molekula prirodnih voda, učestvuju sa manje od 1%.

*Prema poreklu, izotopi mogu da budu prirodni i veštački. U prirodne izotope spadaju oni koji su poreklom iz Zemljine kore i oni koji su kosmičkog porekla. U veštačke izotope spadaju oni koji su generisani prilikom nuklearnih proba i tokom rada nuklearnih elektrana i oni mogu da budu značajni zagađivači životne sredine: vazduha, površinskih voda, tla, vegetacije, PV.*

**Radioaktivnost PV.** Osim retkih izuzetaka, sve PV su, u određenom stepenu, radioaktivne. Sadržaj prirodnih radionuklida u PV je znatno manji nego u stenama. Migrativnost i sadržaj radionuklida u PV zavisi od više faktora: *njihovih fizičko-hemijskih svojstava, geohemijskih uslova sredine (pH, Eh), hemizma PV, mineralošog/hemijskog sastava stena, poroznosti stena i dr.* Od prirodnih radionuklida, u PV su najzastupljeniji: uran, radijum i radon.

Uran se javlja u vidu nekoliko izotopa, od kojih je  $^{238}\text{U}$  najrasprostranjeniji. U PV dospeva iz uranovih minerala, koji učestvuju u građi kiselih magmatskih i pojedinih sedimentnih stena. Najveće koncentracije urana javljaju se u zonama ležišta urana kao i u aridnim regionima, gde, do njegovog koncentrisanja, dolazi usled povećane evapotranspiracije. Migrativnost urana najveća je u kiselim (rudničkim) vodama, u zoni oksidacije, a najmanja u redukcionim sredinama.

Od četiri izotopa radijuma, najčešće se javlja  $^{228}\text{Ra}$ , čiji su sadržaji u PV znatno niži od uranovih.

Već pomenuti plemeniti gas radon je najzastupljeniji prirodni radionuklid u PV. To je nevidljiv gas, bez ukusa i mirisa, teži od vazduha. Javlja se u vidu tri izotopa, a preovlađujući je  $^{222}\text{Rn}$ , koji nastaje emanacijom radijuma. Povećane koncentracije radona u PV vezane su za zone intenzivne ispucalosti i većih razloma, za ležišta urana i fosfata i za kisele magmatske stene.

Radioaktivnost PV određuje se preko broja reakcija raspada, tokom određenog vremena i izražava se u **Bq/l** (*Bekerele po litru*). Kao i za ostale komponente hemijskog sastava, za vode za ljudsku upotrebu, postoje definisane MDK.

**Izotopski sastav PV.** Iako, formalno, predstavlja odliku njihovog kvaliteta (hemijskog sastava), *izotopski sastav PV* voda nije (primarno) pokazatelj mogućnosti njihovog korišćenja za određene potrebe, već *služi za ocenu njihove starosti, porekla, uslova formiranja, brzine vodozamene i dr.* (tabela 16.4.6.1).

Od stabilnih izotopa, u hidrološkim, klimatološkim i hidrogeološkim istraživanjima, najčešću primenu imaju, ranije već pomenuti, stabilni teški izotopi vodonika i kiseonika: *deuterijum (D) i kiseonik-18 ( $^{18}\text{O}$ )*. U načelu, količina D i  $^{18}\text{O}$  u prirodnim vodama se menja prilikom njihovog zagrevanja, hlađenja i promena agregatnih stanja. Najstabilniji (najjednorodniji) izotopski sastav ima okeanska voda na dubinama većim od 500m i, iz te činjenice, proistekla je ideja da se, njen izotopski sastav, usvoji kao standard/referenca, na osnovu koga se sadržaj D i  $^{18}\text{O}$ , u prirodnim vodama, izražava u relativnim jedinicama. Pun naziv ovog standarda bio je (*eng.*) **Standard Mean Ocean Water** ili, skraćeno, **SMOW** [5]. Od 1967. godine, na osnovu novijih statističkih podataka, ovaj standard je „rekalibrisan“ i preimenovan u **Vienna Standard Mean Ocean Water - VSMOW**.

**Tabela 16.4.6.1. Primena pojedinih izotopa u hidrogeološkim istraživanjima [76, 20 – delim. izmenjeno]**

Izotop	Period polurasp. (god.)	Primena u hidrogeološkim istraživanjima
<sup>2</sup> H	stabilan	Interpretacija paleoklimatskih uslova i nadm. visine područja hranjenja PV.
<sup>3</sup> H	12,3	Određivanje starosti, reda do 40 godina, i vremena putovanja PV.
<sup>3</sup> He	stabilan	Prisustvo PV iz dubljih delova Zemljine kore.
<sup>13</sup> C	stabilan	Određivanje porekla ugljenika u PV.
<sup>14</sup> C	5,730	Određivanje starosti PV reda 500–50.000 godina
<sup>18</sup> O	stabilan	Interpretacija paleoklimatskih uslova hranjenja PV. Geotermalna aktivnost.
<sup>32</sup> Si	100	Određivanje starosti podzemnih voda reda 50–500 godina.
<sup>36</sup> Cl	3,01·10 <sup>5</sup>	Određivanje starosti podzemnih voda reda 5·10 <sup>4</sup> –2·10 <sup>6</sup> godina
<sup>39</sup> Ar	269	Određivanje starosti PV reda 100–1.000 godina
<sup>40</sup> Ar	stabilan	Njegovo prisustvo ukazuje na veliku starost PV i geotermalnu aktivnost.
<sup>81</sup> Kr	2·10 <sup>5</sup>	Određivanje starosti PV reda 5·10 <sup>4</sup> –2·10 <sup>6</sup> godina
<sup>85</sup> Kr	10,4	Određivanje starosti PV reda 1–20 godina.
<sup>129</sup> X	1,7·10 <sup>7</sup>	Identifikacija porekla PV i njihove starosti reda 5·10 <sup>6</sup> –4·10 <sup>7</sup> godina.

Izotopski sastav prirodnih voda izražava se u *promilima* (‰) odstupanja od (V)SMOW-a i iskazuje kao  $\delta D$  za deuterijum, odnosno,  $\delta^{18}O$ , za teški kiseonik-18, preko sledećih odnosa:

$$\delta D(\text{‰}) = \frac{\left(\frac{D}{^1H}\right)_{\text{uzorka}} - \left(\frac{D}{^1H}\right)_{\text{vsmow}}}{\left(\frac{D}{^1H}\right)_{\text{vsmow}}} \cdot 1000 \quad (16.4.6.1)$$

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{uzorka}} - \left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{vsmow}}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{vsmow}}} \cdot 1000 \quad (16.4.6.2)$$

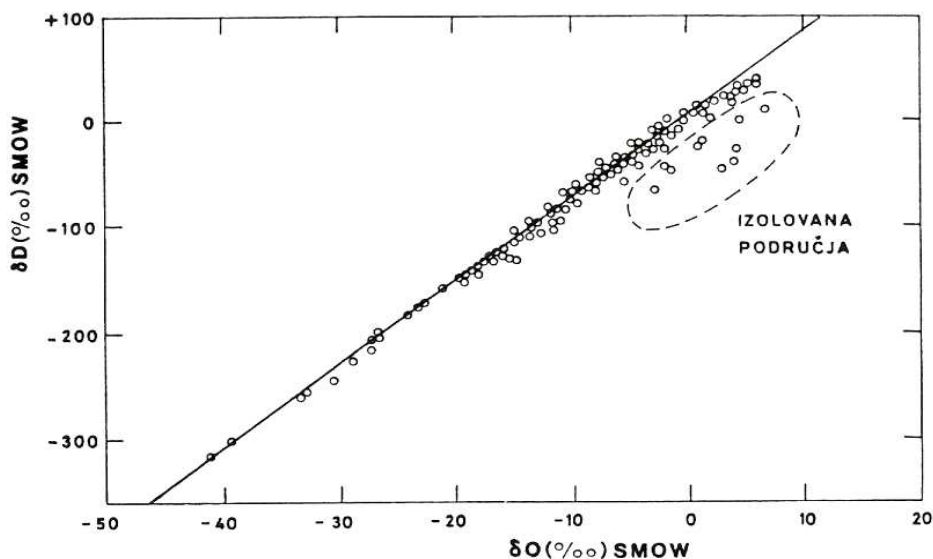
Neka osnovna načela preraspodele izotopa vodonika i kiseonika u prirodnim vodama su:

- Prilikom isparavanja (pri kome "energizirani" molekuli vode prelaze iz tečnog u stanje vodene pare), laki izotopi molekula vode (sačinjeni od <sup>1</sup>H i <sup>16</sup>O) pokreću se i transformišu u paru mnogo brže od teških. Kao rezultat toga, *vodena para je bogatija lakim izotopima vodonika i kiseonika, a preostala voda u tečnoj fazi bogatija je teškim izotopima.*
- *Koncentracija teških izotopa u prirodnim vodama smanjuje se sa povećanjem geografske širine i sa povećanjem nadmorske visine.* Najmanja koncentracija D i <sup>18</sup>O je u padavinama planinskih i oblasti sa hladnom klimom, kao i u polarnom ledu, dok se njihove najveće koncentracije beleže u površinskim i podzemnim vodama aridnih oblasti.

Na osnovu ispitivanja velikog broja uzoraka prirodnih voda (padavina, reka, jezera) u Svetu, ustanovljen je sledeći (prosečni) linearni odnos između koncentracija  $\delta D$  i  $\delta^{18}O$  u njima:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10 \quad (16.4.6.3)$$

Ovaj odnos grafički je prikazana u vidu "Globalne meteorske linije voda"-GMLV (slika 16.4.6). Meteorske linije voda različitih regiona, razlikuju se od globalne i međusobno (tabela 16.4.6.2).



Slika 16.4.6. Globalna meteorska linija voda:  $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$  [5]

Tabela 16.4.6.2. Linearni odnosi  $\delta D$  i  $\delta^{18}O$  kod meteorskih linija voda pojedinih svetskih regiona [51, 20 – delim. izmenjeno]

Region	Meteorska linija
Severna hemisfera, kontinentalni deo	$\delta D = (8,1 \pm 1)\delta^{18}O + (11 \pm 1)$
Mediteran i Srednji istok	$\delta D = 8\delta^{18}O + 22$
Primorski Alpi (April 1976)	$\delta D = (8,0 \pm 0,1)\delta^{18}O + (12,1 \pm 1,3)$
Primorski Alpi (Oktobar 1976)	$\delta D = (7,9 \pm 0,2)\delta^{18}O + (13,4 \pm 2,6)$
Severoistočni Brazil	$\delta D = 6,4\delta^{18}O + 5,5$
Severni Čile	$\delta D = 7,9\delta^{18}O + 9,5$
Tropska ostrva	$\delta D = (4,6 \pm 0,4)\delta^{18}O + (0,1 \pm 1,6)$

PV plitkih izdani dobro se "uklapaju" u GMLV, s obzirom na njihovu blisku prostornu i hidrauličku vezu sa padavinama i površinskim vodama. Međutim, kod dubokih izdani, posebno onih sa visokotermalnim vodama, izotopski sastav voda više odstupa od GMLV, odnosno od inicijalnog (meteorskog) sastava, ali je, na osnovu brojnih istraživanja, utvrđeno da su i one meteorskog porekla. Prema dosadašnjim saznanjima, meteorskog poreklo imaju i vode gejzira u savremenim vulkanskim oblastima, a ne juvenilno, što je bilo preovlađujuće stručno mišljenje do 60-ih godina prošlog veka [58].

## **17. MIKROORGANIZMI U PODZEMNIM VODAMA**

*Mikroorganizmi su heterogena grupa organizama, veličine manje od 0.1 mm (ne mogu se videti golim okom), za koju su svojstveni brzi rast i razmnožavanje i široka geografska rasprostranjenost. Načelno se razvrstavaju u tri grupe [75]:*

*1/prokarioti (bakterije i cijanobakterije); 2/eukarioti (alge, gljive i protozoe) i 3/bezćelijski – virusi*

**Bakterije** čine heterogenu grupu, uglavnom jednoćelijskih, mikroorganizama, prokariotske građe ćelije, čija je veličina 0.5-0.8  $\mu\text{m}$  i koji se javljaju u tri osnovna oblika: *loptastom (koke), štapićastom (bacili) i spiralnom (spirile)*. **Cijanobakterije (modrozeleno bakterije)** obuhvataju veliki broj vrsta, široko rasprostranjenih u vodi i zemljištu, koje, u toku fotosinteze, izdvajaju molekulski kiseonik. Sposobne su da fiksiraju molekulski azot iz vazduha i da, kao zelene biljke, redukuju  $\text{CO}_2$  do organske supstance, fotohemijskim putem.

**Alge** u svojim ćelijama poseduju hlorofil. Različita boja algi potiče od sadržaja drugih pigmenata. U plićim izdanima sreću se *zelene i dijatomejske alge*.

**Gljive** u osnovi imaju višećelijski micelijum. Hrane se organskim jedinjenjima. Rodovi: *Aspergillus* i *Penicillium* (plesni), aktivno učestvuju u razlaganju organskih materija u vodi i zemljištu.

**Protozoe (praživotinje)** su jednoćelijski životinjski organizmi, u koje spadaju: *amebe, foraminifere, radiolarije, paramecijum i dr.*

**Virusi** su najsitniji i, po građi, najjednostavniji mikroorganizmi. Isključivo su unutarćelijski paraziti jer nemaju sopstvenu ćelijsku strukturu. Razmnožavanje im je izrazito progresivno i jedinstveno u živom svetu. Napadaju bakterije, biljke, životinje, ljude.

Pored ove, osnovne klasifikacije, mikroorganizmi se klasifikuju i prema: *karakteristikama staništa u kome obitavaju, načinima proizvodnje hrane i energije za svoje životne aktivnosti, štetnosti (patogenosti) po ljude i životinje i dr.*

Mikroorganizmi su veoma rasprostranjeni u zemljištu i vodi, a *najviše ih je u pripovršinskom humusnom sloju. U slatkim vodama, populacije mikroorganizama su bogatije i raznovrsnije nego u slanim. U vazduhu se mikroorganizmi zadržavaju samo privremeno, s obzirom na odsustvo uslova za njihovu metaboličku aktivnost.*

*U PV obitavaju bakterije, virusi i protozoe. Limitirajući faktori, u pogledu opstanka mikroorganizama u PV, mogu da budu: veličina mineralizacije, visina temperature, pH vrednosti, prisustvo kiseonika i organskih materija i dr. Nekima su PV primarno stanište, a drugi u njih dospevaju infiltracijom (pretežno zagađenih) voda sa površine terena. Pojedine vrste razgrađuju i demineralizuju organske materije, što je u funkciji bio-prečišćavanja PV, dok ih druge zagađuju. U PV plitkih izdani može se naći i do nekoliko miliona jedinki u 1 ml vode. U načelu, njihov broj se smanjuje sa dubinom zaleganja PV. U PV su najrasprostranjenije bakterije, a u zagađenim PV, najčešće su dve njihove grupe: Koliformne bakterije i Proteus. Koliformne bakterije obitavaju u crevnom traktu ljudi i životinja, pa je njihovo prisustvo u PV indikator fekalnog zagađenja i neupotrebljivosti vode za piće.*

Prisustvo i količina mikroorganizama u PV određuje se laboratorijskim *mikrobiološkim analizama* uzoraka PV, čiji rezultati ukazuju na eventualnu zagađenost PV i (ne)mogućnost njenog korišćenja za piće i neke druge namene, kao i na eventualnu potrebu bolje sanitarne zaštite izvorišta (izvora, bunara i dr.), sa koga se PV zahvata. *Žarišta ovakvog zagađenja mogu da budu: neispravni kanalizacioni cevovodi, septičke jame, štale, đubrene poljoprivredne parcele, kanali sa neprečišćenim industrijskim otpadnim vodama* i dr.

Korišćenje (pre svega za piće) *mikrobiološki zagađene PV može da dovede do širenja (hidričnih) oboljenja*, kao što su: trbušni tifus, dizenterija, kolera, enterokolitis, žutica, polimijelitis.

Pojedine gvoždevite bakterije oksidišu rastvoreno gvožđe, zbog čega se stvara talog gvožđe-(oksi)hidroksida ( $\text{FeOOH}$ ). Pri zahvatanju PV sa visokim sadržajem gvožđa, može da dođe do brzog taloženja  $\text{FeOOH}$  na cevovodima (slika 17.1) i bunarskim filterima, i do smanjenja njihove protočnosti.



**Slika 17.1. Talog  $\text{FeOOH}$  u potisnom cevovodu iz bunara na izvorištu Trnovče (Velika Plana) [49, 20]**

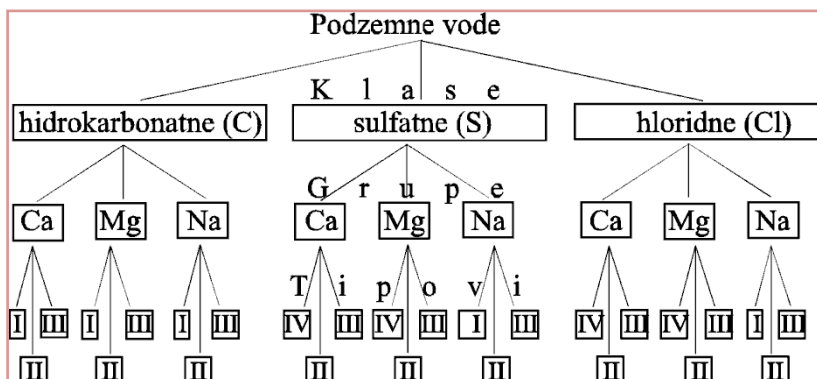
## **18. KLASIFIKACIJE PODZEMNIH VODA NA OSNOVU HEMIJSKOG SASTAVA**

Veliki broj autora, posebno ruskih, bavio se klasifikovanjem PV na osnovu hemijskog sastava. *Najčešći kriterijumi bili su: ukupna mineralizacija, sadržaj (odnos) makrokomponenti i/ili sadržaji specifičnih mikrokomponenti ili gasova u PV.* Međutim, *nijedna od postojećih klasifikacija ne može se nazvati univerzalnom niti sveobuhvatnom*, što je i razumljivo, s obzirom na kompleksne opšte uslove i faktore formiranja kvaliteta PV, a zatim i specifičnosti različitih regiona na Zemlji u pogledu geološke građe (baseni, vulkanske oblasti, karst, kristalasti masivi i dr.) i klime (polarne oblasti, umereno kontinentalne i tropske oblasti, pustinje, primorje, planinske oblasti i dr.). Najčešći nedostatak postojećih klasifikacija je taj što odražavaju hidrogeološke i hidrohemijske karakteristike jednog regiona Zemlje.

