

6. HIDRAULIKA PODZEMNIH VODA U KRŠU

Pri proučavanju toka podzemnih voda razlikujemo tečenje u stijenama pukotinske poroznosti i tečenje u stijenama međuzrnske poroznosti. Međuzrnska poroznost se najčešće javlja kod rastresitih slojeva (aluvijalnih sedimenata) a pukotinska je karakteristična za stijenske mase karbonata (gipsa i halita).

Vjerojatno nema većeg izazova za hidrauličare i hidrogeologe od opisivanja tečenja u stijenama pukotinske poroznosti. Tečenje u stijenama pukotinske poroznosti se izučava za potrebe razvoja matematičkih modela koji služe prilikom planiranja eksploatacije nafte, plina i geotermalne vode kao i za potrebe sagledavanja pronosa zagađivala u vodonosnicima koji se koriste za potrebe vodoopskrbe. Jednaki, ako ne i veći problemi se javljaju kod deponiranja nuklearnog otpada u stijensku masu pukotinske poroznosti koja mora zadovoljavati uvijet da u vrlo dugačkom peridu (više stotina godina) deponirani otpad ne ugrozi biosferu.

Preko 50% teritorija Republike Hrvatske je pod kršom te za rješavanje niza inženjerskih problema treba sagledavati tok podzemnih voda u kršu. U našim krajevima je tok podzemnih voda najčešće sagledavan za potrebe vodoopskrbe i energetike a u zadnje vrijeme se sve više promatra i pronos zagađivala koja se na pojedinim lokacija nekontrolirano infiltriraju u geološke formacije koje sadrže podzemnu vodu te napreduju prema izvorima iz kojih se kaptira podzemna voda za potrebe vodoopskrbe.

Sami procesi tečenja podzemne vode u kršu su relativno jednostavni te se odvijaju po poznatim hidrauličkim zakonitostima. Problem u opisivanju realnih situacija predstavlja nepoznavanje oblika i dimenzija mreže pukotina (mikroskopskih pukotina, kaverni, spilja, kanala,..) kroz koju se odvija tečenje podzemne vode. Valja naglasiti da upravo zbog velikih problema pri definiranju geometrije pukotina, većina modela toka i pronosa nije dala očekivane (priželjkivane) rezultate.

Krš u hidrološkom smislu sačinjavaju karbonatna stijenska masa sa sistemom provodnika i akumulacionih prostora. Krš tvore topive stijene koje se nalaze blizu ili na površini.

Pod provodnikom se podrazumijeva element podsliva koji razliku razina vode pretvara u proticaj. Sistem provodnika i akumulacija sačinjavaju manje i veće pukotine, veliki i manji podzemni krški prostori, kraška polja i drugi produkti karstifikacije u zoni oscilacija voda u kršu.

Pod pojmom krš se podrazumijeva područje sastavljeno od površinskog i podpovršinskog dijela izlomljenog nizom pukotina uzrokovanih agresivnim fizikalnim i kemijskim djelovanjem vode. Karbonatne stijene su topive u vodi, tako da voda mijenja strukturu stijenske mase i formirajući sistem pukotina narušava njenu kontinuiranost. Pojava i stvaranje pukotinske poroznosti u stijenskoj masi vezana je za proces nazvan karstifikacija.

Sposobnost topivosti vode ovisi o temperaturi vode i njenom kemijskom sastavu u kojem važnu ulogu ima CO₂. Iz tog razloga se broj i veličina pora tokom vremena postepeno povećavaju. Pojava velikih sistema pukotina u pravilu je vezana za diskontinuitete endodinamičkog porijekla. Karstificirane stijene se nazivaju krš a sinonimi su karst i kras.

Sagledavanje toka vode u kršu je problem koji je izučavan još i u antičko doba, tako da su Homer, Thales, Aristotel i drugi pisali sa prirodnjačkog stanovišta o vezama voda kopna i mora u području sredozemlja.

Krš je vrlo heterogeno područje u kojem se kretanje podzemne vode može sagledati samo na osnovu velikog broja mjerenja razine vode, protoka i brzine, kemijskog sastava i temperature. Mjerenja treba provoditi na nizu mjernih mjesta kroz relativno dugo razdoblje.

Uobičajene hidrauličke i hidrološke pristupe nije moguće jednostavno primijeniti na krška područja zbog njihovog vrlo složenog sistema pukotina. Iz tog razloga se razvijaju i koriste posebni pristupi sagledavanju toka podzemne vode u kršu.