Nekima od postojećih klasifikacija obuhvaćen je i aspekt mogućeg korišćenja PV različitih hemijskih sastava, za određene namene (piće, navodnjavanje, balneologija i dr.), ali nepotpuno, s obzirom da je i pri ovim pokušajima ispoljen regionalni hidrogeološki/hidrohemijski pristup.



U domaćoj hidrogeološkoj praksi, jedna od najčešće korišćenih je klasifikacija Alekina. Zasnovana je na sadržaju i međusobnom odnosu primarnih makrokomponenti, a PV se svrstavaju u određene klase, grupe i tipove (slika18.1).



**Slika 18.1. Klasifikaciona šema Alekina na osnovu hemizma PV [1, 17]**

Pripadnost određenoj **klasi** uslovljena je sadržajem **osnovnih anjona**, a za označavanje **klasa** koriste se simboli: **C** ( $\text{HCO}_3^-$ ), **S** ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) i **Cl** ( $\text{Cl}^-$ ). Pripadnost određenoj **grupi** uslovljena je sadržajem **osnovnih katjona**: **Na** ( $\text{Na}^+$ ), **Ca** ( $\text{Ca}^{2+}$ ) i **Mg** ( $\text{Mg}^{2+}$ ). **Tipovi (I, II, III i IV)** se izdvajaju na osnovu karakteristika prikazanih u tabeli 18.1.

**Tabela 18.1. Karakteristike osnovnih tipova hemizma PV [1, 17]**

Tip	Odnos između osnovnih anjona i katjona	Karakteristike
I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	Malomineralizovane, meke vode
II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	Malomineralizovane i mineralizovane, tvrde vode
III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	Slane vode i rasoli
IV	$\text{HCO}_3^- = 0$	Kisele vode

## **19. MINERALNE I TERMALNE VODE**

PV koje se, na osnovu svoje mineralizacije, veće od 1g/l, i/ili specifičnog hemijskog i gasnog sastava, sadržaja specifičnih komponenti, radioaktivnih elemenata i/ili povišene temperature, razlikuju od malomineralizovanih (“običnih”) voda, nazivaju se *mineralnim vodama*. Dakle, povišena ukupna mineralizacija nije jedini niti presudni kriterijum (parametar kvaliteta), na osnovu koga se određena PV svrstava u mineralne vode, već to mogu da budu i (ne visoki) sadržaji karakterističnih mineralnih komponenti i/ili povišene temperature, koje ih čine pogodnim za određene namene.

*Ne ubrajaju se sve (visoko)mineralizovane PV u mineralne.* Karakterističan primer su neke “rudničke” vode, koje, u kontaktu sa ležištima mineralnih sirovina (posebno metaličnih), bivaju visoko mineralizovane, do i preko granice toksičnosti. Kao takve, one nemaju upotrebnu vrednost,

već (mogu da) zagađuju tlo, površinske vode i susedne izdani i predstavljaju svojevrsan ekološki problem.

Specifičan kvalitet mineralnih voda opredeljuje i njihove specifične (u odnosu na malomineralizovane vode) mogućnosti korišćenja, pa se, sa tog aspekta, mineralne vode najčešće dele na: **lekovite, industrijske i termalne** [17].

**U lekovite mineralne vode** spadaju one koje, zahvaljujući ukupnoj mineralizaciji, jonskom sastavu, sadržaju gasova, prisustvu terapijski aktivnih komponenti (mineralnih i organskih), radioaktivnih elemenata, alkalnosti/kiselosti i/ili povišenoj temperaturi, *imaju blagotvorno fiziološko dejstvo na čovekov organizam. Primenjuju se u balneologiji, kupanjem ili pijenjem.* U lekovite se ne ubrajaju samo PV specifičnog kvaliteta, već i pojedine površinske pojave: slana jezera, blatišta i dr.

**Pod industrijskim mineralnim vodama** podrazumevaju se PV koje sadrže određene mineralne komponente u koncentracijama rentabilnim za izdvajanje i dalju (industrijsku) preradu: J, Br, NaCl, jedinjenja bora, Li, Rb, Ge, U, W, Cu, CO<sub>2</sub>, soli kalcijuma, amonijum-hlorid i dr.

**Termalne vode.** *Hidrotermalnost (ili hidro-geotermalnost)* je pojam pod kojim se, u najkraćem, podrazumevaju fenomeni formiranja i pojavljivanja termalnih voda. Načelno, termalne vode su PV čija je donja temperaturna granica određena srednjom godišnjom temperaturom oblasti u kojoj se pojavljuju, dok gornja granica prelazi 100°C. Najčešće nalaze primenu u toplifikaciji naselja, industrijskih objekata, farmi, staklenika, u brojnim tehnološkim procesima, proizvodnji električne energije i, ukoliko su odgovarajućeg hemijskog sastava, balneoterapiji. U domaćoj praksi se, za vode koje se karakterišu i povišenom temperaturom i specifičnim hemijskim sastavom, najčešće koristi izraz *“termomineralne vode”*.

Termalne vode (bez obzira na hemijski sastav) predstavljaju deo veoma brojne i heterogene grupacije *mineralnih voda* i brojni autori ih upravo tu i svrstavaju. Na drugoj strani, neki ih razmatraju (samo) kao *poseban vid alternativnog (toplotno-)energetskog resursa*, što ih razlikuje od mineralnih voda, čija je primena primarno zasnovana na specifičnom hemijskom sastavu. Liniju razgraničenja je, praktično, nemoguće povući, zato što, u velikoj meri, zavisi i od (napretka) tehnologije njihovog iskorišćavanja (tabela 19.1). U svakom slučaju, praktični aspekt fenomena hidro(geo)termalnosti je taj da se unutrašnja toplota zemlje (geotermalna energija) eksploatiše preko PV, kao (iz)nosioca te toplote.

**Tabela 19.1. Korišćenje geotermalne energije na osnovu temperature (resursa) PV**

[100, 16 – delimično izmenjeno]

Temp. (°C)	Primena
Hladne (<25 °C)	<b>Posredstvom toplotnih pumpi:</b> grejanje i hlađenje kuća i zgrada.
Nisko-termalne (25-75 °C)	<b>Direktno:</b> zagrevanje staklenika, uzgajanje riba, balneologija i rekreacija, zagrevanje stambenih i poslovnih prostora, zagrevanje tla, sušenje voća i povrća, procesiranje hrane, tretiranje betona i dr.
Srednje-termalne (75-150 °C)	<b>Prizvodnja el.energije:</b> binarni sistemi; <b>Direktno:</b> apsorpcioni hladnjaci, bojenje tkanina, prerada celuloze i papira, sušenje drva i cementa i dr.
Visoko-termalne (>150 °C)	<b>Prizvodnja el.energije;</b> <b>Ostalo:</b> tretiranje minerala, proizvodnja vodonika, etanola, bio-goriva i dr.

Pojave term(ominer)alnih voda vezane su za oblasti savremene ili nedavno završene vulkanske aktivnosti, kao i za (neo)tektonski aktivne geosinklinalne oblasti. Termalne vode platformnih oblasti i velikih arteskkih basena formirane su u okviru dubokih vodonosnih horizonata/zona (u skladu sa već pomenutim načelima hidrodinamičke i hidrohemijske zonalnosti) i najčešće su visoko-mineralizovane (rasolne).

U okviru geosinklinalnih (nevulkanskih) oblasti, pojave termalnih voda vezane su najčešće za zone većih raseda. Za oblasti savremenog vulkanizma vezane su, najčešće, visoko-termalne ugljikiselo-azotne vode, koje su, na većim dubinama, pregrijane, sa temperaturama i do 300 °C. Na površini terena se često pojavljuju u vidu gejzira.

U Srbiji postoji veći broj prirodnih pojava ili bušenjem otkrivenih, uglavnom nisko-termalnih (na osnovu klasifikacije iz tabele 19.1) voda, među kojima se, po visini temperature, ističu [69, 16]: Jošanička banja (50-77 °C), Sijarinska banja (61-76 °C), Vranjska banja (63-95 °C), Bogatić (65-75 °C), Lukovska banja (64-67 °C), Bečejska banja (65 °C), Banja Kanjiža (70 °C) i dr.

\* \* \*

#### **Kontrolna pitanja:**

- 1/ Najčešći izvori mikrokomponenti u PV su...?**
- 2/ Najzastupljenije organske komponente hemijskog sastava PV su...?**
- 3/ U kakvom odnosu stoje rastvorljivost gasova i temperatura PV ?**
- 4/ Ukratko objasniti genezu gasova CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> u PV ?**
- 5/ Šta se (sve) može utvrditi na osnovu izotopskog sastava PV ?**
- 6/ Objasniti šta je “(V)SMOW”, kao i to kako je formirana i čemu služi “GMLV” ?**
- 7/ Koje vrste mikroorganizama se najčešće sreću u zagađenim PV ?**
- 8/ Objasniti Alekinovu klasifikaciju PV ?**
- 9/ Kako se mineralne vode klasifikuju sa aspekta mogućnosti korišćenja ?**
- 10/ Praktični aspekt fenomena hidro(geo)termalnosti je...?**

XI DEO

**REŽIM PODZEMNIH VODA**

**OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA**

## **20. REŽIM PODZEMNIH VODA**

Pod **režimom PV (ili režimom izdani)** podrazumeva se *proces/dinamika izmena kvantitativnih svojstava i kvaliteta PV, u vremenu i prostoru, pod uticajem prirodnih i veštačkih (antropogenih) faktora. Kvantitativna svojstva PV su: nivo, proticaj/isticanje, brzina kretanja (filtracije) i veličina hidrauličkog gradijenta*. Na režim PV naročito utiču: hidro-meteorološki režim, (prekomerna) eksploatacija PV, navodnjavanje poljoprivrednih površina, odvodnjavanje rudarskih radova, veštačko hranjenje izdani, emisija zagađujućih materija i dr.

### **20.1. FAKTORI REŽIMA PODZEMNIH VODA**

Načela i karakteristični primeri uticaja nekih od, u nastavku navedenih faktora, već su izloženi u prethodnim poglavljima, kroz izlaganja o: vodnom bilansu, tipovima izdani, hranjenju i dreniranju izdani, odnosu izdani i površinskih voda, kvalitetu PV i dr.

U grupu prirodnih faktora (uticaja) spadaju: *meteorološki, hidrološki, geološki, geodinamički i biogeni, kao i dejstvo Sunca i Meseca*. Režim PV koji je određen samo prirodnim faktorima naziva se *prirodni ili nenarušeni režim*. Načelno, uticaj (i prirodnih i veštačkih) faktora najveći je na plitke izdani, sa slobodnim nivoom, dok sa dubinom ovaj uticaj slabi ili potpuno prestaje. Od svih elemenata režima, *najpodložniji izmenama je nivo PV*.

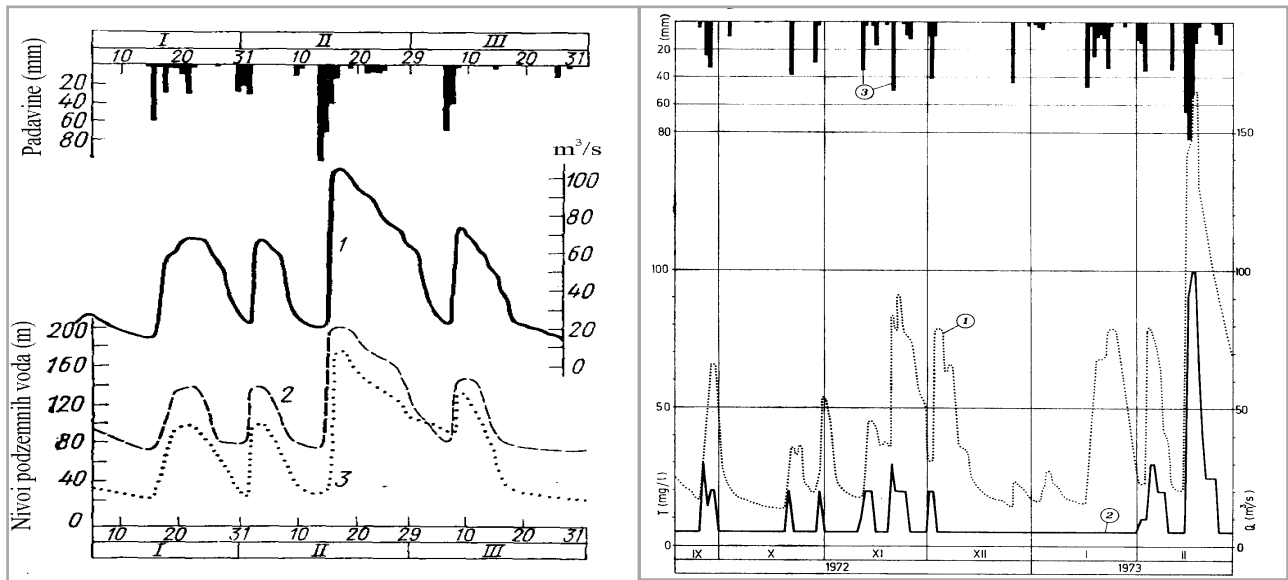
Uticaj prirodnih faktora različit je po vremenskom i prostornom intenzitetu i kontinuitetu. Jedni deluju postojano i kontinualno, a drugi povremeno. Uticaj pojedinih faktora je merljiv tokom geološkog vremena, drugih, u višegodišnjem periodu, a neki faktori na režim utiču kratkoročno: tokom godine, sezonski, dnevno ili epizodno.

**Meteorološki faktori** su: *atmosferske padavine, evapotranspiracija, temperatura i vlažnost vazduha, atmosferski pritisak i vetrovi*.

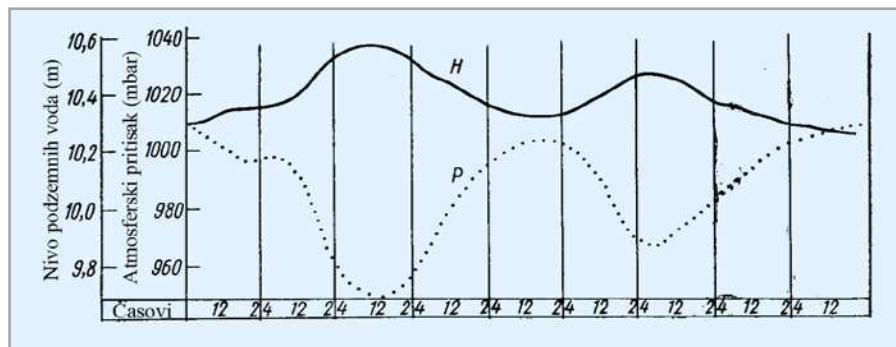
Trajanje, intenzitet, učestalost i način rashodovanja **atmosferskih padavina** na površini terena, najdirektnije i najizraženije utiču na režim PV, od svih meteoroloških faktora. Uticaj padavina je najizraženiji na promene nivoa izdani sa slobodnim nivoom, naročito kod karstnih i plitkih zbijenih izdani. Kod karstnih izdani, promene nivoa PV dovode do promena izdašnosti izvora, mutnoće PV (slika 20.1.1), mikrobiološkog, a ređe i hemijskog sastava PV.

Promene **atmosferskog pritiska** utiču na kolebanja nivoa PV, posebno plitkih izdani sa slobodnim nivoom, a najočiglednije manifestacije su u otvorenim bunarima. *Sa povećanjem atmosferskog pritiska nivo izdani se snižava i obrnuto* (slika 20.1.2). I **temperatura vazduha** najveći uticaj ostvaruje na plitke izdani sa slobodnim nivoom i to kroz: *sezonska kolebanja temperature PV, povremena zamrzavanja PV i uticaj na evapotranspiraciju, a time i na kolebanja nivoa izdani*.

**Evapotranspiracija** menja svoj intenzitet, što može dovesti i do osetnih dnevnih kolebanja slobodnog nivoa izdani, koja, u vreme vegetacionog perioda, dostižu 30-100 mm (razlika između večernjeg minimalnog i jutarnjeg maksimalnog nivoa).



**Slika 20.1.1.** *Levo: Tromesečni režim izdašnosti (proticaja) vrela Omble (1), nivoa karstne izdani (2 i 3) pod uticajem padavina; Desno: Višemesečni režim promena izdašnosti i mutnoće vode vrela Omble pod uticajem padavina: 1- izdašnost, 2- mutnoća, 3- padavine [56]*

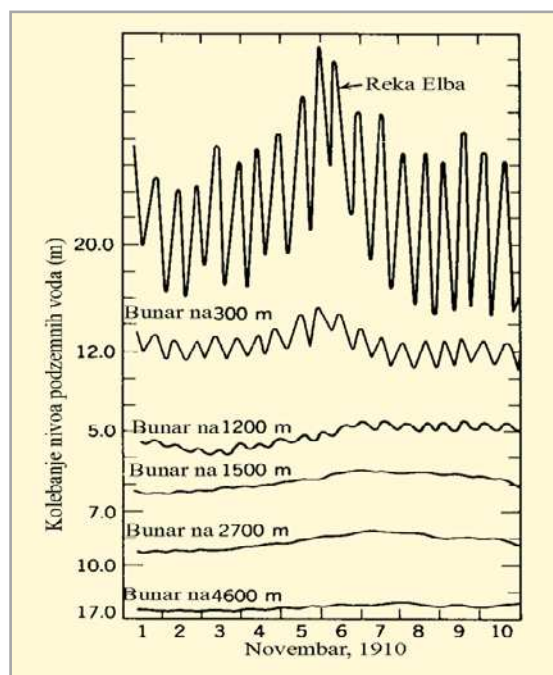


**Slika 20.1.2.** *Uporedni dijagram promena nivoa izdani i atmosferskog pritiska [82, 17]: H- nivo izdani; p - atmosferski pritisak*

**Cirkulacija vetrova** indirektno utiče na režim nivoa izdani, preko svog uticaja na temperaturu vazduha, izlučivanje padavina i evapotranspiraciju.

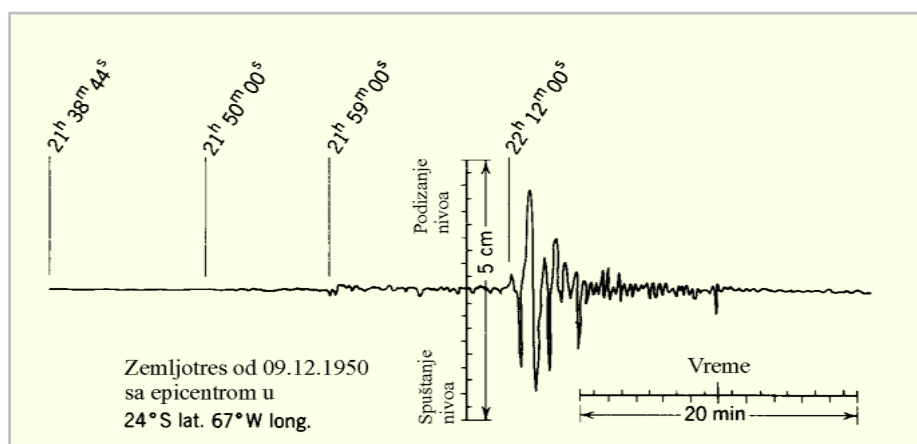
**Hidrološke faktore** čine elementi režima površinskih voda. U priobalju reka i jezera, režim nivoa PV tesno je povezano sa kolebanjem nivoa površinskih voda. Sa udaljavanjem od obale, smanjuje se i uticaj ovih faktora (slika 20.1.3). U primorju, pored uticaja na režim nivoa, morske vode proizvode i, ranije već opisane, uticaje na kvalitet/salinitet PV.

**Geodinamički faktori** su: *neotektonski pokreti, savremeni vulkanizam i zemljotresi.*



**Slika 20.1.3. Uporedni dijagrami kolebanja nivoa reke Elbe i nivoa PV u bunarima na različitim rastojanjima od reke [83, 17]**

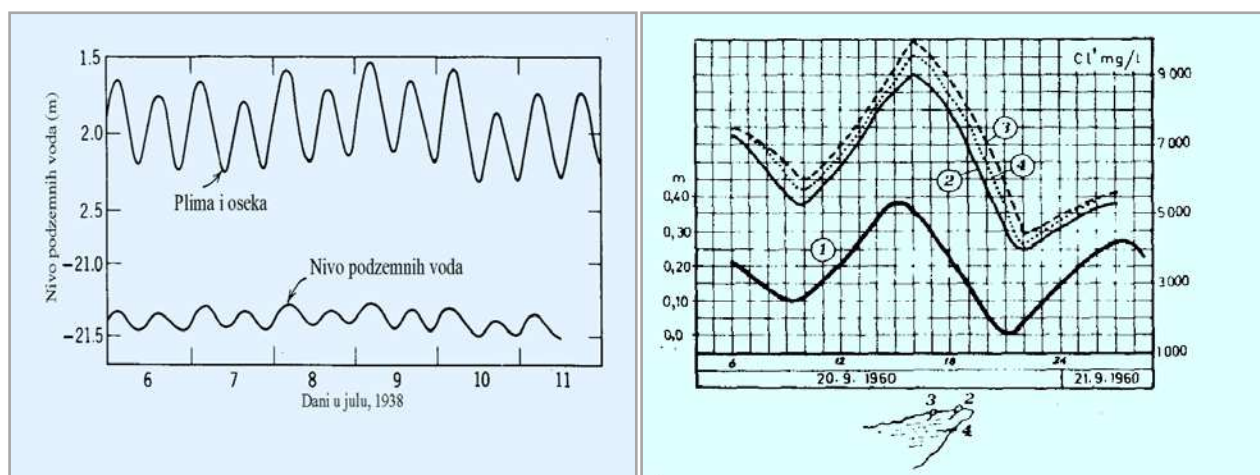
**Neotektonski pokreti** izazivaju veoma sporo spuštanje ili izdizanje zemljine kore (reda veličine milimetara ili santimetara), što dovodi do neosetnog spuštanje/podizanja nivoa izdani. Nasuprot tome, **zemljotresi** izazivaju nagle i oštre promene u režimu (pre svega) nivoa PV, koje se mogu manifestovati na velikim razdaljinama, i kao sniženja i kao izdizanja (slika 20.1.4). Izvori menjaju izdašnost, neki presušuju, a mogu se pojaviti i novi. Moguće su i promene hemijskog sastava PV.



**Slika 20.1.4. Reakcija nivoa PV u bunaru u Milvokiju (SAD) na zemljotres sa epicentrom na argentinsko-čileanskoj granici [83, 17]**

Uticaj **savremenih vulkanskih procesa** na režim izdani je raznovrstan, uz manifestacije koje su (po brzini i intenzitetu) slične onima kod dejstva zemljotresa. Nekim erupcijama vulkana prethodilo je osetno sniženje nivoa PV, a u pojedinim slučajevima i nestanak vode iz bunara, dok su se, na drugim mestima, pojavljivali novi izvori. Mogu da nastupe i promene hemijskog i gasnog sastava PV i atipične pojave mehaničkih primesa.

**Uticaj Sunca i Meseca** ogleda se u izmenama intenziteta gravitacije, što dovodi do elastičnih deformacija zemljine kore, a time i kolebanja nivoa PV. Ta kolebanja, čija je amplituda reda veličine santimetara, odvijaju se u pravilnim intervalima. Na režim nivoa i hemijskog sastava PV primorskih izdani, veliki uticaj imaju **plima i oseka** (slika 20.1.5).



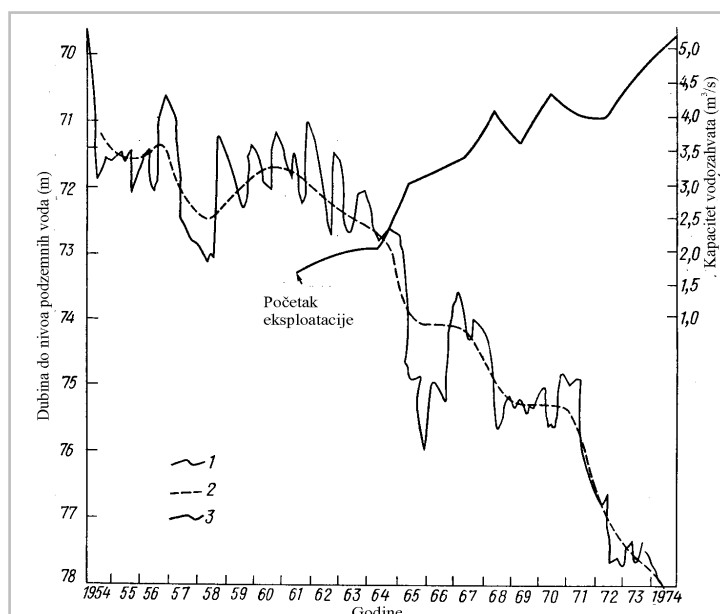
**Slika 20.1.5.** *Levo: Kolebanja nivoa mora i posledična kolebanja nivoa PV voda u bunaru udaljenom 30 m od obale, Merilend, SAD [83, 17]; Desno: Promena saliniteta vode na priobalnim vrelima u zalivu Vrilo pod uticajem plime i oseke [54]: 1- oscilacije nivoa mora; 2, 3, 4- promena sadržaja Cl u vodi vrela (koja su na maloj skici, ispod dijagrama, označena istim brojevima)*

**Antropogene aktivnosti (faktori)** sve više dovode do, uglavnom nepovoljnih, promena režima izdani. Dugoročna eksploatacija PV dovodi do sniženja nivoa izdani (slika 20.1.6). Navodnjavanje i hemijsko tretiranje poljoprivrednih površina dovode do veštačkog podizanja nivoa PV i njihovog zagađivanja. Aktivnosti koje dovode do sleganje terena (eksploatacija mineralnih sirovina, građevinski podzemni radovi i dr.), dovode i do sniženja prirodnog nivoa izdani. Odvodnjavanje terena (poljoprivrednih površina, ležišta mineralnih sirovina, urbanih zona) dovodi do sniženja nivoa izdani. Nekontrolisano ispuštanje komunalnih i industrijskih otpadnih voda dovodi do zagađivanja PV. Izgradnja brana i akumulacija, saobraćajnica i dr. negativno se odražava na prirodni režim nivoa i kvaliteta PV. Izgradnja naselja, betoniranje, asfaltiranje, urbani drenažni i kanalizacioni sistemi, dovode do smajenog prihranjivanja izdani i sniženja nivoa PV (slika 20.1.7).

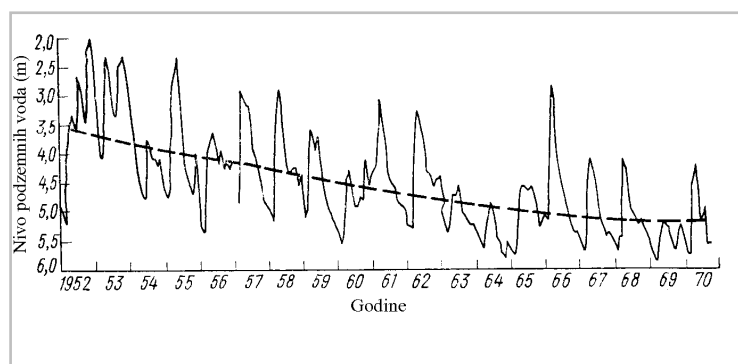
Pored navedenih (direktnih) antropogenih uticaja, na režim PV (indirektno) utiču i **klimatske promene**, pod kojima se prevashodno misli na opšti (na celoj Planeti) porast tempertaure vazduha, koji se naročito „oseća“ i registruje u poslednjih 5-6 decenija. Iako u naučnim i stručnim krugovima ne postoji potpuna saglasnost oko (primarnih) uzroka, intenziteta i (neželjenih) posledica klimatskih promena, preovlađuje je mišljenje da prekomerno sagorevanje fosilnih goriva i velika emisija



gasova, kao što su: CO<sub>2</sub>, oksidi sumpora i azota, metan i dr., dovode do stvaranja „efekta staklene bašte“ i generalnog porasta temperature u nižim slojevima atmosfere.



**Slika 20.1.6. Uticaj višegodišnje eksploatacije PV voda na režim (sniženje) nivoa izdani [82, 17]**  
 1- srednje-mesečni nivo izdani; 2- srednje-godišnji nivoi izdani; 3 - kapacitet vodozahvata



**Slika 20.1.7. Višegodišnji trend sniženja nivoa PV u reonu Koptevo (Moskva) pod uticajem urbanizacije prostora [82, 17]**

Ovaj opšti porast temperature vazduha dovodi do (neželjenih) promena režima ostalih meteoroloških parametara (vlažnost vazduha, vetrovi) i evapotranspiracije, a potom i do promena kod ostalih elemenata životne sredine: površinskih tokova i akumulacija, zemljišta, vegetacije, mora i okeana. S obzirom da su deo opšteg hidro-meteorološkog ciklusa, i PV su na udaru ovih promena, pa poremećaji njihovog (prirodnog) režima mogu da budu: poremećaji (pre svega sezonskog) režima nivoa PV, zbog poremećenih režima ostalih hidro-meteoroloških parametara; generalno sniženje nivoa PV (posebno kod plićih izdani) zbog većeg isparavanja; poremećaji

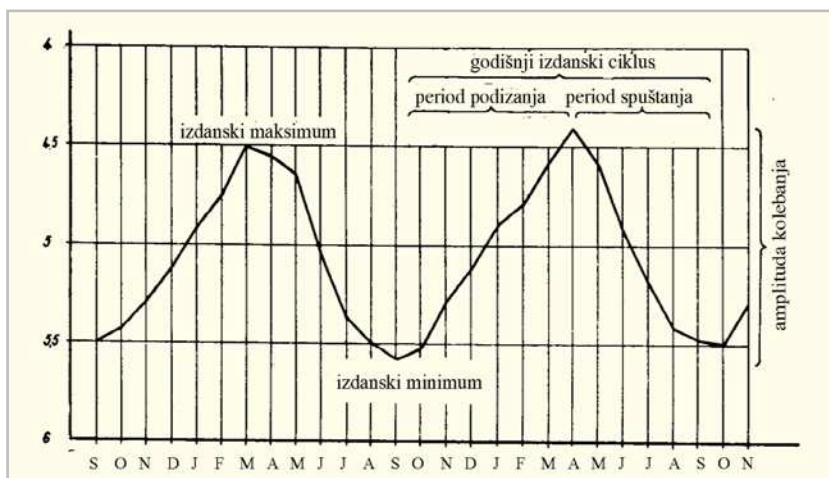
prirodnog hemijskog i mikrobiološkog kvaliteta PV, zbog promena: nivoa PV, brzine vodozamene i odnosa sa površinskim vodama i dr.

## 20.2. TIPOVI REŽIMA PODZEMNIH VODA

**Na osnovu dinamike, odnosno, vremena/perioda promena nivoa i drugih elemenata režima izdani**, razlikuju se sledeći tipovi režima: **1-dnevni; 2- sezonski; 3- godišnji i 4- višegodišnji.**

**Dnevni režim** kolebanja svojstven je za plitke izdani, sa slobodnim nivoom, a izazvan je već pomenutim dnevnim/noćnim razlikama u intenzitetu evapotranspiracije. Evapotranspiracija se noću prekida ili bitno smanjuje, što dovodi do (noćnog) podizanja nivoa izdani. U slučaju intenzivnih kiša, karstne i plitke zbijene izdani mogu da pokažu brzu reakciju porasta nivoa.

**Sezonski režim** je uslovljen sezonskom cikličnošću meteoroloških (temperatura vazduha, atmosferski pritisak i evapotranspiracije) i hidroloških (vodostaji i proticaji površinskih voda) faktora. Za izdani u našim (umereno kontinentalnim) klimatskim uslovima, karakteristični su *rano-prolećni maksimum i letnje-jesenji minimum* nivoa (slika 20.2.1). Prolećni porast nivoa PV izazvan je povećanjem infiltracije, zbog topljenja snega i obilnih prolećnih kiša. Postepeno snižavanje nivoa, od proleća ka letu/jesenju, posledica je porasta temperatura vazduha, vegetacione aktivnosti, smanjenja padavina i povećane evaporacije i transpiracije iz zone aeracije i plitkih izdani. Krajem jeseni dolazi do snižavanja temperatura vazduha, povećanja padavina i smanjenja evapotranspiracije, pa je i nivo izdani ponovo u porastu.



Slika 20.2.1. Šema sezonskih kolebanja nivoa PV u uslovima umereno kontinentalne klime [59]

Amplituda sezonskih kolebanja nivoa varira od reda veličine santimentara, u aridnim oblastima, sa dubokim nivoima izdani, do desetina pa i stotina metara, kod karstnih izdani u kontinentalnim i primorskim oblastima. PV plitkih izdani podložnije su sezonskim kolebanjima temperature, koja su uslovljena promenama temperatura vazduha, a ova zavisnost opada sa dubinom izdani. I sezonske, uglavnom neznatne, promene hemijskog sastava PV zavise od dubine izdani i intenziteta vodozamene.

**Godišnji režim** uslovljen je cikličnim klimatskim promjenama na nivou od *nekoliko godina*, odnosno, *cikličnim smenjivanjem vlažnih i suvih (malovodnih) godina*.

**Višegodišnji režim** je uslovljen cikličnim izmenama hidrometeoroloških faktora, koje se dešavaju u *periodima dužim od 10 godina*, pod uticajem (cikličnog) režima sunčeve aktivnosti.

**Na osnovu hidrodinamičkih karakteristika izdani i određenih specifičnosti faktora formiranja režima PV**, mogu da se izdvoje četiri tipa režima [38]:

- 1- **Vododelnički tip**, koji je svojstven za zone razvođa/vododelnica rečnih tokova, a formira se pod uticajem atmosferskih padavina, evapotranspiracije i podzemnog oticaja, *bez uticaja hidrološkog faktora*.
- 2- **Priobalni tip**, koji se formira pod primarnim uticajem hidrološkog faktora, odnosno, kolebanja nivoa reka, jezera, mora i okeana, uz postojanje hidrauličke veze prostorno bliskih podzemnih i površinskih voda.
- 3- **Karstni tip**, koji je svojstven za karstne izdani i formira se pod uticajem i meteorološkog i hidrološkog faktora. Karakterišu ga velike oscilacije nivoa PV i izdašnosti izvora.
- 4- **Režim u zoni zamrzavanja** odlikuje se potpunim ili delimičnim (sezonskim) zamrzavanjem PV.

### 20.3. OSMATRANJA REŽIMA PODZEMNIH VODA – HIDROGEOLOŠKI MONITORING

Pod **monitoringom** se podrazumeva *osmatranje odredjenog procesa i merenje karakterističnih parametara njegovog funkcionisanja tokom vremena*. Jedna je od osnovnih metoda naučnih istraživanja, koja je široku primenu našla i u hidrogeologiji. Pod **hidrogeološkim monitoringom** podrazumeva se monitoring elemenata režima izdani:

- **izdašnosti**: izvora, bunara, galerija i dr.;
- **nivoa PV**: u bunarima, bušotinama, oknima, jamama i dr.;
- **kvaliteta PV**: hemijskog i mikrobiološkog sastava, fizičkih svojstava i dr.

Pored navedenog, hidrogeološki monitoring (može da) obuhvata i karakteristične parametre prirodnog okruženja, sa kojima je osmatrana izdan u određenoj zavisnosti: *količine i intenziteti padavina; temperature i vlažnosti vazduha; proticaje i vodostaje površinskih tokova i akumulacija; kvalitet površinskih voda i atmosferskih padavina; pojedine elemente režima susednih izdani; sadržaj vlage u nadizdanskoj zoni i dr.*

Hidrogeološkom monitoringu se podvrgavaju i određeni elementi pretpostavljenog ili utvrđenog antropogenog uticaja na životnu sredinu : *režim eksploatacije voda; režimi nivoa i kvaliteta voda u veštačkim akumulacijama; režim količina i kvaliteta emitovanih otpadnih (komunalnih, industrijskih, rudničkih, poljoprivrednih) voda; hemijski i mikrobiološki sastav poljoprivrednog zemljišta i dr.*

Hidrogeološki monitoring se sprovodi ili tokom određenog (ograničenog) vremenskog perioda ili kontinualno (bez ograničenja), u zavisnosti od svrhe uspostavljanja. Evo nekih primera iz prakse:

- *Vremenski ograničeni monitoring proticaja, nivoa i kvaliteta PV tokom realizacije terenskih testova crpenja vode iz bunara.* Odlikuje se kratkim trajanjem - od nekoliko sati do nekoliko dana ili nedelja i čestim merenjima elemenata režima izdani – nivoa PV i izdašnosti bunara.
- *Kontinualni/stalni monitoring izdašnosti, nivoa i kvaliteta PV na formiranim izvorištima* za: komunalno i tehničko vodosnabdevanje, korišćenje mineralnih i termalnih voda, flaširanje voda, navodnjavanje poljoprivrednih površina i dr.; uporedo se osmatraju i hidro-meteorološki parametri koji (mogu da) imaju uticaja na režim osmatrane izdani: količine padavine, temperature vazduha, vodostaji, proticaji i kvalitet površinskih voda, kao i parametri antropogenog uticaja.
- *Vremenski ograničeni monitoring kvaliteta zagađenih PV i efekata sprovedenih mera sanacije (remedijacije tj “čišćenja”) izdani,* gde se, pored analiza kvaliteta PV, sprovode i analize zagađenosti tla i površinskih voda u okruženju.
- *Hidrogeološkim monitoringom u karstu (vrela, ponora, pećina), tokom godišnjeg hidro-meteorološkog ciklusa,* dobijamo neophodne podatke o, inače veoma izraženim, sezonskim amplitudama kolebanja nivoa i proticaja PV. Ovi podaci će predstavljati osnovne podloge za izradu vodozahvata ili nekog drugog vida “regulacije” (prevazilaženja nepovoljnog režima) karstne izdani.

Parametri monitoringa: dužina i učestalost (dnevna, nedeljna, mesečna, godišnja) osmatranja/merjenja, broj osmatračkih punktova (bunara, izvora i dr.), broj i vrsta/sadržaj analiza kvaliteta PV, način merjenja proticaja/nivoa i dr., kao i relevantni hidro-meteorološki i antropogeni parametri, treba da se prilagođavaju specifičnostima konkretnog terena i nameni/svrsi monitoringa i, pri tome, usklađuju sa postojećim stručnim i zakonskim preporukama i standardima iz ove oblasti.

## **21. OSNOVNA NAČELA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA**

### **21.1. PODZEMNE VODE KAO INTEGRALNI DEO ŽIVOTNE SREDINE**

Problem *zagadjivanja i zagadjenosti životne sredine: vazduha, zemljišta, vegetacije, površinskih i podzemnih voda,* jedan je od najvećih problema savremene civilizacije, a posledica je intenzivne (i nekontrolisane) eksploatacije resursa, industrijalizacije, poljoprivredne delatnosti, urbanizacije i dr. Aktuelni ekološki status naše planete nalaže da *zaštita životne sredine (treba da) predstavlja jedan od prioriteta u organizovanom delovanju država i relevantnih međunarodnih organizacija* (UN, EU i dr.). U navedenom kontekstu, PV imaju veoma značajno mesto:

- Čista pijaća voda je najdragoceniji prirodni resurs, čije ugrožavanje/zagađivanje na najdirektniji način ugrožava fizički opstanak Čoveka.
- Najveći broj stanovnika naše planete upućen je na korišćenje PV, kao osnovnog resursa za vodosnabdevanje i piće.
- Kvalitet PV na Zemlji je, generalno, degradiran aktivnošću čoveka.
- Zagađivanje PV najčešće se odvija posredno: zagađujuće materije iz vazduha, tla, površinskih tokova i akumulacija, infiltracijom dospevaju do nivoa PV i zagađuju ih; ovde se proces zagađivanja ne završava – s obzirom da PV nisu „statične“, već su u stalnom kretanju, one su i medij koji „stečeno“ zagađenje (može da) prenosi i širi.
- Problematika zaštite PV ne odnosi se samo na zaštitu kvaliteta već i na zaštitu od nekontrolisane intenzivne eksploatacije (crpenja), koja je, u velikom broju slučajeva, dovela do vidnog smanjenja raspoloživih rezervi PV, pa čak i do njihovog potpunog iscrpljivanja. Ovo za

posledicu nema samo neposredno ugrožavanje zdravlja i životnog standarda ljudi, već može dovesti i do kompleksnog ugrožavanja prirodnog okruženja neke oblasti: sniženjem nivoa PV ugrožen je opstanak vegetacije, a time i životinjskog sveta iz pripadajućeg lanca ishrane; pored toga, doći će i do opadanja vodostaja površinskih voda, što će se, takođe negativno, odraziti na razvoj biljnog i životinjskog sveta, a mogu da nastupe i neželjene klimatske promene.

**Zaštita PV**, dakle, predstavlja izuzetno značajnu i kompleksnu aktivnost, koja nije vremenski ograničena i koja se ne svodi samo na saniranje zagađenja i ublažavanje neželjenih posledica, već na kontinualno i **prevashodno preventivno delovanje**, u cilju sprečavanja zagađivanja ili iscrpljivanja PV. Ona **treba da bude integralni deo ukupnih aktivnosti na zaštiti životne sredine**, s obzirom da PV predstavljaju samo jedan od njenih medjusobno zavisnih elemenata, u koje spadaju i: *vazduh, tlo (zemljište), površinske vode, biljni i životinjski svet, čovek*. Upravo zato, poslednjih decenija, u međunarodnoj terminologiji se utemeljio (engleski) termin *Environmental hydrogeology* (prev. "Hidrogeologija i prirodno okruženje/sredina"), koji bolje iskazuje suštinu i kompleksnost problematike zaštite PV, kao (samo) jednog iz kompleksa interaktivnih komponenti životne sredine.

## 21.2. OSNOVNI POJMOVI IZ OBLASTI ZAŠTITE KVALITETA PODZEMNIH VODA

Kako je već rečeno, formiranje hemijskog sastava PV počinje u atmosferi, gde kapi vode rastvaraju/apsorbuju gasove i čvrste materije, a nastavlja se po dospeću atmosferskih padavina na tlo, tokom infiltracije i filtracije PV. Na ovom putu, vode (mogu da) apsorbuju i neke zagađujuće (uglavnom antropogene) materije, koje narušavaju njihov kvalitet - *zagađuju ih* i ograničavaju ili onemogućavaju njihovo korišćenje.

Pod **zagađivanjem PV (izdani) podrazumeva se unošenje (antropogeno) organskih i neorganskih hemijskih materija i(li) patogenih mikroorganizama u izdan, u količinama koje narušavaju kvalitet PV do stepena njihove ograničene upotrebljivosti ili neupotrebljivosti za različite čovekove potrebe, a prvenstveno za piće, korišćenje u poljoprivredi i prehrambenoj industriji**. U načelu, *kvalitet PV koji je "narušen" delovanjem prirodnog (a ne antropogenog) faktora, ne smatra se zagađenjem*, a neki, već pomenuti, karakteristični primeri su: intruzija morskih voda u priobalne izdani, filtracija PV u zonama ležišta mineralnih sirovina i dr.

Pored hemijskog i mikrobiološkog evidentirani su i slučajevi tzv. termičkog zagađenja PV, odnosno, "unošenja toplote" u geosredinu (u zonama objekata za toplifikaciju, nekontrolisanim ispuštanjem toplih voda - produkata tehnoloških procesa i dr.) i „neprirodno“ podizanje temperature PV, čime se, između ostalog, narušava njen prirodni hemijski i mikrobiološki sastav.

**Zagađujuće materije** "...su sve materije koje se, prvenstveno pod uticajem ljudskog faktora, unose u nedozvoljenim količinama (preko MDK) u izdanku i nadizdanku zonu, direktno ili indirektno, stalno ili povremeno, a čije se poreklo može razdvojiti od porekla onih sastojaka i osobina koje podzemne vode i sredina već genetski poseduju" [39].

**Zagađivači** su "...sama žarišta zagađivanja (fabrike, deponije, rudnici i dr.), koji emituju jednu ili više zagađujućih materija kroz različite medije kao što su vazduh, voda, geosredina i zagađuju ih" [39].

Neki karakteristični zagađivači i, njima svojstvene, vrste zagađujućih materija su [15]:

- Sa površina zasejanih poljoprivrednim kulturama, u tlo i plitke izdani dospevaju materije iz pesticida, herbicida i ostalih sredstava zaštite, kao i iz (veštačkih) đubriva.
- Oštećeni komunalni kanalizacioni sistemi, septičke jame i podzemni rezervoari emituju veliki broj štetnih, pretežno organskih materija i mikroorganizama
- Objekti naftne industrije - postrojenja, cevovodi, cisterne i dr., u slučaju oštećenja emituju veliki broj štetnih, pretežno organskih materija genetski vezanih za naftu i hemijske supstance koje se koriste za njenu preradu
- Objekti hemijske industrije - postrojenja, rezervoari, magacini i dr. u životnu sredinu mogu da emituju brojne vrste neorganskih i organskih hemijskih zagađujućih materija
- Komunalne i industrijske deponije, takođe su žarišta emisije zagađujućih organskih i neorganskih materija
- Rudnici, jalovišta, rudničke visoko mineralizovane (toksične) vode, žarišta su zagađenja životne sredine organskim materijama (rudnici uglja, kaustobiolita), metalima (olovo, cink, živa, bakar, hrom, arsen, aluminijum, gvožđe i dr.), radionuklidima (uran, cezijum, stroncijum), nemetalima (fosfor, sumpor) i dr.
- Saobraćajnice, benzinske stanice, auto-otpadi, garaže, takođe su zagađivači, pretežno organskim (derivati nafte) zagađujućim materijama

U suštini, sva ljudska privredna i komunalna delatnost dovodi do zagađivanja životne sredine.

**Ranjivost** (*izloženost zagađenju*) PV (*izdani*) je pojam koji se najkraće može definisati kao: *verovatnoća da neko zagađenje dospe do izdani*. U opštem slučaju, ranjivost izdani zavisi od 3 faktora: 1/"*Prirodne osetljivosti/ranjivosti/ugroženosti izdani*"; 2/"*Lokacije (udaljenosti) zagađivača i tipa zagađujućih materija*"; 3/"*Lokacije zahvata PV (bunara, izvora...i dr.)*).

Prirodna osetljivost izdani se može definisati kao parametar "*...koji pokazuje sa kojom lakoćom voda ulazi u izdan i kreće se kroz njega, i zavisi od karakteristika i izdani i nadizdanske zone, a nezavisna je od karakteristika zagađujućih materija i njenih izvora*" [39]. Pored toga, prirodna osetljivost izdani određena je i njenim "*kapacitetom/sposobnošću (samo)prečišćavanja, koji proističe iz kompleksa fizičkih, hemijskih i bioloških procesa, koji se odvijaju u sistemu "(zagađena)voda-stena"* [88].

Ovi procesi, koji se najčešće svrstavaju pod pojam *migrativnosti zagađujućih materija*, dovode do smanjenja koncentracije, a ponekad i potpune eliminacije zagađujućih materija u izdani.

Hazard je opasnost uslovljena prisustvom i prostornom pozicijom konkretnog zagađivača i potencijalnom emisijom konkretnih vrsta zagađujućih materija, bez uzimanja u obzir prirodne ranjivosti.

**Rizik** je (kvantitativno iskazana) verovatnoća zagađivanja PV, koja je izvedena iz utvrđenih *prirodne osetljivosti i hazarda*, na konkretnom terenu.

U vezi prethodnog, od velikog značaja je poznavanje, već pomenute, **migrativnosti zagađujućih materija**, pod kojom se podrazumeva: „...**zakonitost premeštanja čestica zagađujućih materija u porama geološke sredine**, pri čemu se uzimaju u obzir fizičke, hemijske, biohemijske, bakteriološke, radiološke i dr. izmene samih zagađujućih materija, geološke sredine (stene) i PV, proistekle iz procesa njihovog uzajamnog dejstva.” [39].

Navedeni procesi dovode do toga da zagađena PV, na svom putu, menja svoj hemijski i mikrobiološki sastav, pri čemu se koncentracije pojedinih komponenti smanjuju ili potpuno nestaju, nekih drugih povećavaju, a formiraju se i potpuno nove komponente. *Različite vrste zagađujućih materija (isparljiva organska jedinjenja, pesticidi, goriva, metali, fekalne bakterije i dr.) različito će migrirati u jednoj istoj izdani, a jedna ista zagađujuća materija će različito migrirati u različitim tipovima izdani.*

### 21.3. SADRŽAJ I CILJEVI ZAŠTITE PODZEMNIH VODA

Širom Sveta "otvoreni" su i dalje iskrsavaju novi, lokalni ili regionalni, problemi zagađenosti ili naglašenog rizika od zagađivanja PV, kao i problemi nadeksploatacije (precrpljivanja) izdani. Zbog toga, *zaštita PV, prevashodno u vidu (preventivnog) monitoringa kvaliteta i kvantitativnih svojstava PV, treba da bude integralni deo hidrogeoloških istraživanja i eksploatacije resursa PV.* Pored toga, *aspekt zaštita PV treba da bude sadržan i u svim ostalim ljudskim aktivnostima, kojima se narušavaju prirodne karakteristike prostora na kome se nešto radi ili gradi, a koje će potencijalno uticati i na narušavanje (dobrog) prirodnog statusa PV.* U skladu sa prethodnim, *koncept zaštite PV može da se razdvoji na dva osnovna vida delovanja* [15]:

- 1- *Zaštita PV na planetarnom, regionalnim i državnim nivoima*, kroz administrativno sprovođenje deklariranih principa i mera upravljanja resursima PV, *u skladu sa njihovim održivim razvojem*
- 2- *Zaštita PV na lokalnom nivou*, koja se odnosi na pojedinačna izvorišta PV, a ostvaruje se: *preventivnim delovanjem ili primenom odgovarajućih sanacionih i lokalizacionih mera.*

*Preventivno delovanje čine: definisanje prirodne ranjivosti PV konkretnog područja (izvorišta, izdani ili njenog dela); definisanje rizika od zagađenja PV; definisanje tzv. "zona sanitarne zaštite" (ZSZ) izvorišta i primena odgovarajućih mera zaštite u svakoj od definisanih zona; prognoza efekata potencijalnih zagađenja* (na osnovu definisanih prirodne osetljivosti, hazarda i rizika) izdani i definisanje odgovarajućih sanacionih i lokalizacionih mera zaštite; *monitoring kvaliteta PV i ostalih relevantnih parametara životne sredine*, iz koga će proisteći podaci, na osnovu kojih se donosi odluka o eventualnoj primeni sanacionih i lokalizacionih mera, kao i o eventualnim korekcijama u pogledu definisanog rizika od zagađenja i zona i mera sanitarne zaštite.

Pored preventivnog delovanja, koje se neposredno odnosi na očuvanje kvaliteta PV, treba propisati i nivo/intenzitete eksploatacije PV koji će obezbediti (prirodno) obnavljanje njihovih rezervi i sprečiti pojavu ranije pomenutih neželjenih efekata nadeksploatacije.

*Primenu lokalizacionih i sanacionih mera*, nakon registrovanog zagađenja PV čine:

- *definisanje vrsta i količina zagađujućih materija, definisanje prostornog obima zagađenosti i smerova kretanja/migriranja zagađujućih materija koje su dospеле u podzemlje*

- prognoza brzine i negativnih efekata širenja/migracije zagađujućih materija u zemljišnom pokrivaču, nadizdanskoj zoni i samoj izdani i
- sprovođenje adekvatnih sanacionih i lokalizacionih mera u zagađenom delu izdani (i)li nadizdanske zone, zaustavljanje rada izvorišta i dr.

U slučaju *nadeksploatacije PV*, sprovode se mere kao što su: smanjenje intenziteta eksploatacije (u skladu sa utvrđenom vodopropusnošću i izdašnošću izdani), veštačko prihranjivanje izdani i dr.

## 21.4. ZONE SANITARNE ZAŠTITE

ZSZ se uspostavljaju na izvorištima PV, sa ciljem njihove preventivne zaštite od zagađivanja. Rezervisanjem određenih prostora (površina terena) za ZSZ, isti se stavaljaju pod manje ili više strog režim ograničenja privednih, komunalnih i drugih čovekovih delatnosti.

Definisanje ZSZ konkretnog izvorišta iziskuje poznavanje hidrogeoloških i hidrodinamičkih svojstava terena u široj okolini izvorišta, odnosno, ranjivosti izdani. Pored toga nužno je i poznavanje migrativnih svojstava različitih tipova zagađujućih materija u konkretnoj izdani i pri konkretnim uslovima (intenzitetima) eksploatacije PV. Konačno, i samo prisustvo (potencijalnih) zagađivača i vrste zagađujućih materija u okolini izvorišta i, sledstveno, povećani hazard i rizik od zagađivanja, takođe treba uzeti u obzir pri definisanju ZSZ.

U hidrogeološkoj i vodoprivrednoj praksi izdvajaju se najčešće tri ZSZ, a tako je propisano i domaćom regulativom [15, 91] :

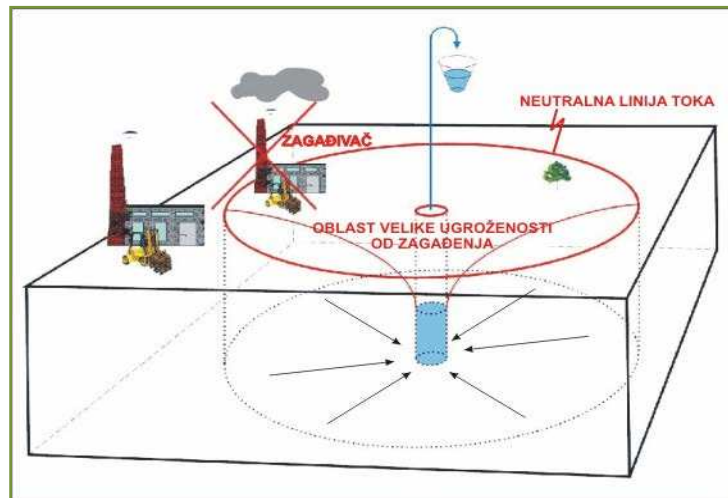
- **Zona neposredne zaštite ili zona strogog režima**
- **Uža zona zaštite ili zona ograničenja**
- **Šira zona zaštite ili zona nadzora**

Zona neposredne zaštite (naziva se još i „*prvom zonom*“) predstavlja, praktično, zonu fizičkog obezbeđenja vodozahvata. To je zona u kojoj je, fizičkom preprekom (ograda) i stalnim nadzorom, onemogućen pristup svim neovlašćenim licima, sa ciljem sprečavanja (namernog ili slučajnog) zagađivanja izdani, neposredno kroz ili uz vodozahvatne objekte. U njoj su zabrajene sve aktivnosti, osim onih koje su u neposrednoj vezi sa funkcionisanjem izvorišta. *Konture ove zone su*, u zavisnosti od rasporeda vodozahvatnih objekata, konfiguracije i pristupačnosti terena, prirodne ranjivosti i rizika od zagađivanja, *udaljene najčešće od nekoliko do nekoliko desetina metara od vodozahvatnih objekata* (bunara, kaptiranih izvora). U pojedinim slučajevima, npr. kod karstnih izdani, konture ove zone ne treba da obuhvataju samo prostor u neposrednoj blizini vodozahvata, već i prostorno izdvojene/udaljene zone (koncentričnog) poniranja voda u karstno podzemlje.

Uža zona zaštite („*druga zona*“) „okružuje“ zonu neposredne zaštite. U načelu, konture uže zone mogu da se poistovete sa tzv. „*neutralnom linijom toka*“, odnosno, područjem unutar depresionog levka ili tzv. „*radijusa uticaja bunara*“, koji se formira kao posledica dužeg kontinualnog rada bunara/izvorišta (slika 21.4.1). Polazište je da su, unutar neutralne linije, strujnice podzemnog toka (a time i potencijalne zagađujuće materije) usmerene ka bunaru, a da su, van ovog radijusa,

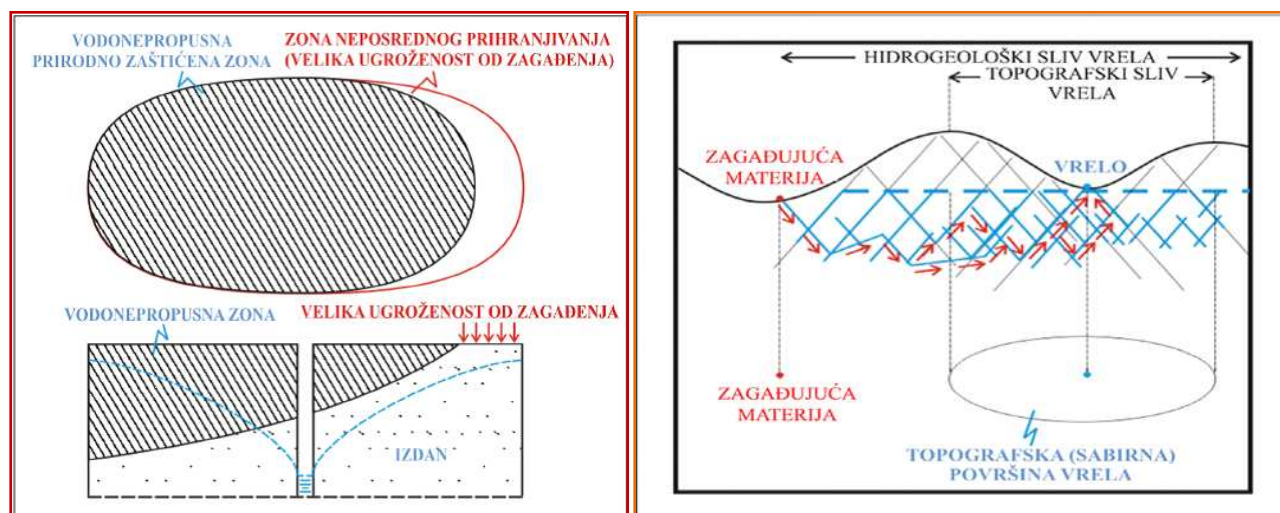


zadržale svoje prirodne (radom bunara neporemećene) putanje. Stoga bi se i adekvatna sanitarna ograničenja (preventivne mere zaštite) definisale i sprovodile upravo unutar neutralne linije.



**Slika 21.4.1. Šema „neutralne linije toka“ [39]**

Definisanje kontura zone ograničenja, odnosno, neutralne linije, zavisi od hidrogeoloških svojstava svakog konkretnog izvorišta, pa ne treba da mu se pristupa „šablonski“, bez uvažavanja konkretnih specifičnosti. Primeri „odstupanja od šablona“ prikazani su na slici 21.4.2.



**Slika 21.4.2. Levo: Razlike u ranjivosti delova kaptirane zbijene izdani  
Desno: Specifični uslovi mogućeg zagađenja karstne izdani [39]**

Na slici 21.4.2.-levo, uočljivo je da je izdan, na većem delu svog rasprostranjenja, (prirodno) zaštićena vodonepropusnim povlatnim slojevima. Šablonsko definisanje kontura zone ograničenja bilo bi neuputno i neekonomično, s obzirom da deo prostora unutar kontura radijusa uticaja („depressionog levka“) bunara može da bude iskorišćen za obavljanje primerene („nehazardne“) delatnost. Na istoj slici-desno, prikazana je, za karst svojstvena, prostorna nepodudarnost

topografskog i hidrogeološkog razvođa i mogući prodor zagađujuće materije u nebranjenu zonu prihranjivanja (ponor) karstne izdani, a odatle i do samog (kaptiranog) vrela.

Šira zona zaštite ili zona nadzora („treća zona“) uvodi se kao preventiva za smanjenje rizika od dospeća zagađujućih materija u zonu ograničenja. Teoretski, konturu šire zone zaštite činila bi linija topografskog razvođa sliva kome pripada konkretno izvoršte. Međutim, ovoliki zahvat prostora sa ograničenjem privrednih i drugih aktivnosti, neekonomičan je i, po pravilu, nije zastupljen u praksi. Sa druge strane, ponekad ni zaštita topografskog sliva nije dovoljna, što nam pokazuje primer karstne izdani, na slici 21.4.2-desno.

Navedeni kriterijumi za prostorno definisanje ZSZ mogu da budu i jesu drugačiji u regulativama i praksi različitih država. Konture uže (II) zone zaštite „postavljaju“ se na rastojanje (od vodozahvata) koje čestica vode, u konkretnim hidrodinamičkim uslovima, pređe za određeno vreme (npr.50 dana), dok se konture šire (III) zone zaštite često podudaraju sa „neutralnom linijom“.

\* \* \*

#### **Kontrolna pitanja:**

- 1/ Šta je režim PV ?
- 2/ Navesti faktore uticaja na režim PV ?
- 3/ Koji element režima izdani je najpodložniji kolebanju ?
- 4/ Koji meteorološki faktor ima najveći uticaj na režim nivoa PV ?
- 5/ Kako na režim PV mogu da utiču vulkanska aktivnost i zemljotresi ?
- 6/ Objasniti kako funkcioniše sezonski režim (nivoa) PV u našem podneblju ?
- 7/ Šta je suštinska razlika između “vododelničkog” i “priobalnog” tipa režima ?
- 8/ Šta su zagađujuće materije, a šta zagađivači ?
- 9/ Šta je prirodna osetljivost izdani, a šta hazard u pogledu zagađenja izdani ?
- 10/ Šta se podrazumeva pod migrativnošću zagađujućih materija ?
- 11/ Šta su ZSZ ? Koliko ZSZ se izdvaja u domaćoj hidrogeološkoj i vodoprivrednoj praksi ?

## XII DEO

### **ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA**

## **22. ZAHVATANJE I REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA**

Na prvoj strani poglavlja 1. konstatovali smo da je cilj ovog predmeta *definisanje i razumevanje osnovnih načela hidrogeologije, što predstavlja osnov za rešavanje praktičnih problema u domenu korišćenja i zaštite (od) PV*. U ovom, poslednjem poglavlju, dajemo osnovni uvid u to kako PV može da se zahvati (kaptira), da bi se koristila kao resurs, kao i kakvim tehničkim rešenjima možemo da izvršimo regulaciju (popravku) nepovoljnog prirodnog režima nivoa i(li) proticaja PV. Važno je znati da, samoj izradi vodozahvata ili objekata regulacije, prethode detaljna hidrogeološka istraživanja, koja imaju za cilj što bolje upoznavanje karakteristika ciljane izdani (rasprostranjenje u planu, dubina, debljina, tip i veličina poroznosti, veza sa površinskim vodama i dr.), kako bi se ista izvela na optimalan način.

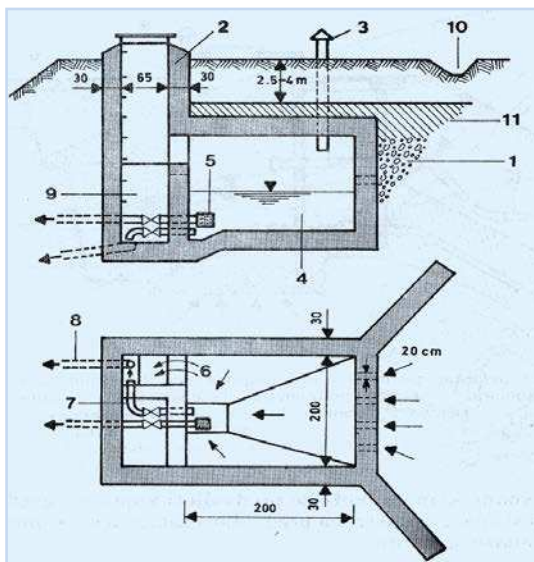
### **22.1. ZAHVATI PODZEMNIH VODA**

Zahvati PV mogu da se podele u 3 grupe:

- **Kaptaže izvora**
- **Bunari i**
- **Horizontalne vodozahvatne konstrukcije**

#### **22.1.1. Kaptaže izvora**

To su (najčešće betonske) građevine, kojima se zahvata (prikuplja) PV, koja (prirodno) ističe na izvorima. Količina zahvaćene vode zavisi od prirodnog dreniranja izdani i ne može se povećavati. Tip kaptaže zavisi od tipa izvora koji se kaptira, pa se, u načelu, razlikuju: **kaptaže gravitacionih izvora** (slika 12.1.2.1) i **kaptaže uzlaznih izvora**. Osnovni zahtev kod njihove izrade jeste da zahvat PV bude na mestu primarnog isticanja, kako zbog zahvatanja maksimalne količine vode, tako i zbog uslova sanitarne zaštite.



**Slika 22.1.1. Kaptaža gravitacionog izvora [34]:** 1. procedni deo; 2. kaptažna građevina; 3. ventilacioni otvor; 4. vodna komora; 5. usisna korpa; 6. preliv; 7. muljni ispust; 8. odvod prelivne vode i muljnog ispusta; 9. zatvaračka komora; 10. kanal za površinsku vodu; 11. glineni tampon

## 22.1.2. Bunari

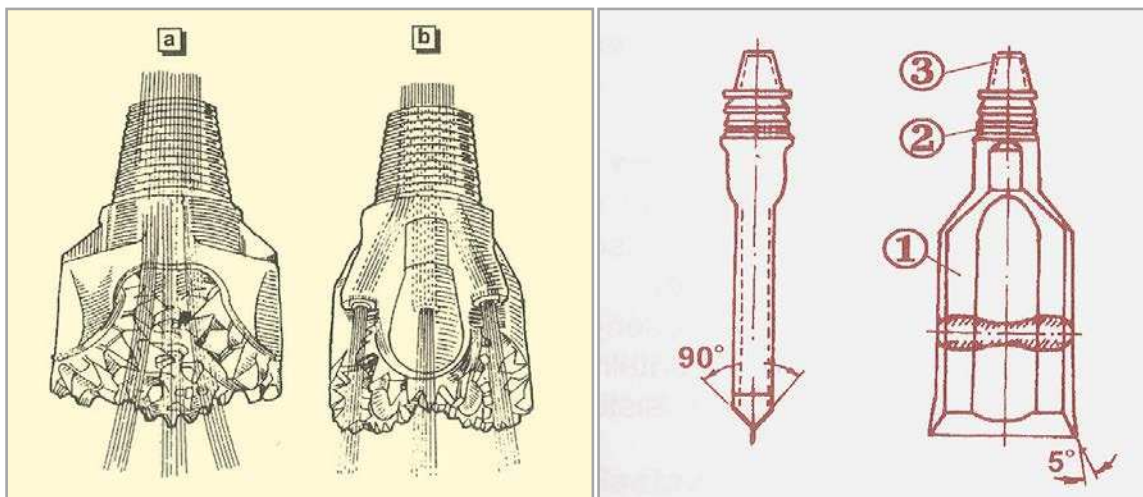
*Bunari su vertikalno bušeni ili kopani objekti za zahvatanje PV. Dubina, prečnik i ostale tehničke karakteristike bunara zavise od litološkog (hidrogeološkog) profila terena, očekivane izdašnosti i namene bunara. Svrha izrade bunara je prodor u dubinu terena, do izdani koja, na području istraživanja, nema prirodno dreniranje ili je ono nedovoljno spram iskazanih potreba za vodom.*

*Prema načinu izrade i osnovnim tehničkim karakteristikama, bunari mogu da budu: **1-bušeni, 2-kopani i 3-pobijeni.***

**Bušeni bunari.** Izrađuju se za zahvatanje PV u svim tipovima izdani, pomoću specijalizovanih mašinskih bušačih garnitura i pribora. Dubine bušenja se kreću do preko hiljadu metara, a prečnici bušenja su, okvirno, 100-1000 mm. U načelu, razlikuju se dve osnovne metode (sistema) mašinskog bušenja: *1-rotaciono i 2-udarno bušenje.*

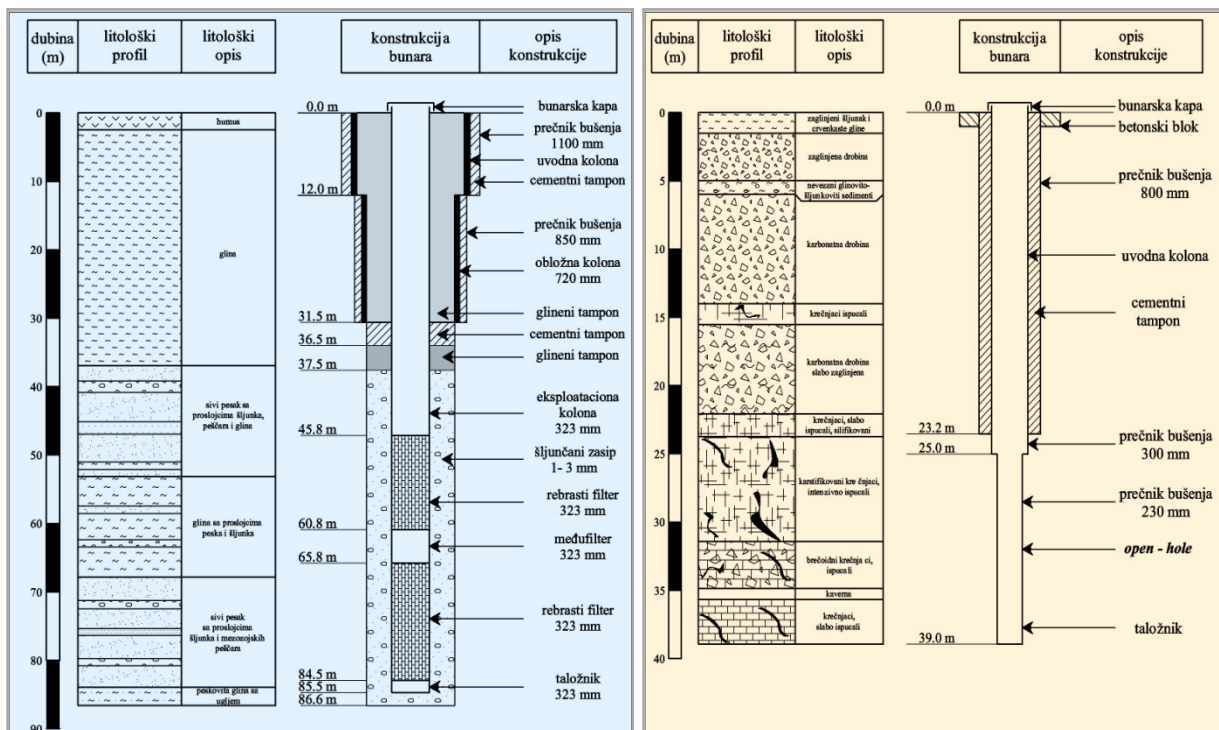
Rotaciono bušenje se primenjuje prevashodno kod bušenja kroz meke i rastresite stene. Bušača garnitura vrši pritisak i rotira pribor za bušenje, na čijem se dnu nalazi bušaće dleto (slika 22.1.2.1-levo), čiji zupci zasecaju i drobe stensku masu. Iznošenje zdrobljenog materijala, sa dna bunarske bušotine, odvija se najčešće uz pomoć tečnog cirkulacionog fluida (tzv. "isplake"), koji ima i funkciju hlađenja bušaćeg dleta i stabilizacije (sprečavanja osipanja) zidova bušotine.

Kod udarnog bušenja, garnitura vrši vertikalno podizanje i spuštanje (slobodnim padom) bušaćeg pribora, na čijem se dnu nalazi dleto/nož (slika 22.1.2.1-desno), koje, pri spuštanju i udaru o dno bušotine, zaseca stenu i drobi je. Izvodi se bez isplake, a nabušeni materijal se vadi pomoću odgovarajućih pribora. Primenjuje se kod bušenja u čvrstim stenama, dok bi, u mekim i rastresitim stenama, bilo veoma otežano, zbog osipanja zidova i stvaranja proširenja/kaverni u zoni rada dleta.



**Slika 22.1.2.1. Levo: Dleta sa rotirajućim konusima za rotaciono bušenje: sa kanalima za cirkulaciju isplake u centralnom delu (a) i sa strane (b); Desno: Pljosnato dleto za udarno bušenje: 1-telo dleta; 2-navoj za spašavanje pribora (u slučaju havarije) 3-navoj za bušaće šipke [44,15]**

Nakon završenog bušenja, bunar se oprema odgovarajućom bunarskom konstrukcijom, koja treba da obezbedi (bočni) priliv PV iz kaptirane izdani (vodonosnih slojeva) u bunar i njeno sprovođenje do površine terena. Kod zahvataja PV u okviru (rastresitih) slojeva peska i(li) šljunka (slika 22.1.2.2-levo), obavezni i najvažniji deo bunarske konstrukcije čine bunarski filteri i prifilterski šljunčani zasip, koji imaju dvostruku funkciju: 1- treba da omoguće što efikasniji (u hidrauličkom smislu) priliv PV iz kaptirane izdani u bunar i 2- sprečavaju osipanje zidova bušotine i obezbeđuju mehaničku stabilnost bunara. Kod zahvatanja PV u okviru čvrstih (ispucalih ili kavernoznih) stena, s obzirom da, u načelu, nema osipanja zidova, bunarski filteri i zasip nisu obavezni deo bunarske konstrukcije, već kaptirani interval može da se ostavi “otvorenim” (tzv. “open hole”) (slika 22.1.2.2-desno).



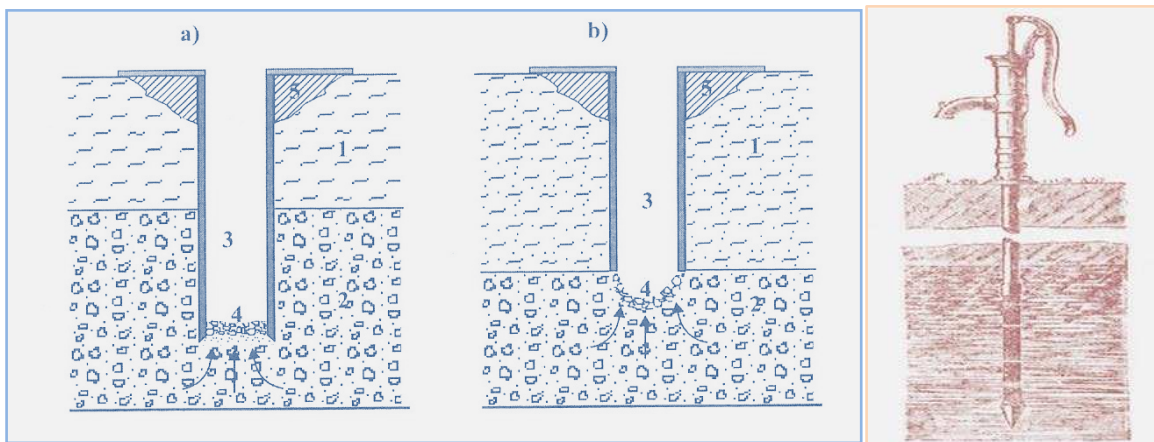
**Slika 22.1.2.2. Primeri litoloških profila i konstrukcija bušenih bunara [15]; Levo: U rastresitim i slabo vezanim stenama; Desno: U čvrstim stenama (karstifikovani krečnjaci)**

Ukoliko je kaptirana izdan arteskna, PV će, iz bunara, sama isticati na površinu terena. Ukoliko je sa slobodnim ili subarteskim nivoom, ili je (arteski) samoizliv nedovoljan, PV se ispumpava – najčešće pomoću potapajućih bunarskih pumpi, koje se ugrađuju iznad ili ispod bunarskih filtera.

Deo bunara iznad kaptiranih intervala se “izoluje” različitim varijantama tamponiranja (glinom) i(li) cementacije, da bi se sprečio priliv potencijalno zagađenih površinskih i plitkih podzemnih voda, kao i da bi se “očuvao” arteski pritisak kaptirane izdani, odnosno, samoizliv.

Bušeni bunari mogu da budu: *savršeni*, kada dopiru do (vodonepropusne) podine kaptirane izdani ili vodonosnog sloja (jednog ili više njih) ili (što je ređi slučaj) *nesavršeni*, kada bunar svojim dnom ne doseže vodonepropusnu podinu.

**Kopani bunari** služe za zahvatanje PV prve (najpliće) izdani, pa su im maksimalne dubine 20-30m, a prečnici od jednog do nekoliko metara. Za razliku od bušenih, priliv vode je, najčešće, kroz dno kopanog bunara (slika 22.1.2.3-levo), pa su, samim tim, u načelu, *nesavršeni*. Iskop se izvodi pomoću mehanizacije ili ručno. Zidovi bunara se oblažu betonskim prstenovima, ciglom ili kamenom, zbog zaštite od obrušavanja i prodora zagađujućih materija iz plićih delova terena. Po završenom iskopu i oblaganju, bunar se ispira i na dno se postavlja filterska ispuna (sloj granulata).



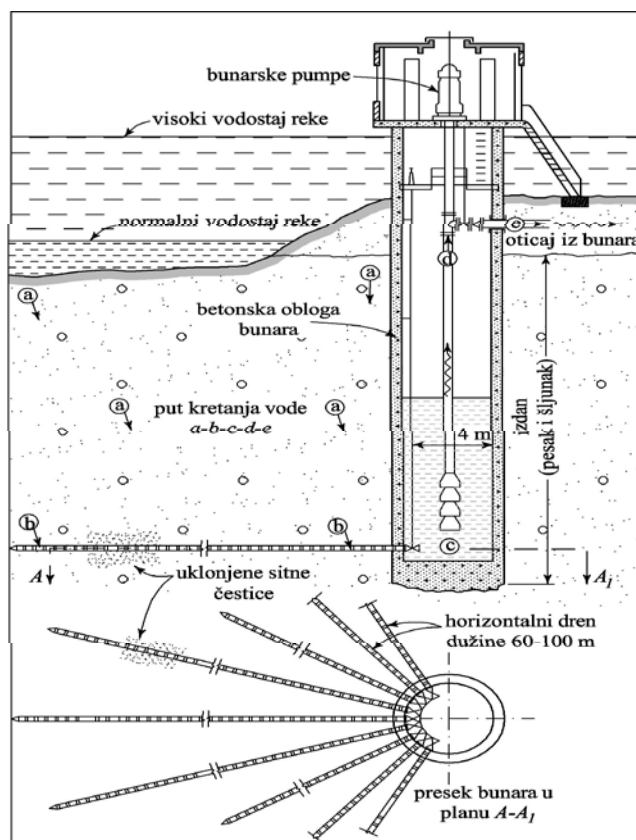
**Slika 22.1.2.3. Levo: Kopani bunari sa ravnim (a) i polusferičnim (b) dnom** [45,15]: 1- povlatni vodonepropusni sloj; 2- vodonosni sloj; 3- bunar; 4- sloj granulata na dnu bunara; 5- vodonepropusni glineni tampon (sanitarna zaštita bunara); **Desno: Pobijeni bunar** [71, 20]

**Pobijeni bunari** su *nesavršeni* i poznati i pod nazivima *Nortonovi ili abisinski bunari*. Ne buše se, niti kopaju, već se, sa površine terena, do dubine od 5-6 m, u plitku zbijenu izdan, pobijaju cevi (malog) prečnika, do oko 100 mm. Na dnu konstrukcije se nalazi šiljak, a neposredno iznad njega perforirana cev (filter) dužine oko 1m, obmotana sitom (slika 22.1.2.3-desno). Imaju malu izdašnost i najčešće se koriste za individualno vodosnabdevanje domaćinstava. Crpenje vode najčešće je pomoću ručne klipne pumpe.

### 22.1.3. Horizontalne vodozahvatne konstrukcije

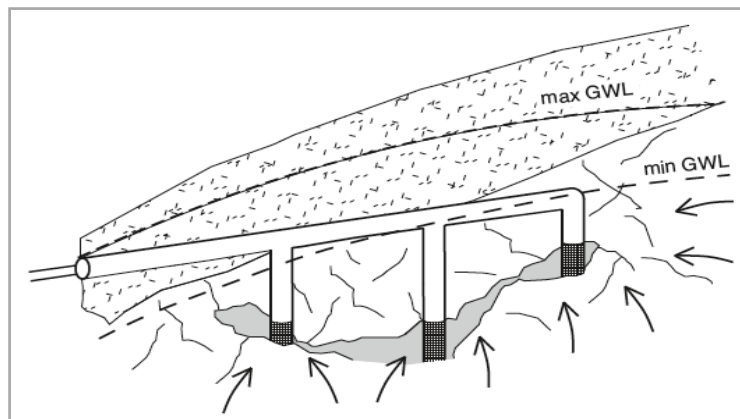
Ovde spadaju: **1-bunari sa horizontalnim drenovima, 2-vodozahvatne galerije, 3-horizontalne drenažne bušotine i 4-pokrivene horizontalne drenaže**

**Bunari sa horizontalnim drenovima** poznati su i kao *kolektorski, infiltracioni ili Reni-bunari*. Izrađuju se u zbijenim, a najčešće u aluvijalnoj izdani. Sastoje se od vertikalnog šahta velikog prečnika (nekoliko metara), iz koga se, u izdan, hidraulički utiskuju horizontalni drenovi – perforirane cevi (filteri), koji u planu formiraju radijalni raspored (slika 22.1.3.1) Prečnik perforiranih cevi najčešće je do 20 cm, a ukupna dužina (segmenata) jednog drena može biti od nekoliko desetina do preko 100m. Prilikom utiskivanja drenova, ispiraju se sitnije čestice (peska) u njihovoj neposrednoj zoni, čime se postiže formiranje svojevrsnog prirodnog filterskog zasipa, koji obezbeđuje bolju vodopropusnost prifiltarske zone. Najveće izdašnosti postižu se kada su horizontalni drenovi "podvučeni" pod korito reke i kada, pored podzemne, "prikupljaju" i infiltriranu rečnu vodu. Mogu se izvoditi i u delovima izdani koji nisu u neposrednoj blizini reke, ali je, tada, njihova izdašnost manja.



**Slika 22.1.3.1. Kolektorski bunar u blizini reke [84-adaptirano,15]**

**Vodozahvatne galerije.** Nazivaju se i *vodosabirnim ili infiltracionim galerijama*. Ukoliko se zahvata PV razbijene izdani, u (sub)horizontalne bušotine ili okna (većeg prečnika) ne ugrađuju se cevi i tada se nazivaju *galerijama*. Izrada galerija je česta u karstu, a cilj je prodor do zasićenih (vodonosnih) karstnih kanala, iz kojih se, u sušnim periodima, ne ostvaruje podzemni doticaj ka hipsometrijski višim prirodnim punktovima isticanja (vrelima). Galerije se najčešće lociraju na padinama, u zonama vrela i usmeravaju u zaleđe izdani. Mogu da se kopaju/buše i iz vertikalnih šahtova. Na slici 22.1.3.2, prikazana je galerija sa tri šahta, kojom je ostvarena kontrola (arteskog) samoizliva, tokom perioda velikih voda, dok se, tokom perioda malovođa, PV crpi.

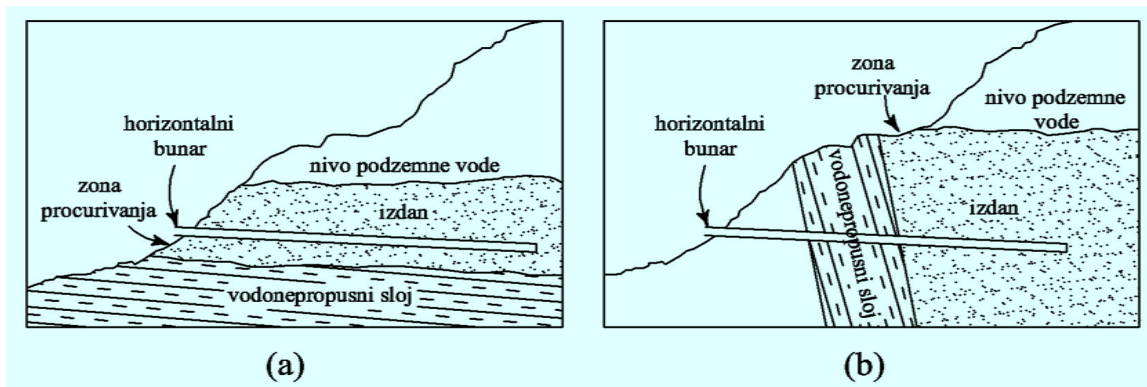


**Slika 22.1.3.2. Kaptiranje PV karstne izdani galerijom [80]**



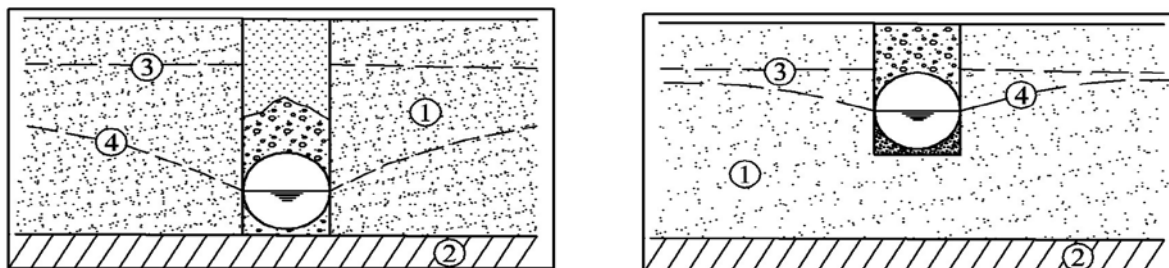
Galerije *bez (vodosabirnih i kontrolnih) šahtova*, grade se pod (nešto većim) nagibom, da bi zahvaćena PV isticala gravitaciono. Nazivaju se i *vodozahvatnim potkopima*.

Relativno jednostavni i ekonomični zahvati PV na padinama su (*sub*)**horizontalne drenažne bušotine** malog prečnika (slika 22.1.3.3), u koje se ugrađuju perforirane cevi (filteri). Često se koriste kao drenaže PV, u cilju sprečavanja kliženja ili odrona na (dreniranim) padinama.



Slika 22.1.3.3. Primeri horizontalnih drenaža [84-adaptirano, 15]

**Pokrivene horizontalne drenaže.** Prave se tako što se, u iskopane rovove, polažu drenažne perforirane cevi, oko kojih se postavlja adekvatno granulisan šljunčani (filterski) zasip, a preko toga, zemljišni sloj. Mogu da budu *savršene i nesavršene* (slika 22.1.3.4).



Slika 22.1.3.4. Šema savršene (levo) i nesavršene (desno) pokrivene horizontalne drenaže [43-adaptirano, 15]: 1- izdan; 2- vodonepriopusna podina; 3- prirodni nivo izdani; 4- nivo izdani snižen dreniranjem

## 22.2. REGULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA

### 22.2.1. Povećanje kapaciteta izvorišta podzemnih voda

Izvorište PV je prostor koji u sebe uključuje same objekte za zahvatanje PV (jedan ili više njih), ali i širi deo terena, koji odgovara radijusu uticaja rada vodozahvata ili slivnom području, u okviru koga PV otiču ka vodozahvatu [67– delim. izmenjeno]. U pogledu kapaciteta, odnosno, količine (eksploatacionih rezervi) zahvaćenih PV, izvorišta obuhvataju veoma širok dijapazon: od kaptiranih izvora skromnih izdašnosti, reda veličine delova l/s, namenjenih, npr., vodosnabdevanju manjih

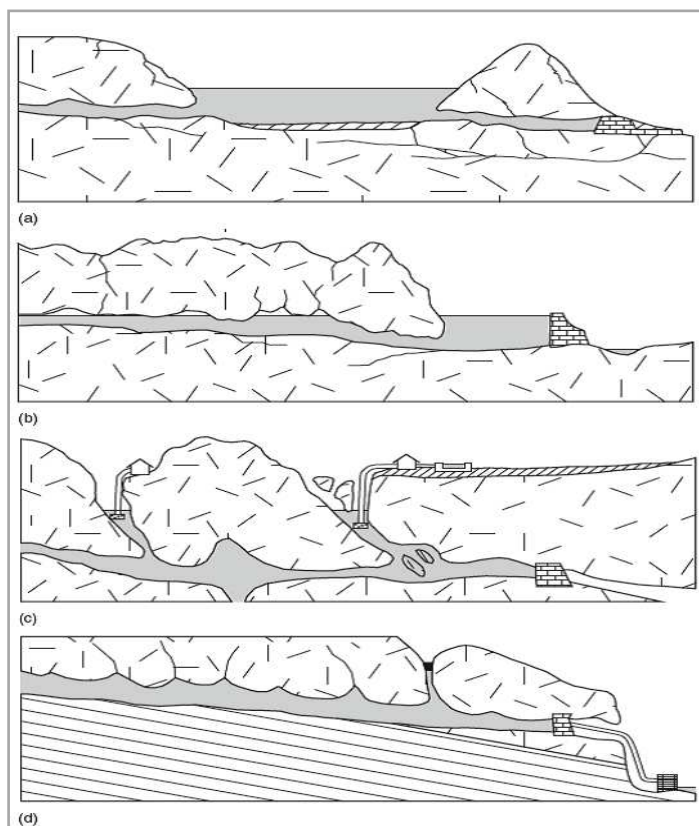
seoskih naselja, pa do velikih izvorišta, za vodosnabdevanje gradova, sa velikim brojem bunara, kojima se PV zahvata u iznosima od stotina l/s do m<sup>3</sup>/s.

U određenim uslovima, u cilju povećanja eksploatacionih rezervi PV izvorišta, sprovodi se veštačka regulacija (poboljšanje) režima nivoa i pražnjenja izdani. Mogu da se izdvoje tri osnovne metode veštačkog povećanja rezervi PV [15]: **1/ Veštačko prihranjivanje izdani; 2/ Veštačko podizanje nivoa izdani i 3/ Veštačko sniženje nivoa izdani.**

O **veštačkom prihranjivanju izdani** već je bilo reči u poglavlju 11.1.2.

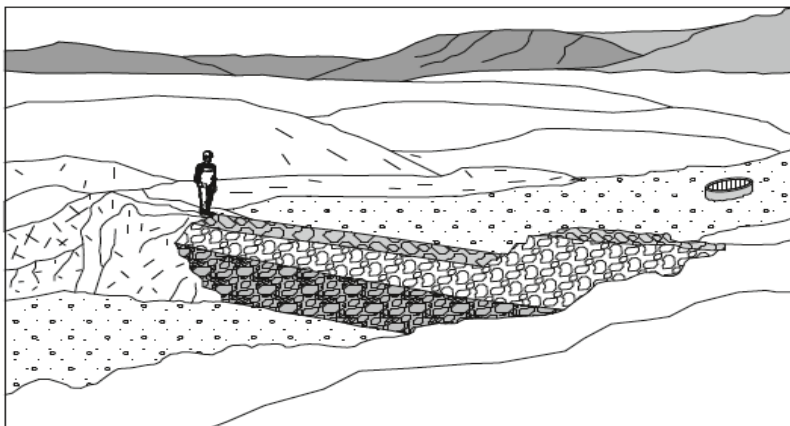
**Veštačko podizanje nivoa izdani** postiže se izgradnjom vodonepropusnih podzemnih (potpovršinskih) barijera i formiranjem *veštačkih podzemnih akumulacija*. Najčešća primena je u karstu i plitkim zbijenim izdanima.

*Veštačko podizanje nivoa karstne izdani* ostvaruje se postavljanjem veštačke barijere (brane) na mestu isticanja karstnog vrela ili na nekom drugom punktu, u zavisnosti od konkretnih hidrogeoloških svojstava terena, geotehničkih i hidrotehničkih uslova gradnje i očekivanih efekata regulacije (slika 22.2.1.1). Najpogodnije su karstne izdani koje se dreniraju preko jednog vrela.



**Slika 22.2.1.1. Šeme regulacije karstnih izdani u Kini vodonepropusnim barijerama [80]:** a i b-formiranjem veštačkih površinskih rezervoara, što se odražava i na podizanje nivoa PV; c- podizanjem nivoa izdani omogućeno je crpenje vode iz dostupnih karstnih kanala; d-regulisano isticanje (zahvatanje) vode, koja se gravitaciono transportuje do rezervoara

*Potpovršinske brane* (vodonepropusne barijere) u *plitkoj aluvijalnoj izdani* (slika 22.2.1.2) služe za čuvanje (skladištenje) i racionalno korišćenje PV u aridnim oblastima. Barijera se gradi popreko, u odnosu na pružanje rečnog korita, od površine tla do matične stene, čime se postiže zaustavljanje i skladištenje PV povremenih podzemnih tokova.



**Slika 22.2.1.2. Skica podpovršinske brane od malterisanog kamena u aluvijumu [80]**

**Veštačko sniženje nivoa izdani.** U načelu, svaki bunar, galerija, drenaža, kojima se zahvata PV, koja, u prirodnim uslovima, ili nije bila dostupna ili je isticanje bilo nedovoljno, predstavlja regulaciju veštačkim sniženjem nivoa. Sniženjem nivoa PV u vertikalnom bunaru ili sniženjem kote isticanja, galerijom ili horizontalnom drenažom, narušavaju se, odnosno, regulišu prirodni tok i režim filtracije u izdani, tako što se PV usmerava ka željenom punktu i zahvata.

Ovaj vid regulacije široku primenu nalazi i u slučajevima kada PV predstavljaju smetnju za realizaciju rudarskih, poljoprivrednih i dr. projekata – o čemu govorimo u nastavku.

## 22.2.2. Odvodnjavanje rudarskih radova

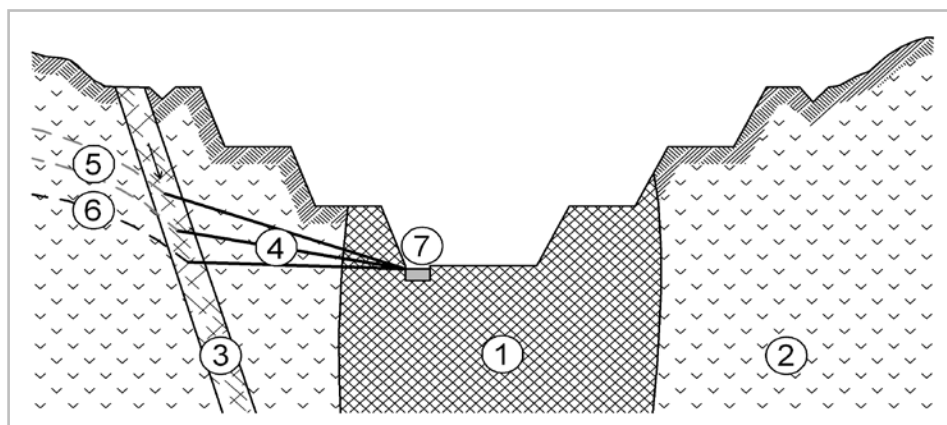
Pri otkrivanju i razradi ležišta mineralnih sirovina (LMS), često se javljaju **prilivi rudničkih voda**, koji, u zavisnosti od količina i prostornog rasporeda, mogu *da otežaju i uspore napredovanje rudarskih radova, izazovu materijalne gubitke i ugroze zdravlje i život rudara*. Pod **rudničkim vodama** podrazumevaju se *sve vode koje dospeju u rudarske radove* [18]. Čine ih, dakle, *ne samo PV, već i površinske i atmosferske vode, kao i otpadne vode – proistekle iz procesa rudarenja*. S obzirom da proces rudarenja podrazumeva veštačko usecanje, produbljivanje, snižavanje i sl. terena, samim tim se, u zoni kopa, formira novi niži (veštački) erozioni bazis i remeti (povećava) prirodni hidraulički gradijent (ne samo) PV, pa je i priliv rudničkih voda intenzivniji.

U zavisnosti od hidroloških, geomorfoloških, strukturno-geoloških, litoloških i hidrogeoloških karakteristika LMS, odnosno, prostora, na kome se planira (ili već odvija) rudarenje, kao i na osnovu (planiranog) načina eksploatacije (podzemna ili površinska), površine i dubine kopa (rudnika), planiraju se i projektuju mere i metode odbrane i konkretne vrste regulacionih radova, koji za osnovni cilj imaju što efikasnije otklanjanje (dreniranje) rudničkih voda sa konkretnog prostora.

Proces planiranja i projektovanja odbrane od rudničkih voda je izuzetno kompleksan i multidisciplinaran, pri čemu je suštinski zadatak hidrogeologa taj da, na osnovu sprovedenih istraživanja LMS i definisanog načina njegove eksploatacije, napravi prognozu priliva rudničkih voda u (buduće) rudarske radove, na osnovu koje će se projektovati i primeniti konkretne mere i vrste regulacionih radova.

U nastavku je prikazano nekoliko primera konkretnih metoda odvodnjavanja rudnika.

Rasedne zone često usložavaju hidrogeološke uslove u zoni rudnika, s obzirom da mogu da budu sprovodnici voda iz susednih izdani prema LMS, ili se u njima akumuliraju PV. Na slici 22.2.2.1, prikazan je jedan od načina dreniranja ovodnjene rasedne zone, kojim je postignuto regulisano/kontrolisano dreniranje i usmeravanje PV ka ciljanom punktu. U konkretnom slučaju to je vodosabirnik na kopa, odakle se voda, dalje, evakuše, van radijusa uticaja kopa. Kako je ranije već istaknuto, rasedi mogu da predstavljaju i barijere kretanju PV voda (ka LMS), što pojednostavljuje odbranu od rudničkih voda.

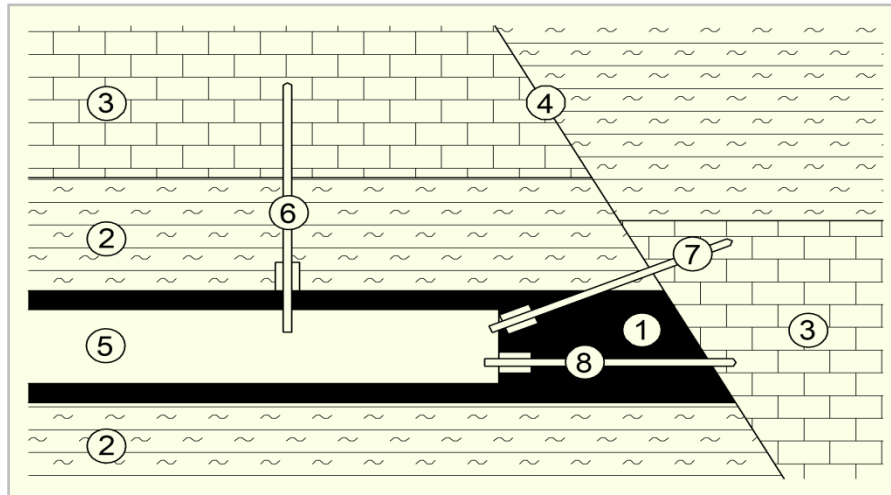


**Slika 22.2.2.1. Šema površinskog kopa u zoni uticaja ovodnjenog raseda [18]:** 1-rudno telo (LMS); 2-okolne stene; 3-ovodnjena rasedna zona; 4-drenažne bušotine; 5-nivoi PV u nedreniranim uslovima; 6-nivo PV pri dreniranju raseda; 7-vodosabirnik na kopa

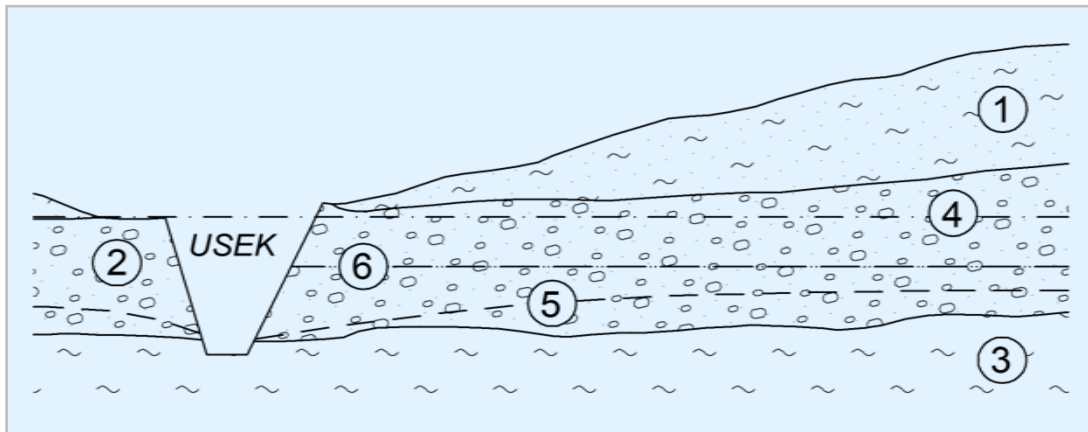
Na slici 22.2.2.2, prikazano je dreniranje izdani u povlati i bokovima podzemnog rudarskog rada, kojim se postiže preventivno i regulisano otklanjanje mogućnosti potencijalno opasnih prodora PV. Izdrenirana PV se sprovodi do vodosabirnika, a potom evakuše van radijusa uticaja kopa.

Na slici 22.2.2.3, prikazana je šema useka za odvodnjavanje povlatne izdani u fazi otvaranja kopa. Usecanjem terena i (veštačkim) "presecanjem" izdani, veštački se snižava nivo PV, koja se, u uslovima poremećenog (povećanog) hidrauličkog gradijenta, drenira u usek.

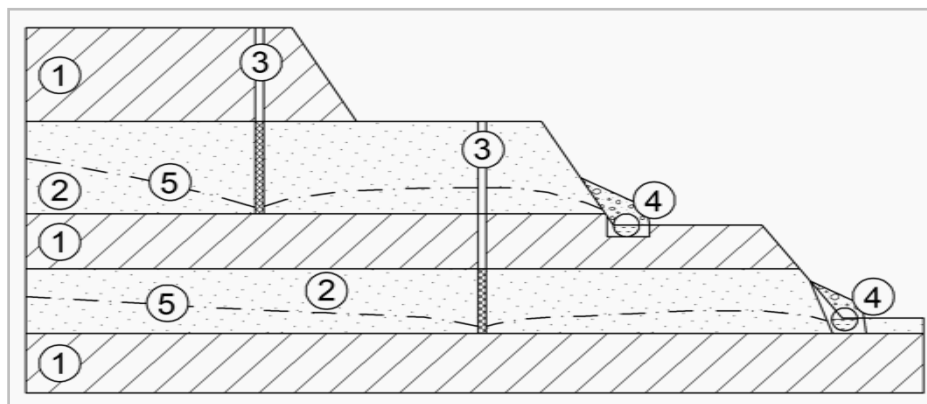
U zonama površinskih kopova, u zavisnosti od konkretnih hidrogeoloških svojstava terena, drenažni bunari mogu da se lociraju ili van kontura kopa ili na pojedinim etažama površinskog kopa, kako je prikazano na slici 22.2.2.4. Iscrpljena voda se sprovodi do drenažnih kanala i, dalje, van radijusa uticaja kopa.



**Slika 22.2.2. Šema dreniranje podzemnog rada bušotinama [18]:** 1-ugljeni sloj (ležište); 2-vodonepropusni glinac; 3-vodonosni krečnjak; 4-rased; 5-rudarski rad (hodnik); 6, 7 i 8-drenažne bušotine



**Slika 22.2.3. Šema useka za odvodnjavanje [18]:** 1-peskovita glina; 2-vodonosni šljunak i pesak (povlatna izdan); 3-vodonepropusna glina; 4- početni (prirodni) nivo PV; 5-regulisani (sniženi) nivo PV; 6-projektovani nivo otkopne etaže



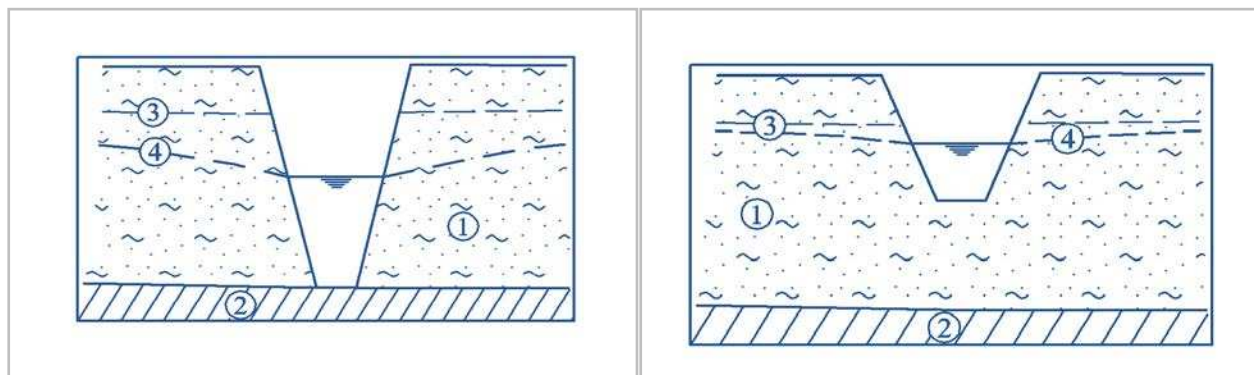
**Slika 22.2.4. Šema etažnih drenažnih bunara [18]:** 1-vodonepropusne stene; 2-vodonosne stene; 3-etažni drenažni bunari; 4-drenažni kanali; 5-krive sniženja nivoa PV

### 22.2.3. Odvodnjavanje poljoprivrednog zemljišta

Odvodnjavanju (dreniranju) poljoprivrednog zemljišta pristupa se u cilju eliminisanja njegovog *prevlažavanja*, koje za posledicu ima "gušenje" i pad prinosa poljoprivrednih kultura. Razlikuju se dve osnovne grupe drenažnih objekata: *horizontalni i vertikalni*.

*U horizontalne spadaju: otvoreni kanali (slika 22.2.3.1) i pokrivene drenaže (slika 22.1.3.4).*

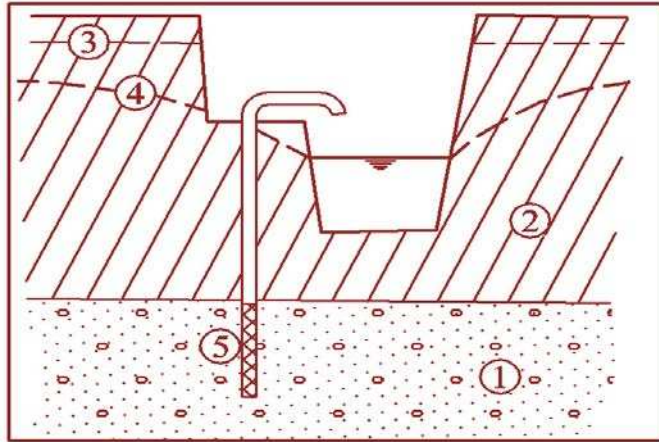
Otvoreni (savršeni ili nesavršeni) kanali dreniraju *sve vrste drenažnih voda*: padavine, površinske i PV. Prema funkciji, kanali se dele na *drenažne i transportne*, koji se međusobno povezuju u adekvatne "drenažne meže", čije karakteristike zavise od: morfologije terena, porekla drenažnih voda, karakteristika drenirane izdani, eventualnog iskorišćavanja dreniranih voda i dr.



**Slika 22.2.3.1. Šeme savršenog (levo) i nesavršenog (desno) otvorenog drenažnog kanala [43, 15]**

*Pokrivene horizontalne drenaže* (o kojima je već bilo reči u poglavlju 22.1.3) grade se u slučajevima kada su PV dominantne kao drenažne.

*U vertikalne drenažne objekte* spadaju bunari, koji mogu biti: *kopani ili bušeni i savršeni ili nesavršeni*, različitih prečnika, dubina i drugih konstruktivnih karakteristika, prilagođenih svojstvima drenirane izdani i projektovanim količinama dreniranih PV. Bunarima se crpi PV i snižava nivo izdani u podini zemljišnog sloja, čime se redukuje i količina vlage u zemljišnom sloju. U okviru drenažne mreže, bunari su međusobno povezani cevovodima za transport iscrpljenih voda. Bunari mogu da budu i deo *kombinovanog drenažnog sistema*, kada se buše uz otvorene kanale, kojima se dreniraju površinske vode, pri čemu se kanalima odvodi i PV koja je iscrpljena bunarima (slika 22.2.3.2).



**Slika 22.2.3.2. Kombinovana drenaža sa bunarom uz otvoreni kanal [43, 15]**

1-izdan pod pritiskom; 2-vodonepropusna povlata; 3-prirodni nivo izdani; 4-regulisaninivo izdani; 5-bunar

\* \* \*

**Kontrolna pitanja:**

- 1/ Šta prethodi izradi vodozahvata ili objekata regulacije režima PV ?
- 2/ Kako se dele zahvati PV ?
- 3/ Šta je suštinska razlika između kaptaža izvora i ostalih vrsta vodozahvata ?
- 4/ Prema načinu izrade i osnovnim tehničkim karakteristikama, bunari se dele na...?
- 5/ Objasniti način funkcionisanja bunara.
- 6/ U kojim sredinama se najčešće grade kolektorski bunari, a u kojim vodozahvatne galerije ?
- 7/ Tri osnovna načina veštačkog povećanja rezervi PV nekog izvorišta su...?
- 8/ Kako funkcioniše i u kojim sredinama može da se primeni veštačko podizanje nivoa izdani ?
- 9/ Navesti barem dve metoda dreniranja rudničkih voda.
- 10/ Kako se dele objekti za dreniranje poljoprivrednog zemljišta ?

## LITERATURA

1. Alekin, O. A. (1970): **Osnovi gidrohemii**, Gidrometeoizdat, Leningrad
2. Baumgartner A., Reichel E.(1975): **The World Water Balance**, Elsevier, Amsterda
3. Bear J., Chang D.H.A (2010): **Modelling Groundwater Flow and Contaminant Transport**, Springer, Dodrecht, Heidelberg, London, New York
4. Chilton J. Seiler K (2006): **Groundwater occurrence and hydrogeological environments**, In: *Protecting Groundwater for Health, Managing the Quality of Drinking-water Sources*, 21-47, Eds: Schmol O. et.al, WHO
5. Craig H. (1963) : **The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas**, Nuclear geology in geothermal areas, Consiglio nazionale delle ricerche-Laboratoria di geologia nuclere, Pisa
6. Cvijić, J. (1926): **Geomorfologija**, Državna štamparija, Beograd.
7. Daly E, Katul G, Porporatto A (2007): **Ecohydrology: Water, Carbon and Nutrient Cycling in the Soil-Plant Atmosphere Continuum**, In: *The Handbook of Groundwater Engineering (sec. edition)*, 29.1-29.42, Editor: Delleur J, CRC Press Taylor and Francis group, Boca Raton-London-New York
8. Davis, N. S. & De Wiest, R. J. M. (1966): **Hydrogeology**, New York/ London/ Sydney.
9. Delleur J, (2007): **Elementary Groundwater flow and transport processes**, In: *The Handbook of Groundwater Engineering (sec. edition)*, 3.1-3.42, Editor: Delleur J, CRC Press Taylor and Francis group, Boca Raton-London-New York
10. De Vries J.J (2000): **The Global Cycle of water**, In: *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle*, Editor: Mook WG, 1-24, Centre of Isotope Research, Gronigen
11. De Wiest, R. J. M (1965): **Geohydrology**, New York, London, Sidney, Toronto.
12. Dimitrijević, M. (1978): **Geološko kartiranje**, BIGZ, Beograd.
13. Dimitrijević, N. (1988): **Hidrohemija**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
14. Dokmanović P. (1999): **Hidrogeologija tercijarnih basena Srbije**, „Zadužbina Andrejević“, Beograd
15. Dokmanović P. (2010) – **Inženjerska hidrogeologija**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
16. Dokmanović P, Krnić O, Martinović M, Magazinović S. (2012): **Hydrogeothermal Resources in Spa Areas of Serbia - Main Properties and Possible Improvement of Use**, "Thermal Science", Vol. 16, No. 1, pp. 21-30, Vinca Inst.Nucl.Sci.
17. Dragišić V. (1997): **Opšta hidrogeologija**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
18. Dragišić V. (2005.): **Hidrogeologija ležišta mineralnih sirovina**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
19. Dragišić V. i Polomčić D. (2009): **Hidrogeološki rečnik**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
20. Dragišić V. i Živanović V. (2014): **Opšta hidrogeologija**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
21. Driscoll GF ( 2003): **Groundwater and Wells**, Second Edition, Johnson screens, St Paul, Minnesota, USA
22. Dukić, D. (1984): **Hidrologija kopna**, Naučna knjiga, Beograd.
23. Đorđević, V., Đorđević, P. & Milovanović, D. (1991): **Osnovi petrologije**, Nauka, Beograd.
24. Fetter CW ( 2001): **Applied Hydrogeology**, Fourth edition, Upper Saddle River, New Jersey
25. Filipović, B. (1980): **Metodika hidrogeoloških istraživanja**, Naučna knjiga, Beograd.
26. Fitts CR (2002): **Groundwater Science**, Academic Press, London
27. Fitts CR (2013): **Groundwater Science**, Second Edition, Elsevier
28. Freeze RA, Cherry JA (1979): **Groundwater**, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc., USA
29. Gascoyne, M. & Kamieni D. C. (1994): **The hydrogeochemistry of Fractured Plutonic Rocks in the Canadian Shield**, Applied Hidrogeology, Volume 2, 2/1994, Journal of the International Association of Hydrogeologists, 43-50, Hanover.



30. Gavič, I. K., Lučševa, A. A. & Semenova - Erofeeva, S. M. (1985): **Zbornik zadač po obščeji gidrogeologiji**, Nedra, Moskva..
31. Hemm, J. D. (1970): **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**, sec. edition, USGS Water supply paper 1473
32. Hiscock MK (2005): **Hydrogeology Principles and Practice**, Blackwell publishing, Oxford
33. Holting B (1984): **Hydrogeologie**, Ferdinand Enke Verlag, Stutgart
34. Jahić M. (1988): **Urbani vodovodni sistemi**, Udruženje za tehnologiju vode, Beograd
35. Janjić, M. (1985): **Inženjerska geologija sa osnovama geologije**, Naučna knjiga, 1-447, Beograd.
36. Jovanović-Kolomejceva L (2010): **Hemija i zaštita životne sredine**, Akademaska izdanja, Zemun, Beograd
37. Kirjuhin, V. A., Korotkov, A. I. & Pavlov, A. N. (1988): **Obščaja gidrogeologija**, Nedra Leningradskoe otdelenie, Leningrad.
38. Klimentov, P. P. (1980): **Obščaja gidrogeologija**, Visšaja škola, Moskva.
39. Krešić N., Vujsinović S. & Matić I. (2006): **Remedijacija podzemnih voda i geosredine**, Rudarsko geološki fakultet, Beograd
40. Krešić N. (2007): **Hydrogeology and Groundwater Modelling**, sec. edition, CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton
41. Kresic N. (2008): **Groundwater resources (Sustainability, Mangement and Restoration)**, McGraw-Hill, New York
42. Larson, J. (1984): **Ground water in hard rocks**, 1-228, UNESCO.
43. Lazić, M. (1990): **Specijalna hidrogeologija I deo (meliorativna hidrogeologija)**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
44. Lazić M. (2003.): **Istražno bušenje u hidrogeologiji**, Rudarsko-geološki fakultet, Beogradu
45. Lazić M. (2005.): **Izrada bezfilterskih bunara**, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu
46. Leap D (2007): **Geological Occurence of Groundwater**, In: *The Handbook of Groundwater Engineering (sec. edition)*, Editor: Delleur J, CRC Press Taylor and Francis group, Boca Raton-London-New York
47. Lehr J., Scott H., Gallagher B. & Voytek J. (1988): **Design and construction of water wells**, Van Nostrand Reinhold, New York
48. Ljvovič, M. I. (1974): **Mirovie vodnie resursi i ih buduščee**, Misl, Moskva.
49. Majkić B (2013): **Starenje bunara u aluvijalnim sredinama različitog stepena oksičnosti**, Doktorska teza, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
50. Marković, M. (1983): **Osnovi primenjene geomorfologije**, Geoinstitut, knj. 8., Beograd.
51. Mazar E (2004): **Chemical and Isotopic Groundwater Hydrogy** – third edition, Marcel Dekker inc., New York
52. Meinzer OE (1923): **Outline of Groundwater Hydrology with Definitions**, USGS Water-suply paper 494
53. Mihajlov, L. E. (1985): **Gidrogeologija**, Gidrometeoizdat, Leningrad.
54. Mijatović, B (1967): **Hidrodinamički mehanizam kraških izdani u niskim primorskim kolektorima**, Zavod za geološka i geofizika istraživanja-Geozavod, Vesnik, knj. VII, serija B, 1-114, Beograd.
55. Mijatović B (1990): **Kras-hidrogeologija kraških vodonosnika**, Geozavod, Beograd
56. Milanović, P. (1979): **Hidrogeologija karsta i metode istraživanja**, 1-302, Trebinje.
57. Milanović P. (1999): **Geološko inženjerstvo u karstu**, Energoprojekt, Beograd, 1999.
58. Milivojević M (2012): **Geotermologija i geotermalna energija**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
59. Milojević, N. (1967): **Hidrogeologija**, Zavod za izdavanje udžbenika Srbije, Beograd.
60. Morel FM, Hering GJ (1993): **Principles and Applications of Aquatic Chemistry**, Wiley and sons, New York
61. Mook W.G. (2006): **Introduction to isotope hydrology-Stable and radioactive isotopes of hydrogen, oxygen and carbon**, International contributions to hydrogeology, Vol. 25, IAH
62. Nikolić P, Petković K (1981): **Osnovi geologije**, Naučna knjiga, Beograd.

63. Novakovski SK, Lapcevic AP, Sudicky AE (2007): **Groundwater Flow and Solute Transport**, In: *The Handbook of Groundwater Engineering* (sec. edition), 20.1-20.43, Editor: Delleur J, CRC Press Taylor and Francis group, Boca Raton-London-New York
64. Ollier, K. (1984): **Tektonika i reljef**, Nedra, Moskva.
65. Petrović Z., Gutman I. i Petrović V. (2007): **Huminske materije u vodi**, „Hemijski pregled“, vol. 48, No 2, Beograd
66. Pineker E. V. (1984): **Podzemna gidrosfera**, Nauka, Novosibirsk.
67. Polomčić D. (2021): **Izvorišta i zahvati podzemnih voda**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
68. Prohaska S (2003): **Hidrologija-I deo**, Inst. „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu i Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd
69. Protić D. (1995) : **Mineralne i termalne vode Srbije**, „Geoinstitut“, posebna izdanja, knj. 17, Beograd
70. Pušić, M. (1994): **Hidraulika podzemnih voda**, Slavija-pres, Novi Sad.
71. Radovanović, S. (1897): **Podzemne vode** (izdani, izvori, bunari, terme i mineralne vode), Srpska književna zadruga knj. 42, Beograd.
72. Raghunath MH (2006): **Hydrology: Principles-Analysis-Design**, sec edition, New Age Intern. Publishers, New Delhi
73. Raudkivi, A. J. (1979): **Hydrology**, Pergamon pres, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt.
74. Seiler KP, Gat JR (2007): **Groundwater recharge from Run-off, Infiltration and Percolation**, Springer
75. Simić, D. (1988): **Mikrobiologija**, Naučna knjiga, Beograd.
76. Singhal BB, Gupta RP (2010): **Applied Hydrology of Fractured Rocks**, sec. edition, Springer
77. Stepanov, V. M. (1989): **Vvedenie v strukturnuju gidrogeologiju**, Nedra, Moskva.
78. Stepanović, B. (1962): **Principi opšte hidrogeologije**, Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Posebna izdanja knj. 11, Beograd.
79. Stevanović, Z. (1986): **Neki aspekti odnosa površinskih i izdanskih voda u karstu**, Geološki glasnik, knj. XI, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore, 103-111, Titograd.
80. Stevanovic Z (2010): **Utilization and regulation of springs**. In: **Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability** (eds. Kresic N. & Stevanovic Z.), 341-389, Elsevier Inc.
81. Stojadinović R (1984): **Mehanika tla I**, Naučna knjiga, Beograd
82. Šestakov, V. M. & Orlov, M. S. (1984): **Gidrogeologija**, MGU, Moskva.
83. Todd D (1980): **Groundwater Hydrology**, John Willey and Sons, USA
84. Todd D. & Mays L. (2005): **Groundwater hydrology** (3-rd edition), Willey international edition, USA
85. Trivić B, Dimitrijević M (2014): **Strukturna gelogija-osnovi**, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
86. Vernadskij, V. I. (1960): **Istorija prirodnih vod**, T. IV, kn. 2, Izdatelstvo AN SSSR, Moskva.
87. Voss C.: **The future of Hydrogeology**, Hydrogeology journal, vol.13, No 1, IAH & Springer, 2005.
88. Vrba J. & Zaporozec A. (1994): **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**, International contributions to hydrogeology, Vol. 16, IAH
89. Vuković, M. i Soro, A. (1991): **Određivanje koeficijenta filtracije preko podataka o granulometrijskom sastavu**, Institut “Jaroslav Černi”, Posebna izdanja, Beograd.
90. Weight DW (2004): **Manual of Applied Field Hydrogeology**, MC Graw-Hill, USA
91. **Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja** ("Sl. glasnik RS", br. 92/2008
92. **Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće** (Sl. glasnik RS 28/2019)
93. <https://www.indiamart.com>
94. <https://previews.123rf.com>
95. <https://environment.leeds.ac.uk>

96. <https://www.ninebelize.com>
97. <https://torcalrural.com>
98. [www.hidroing.biz](http://www.hidroing.biz)
99. <https://www.grf.bg.ac.rs>
100. [www.seco.cpa.state.tx.us/publications/renewenerg](http://www.seco.cpa.state.tx.us/publications/renewenerg)

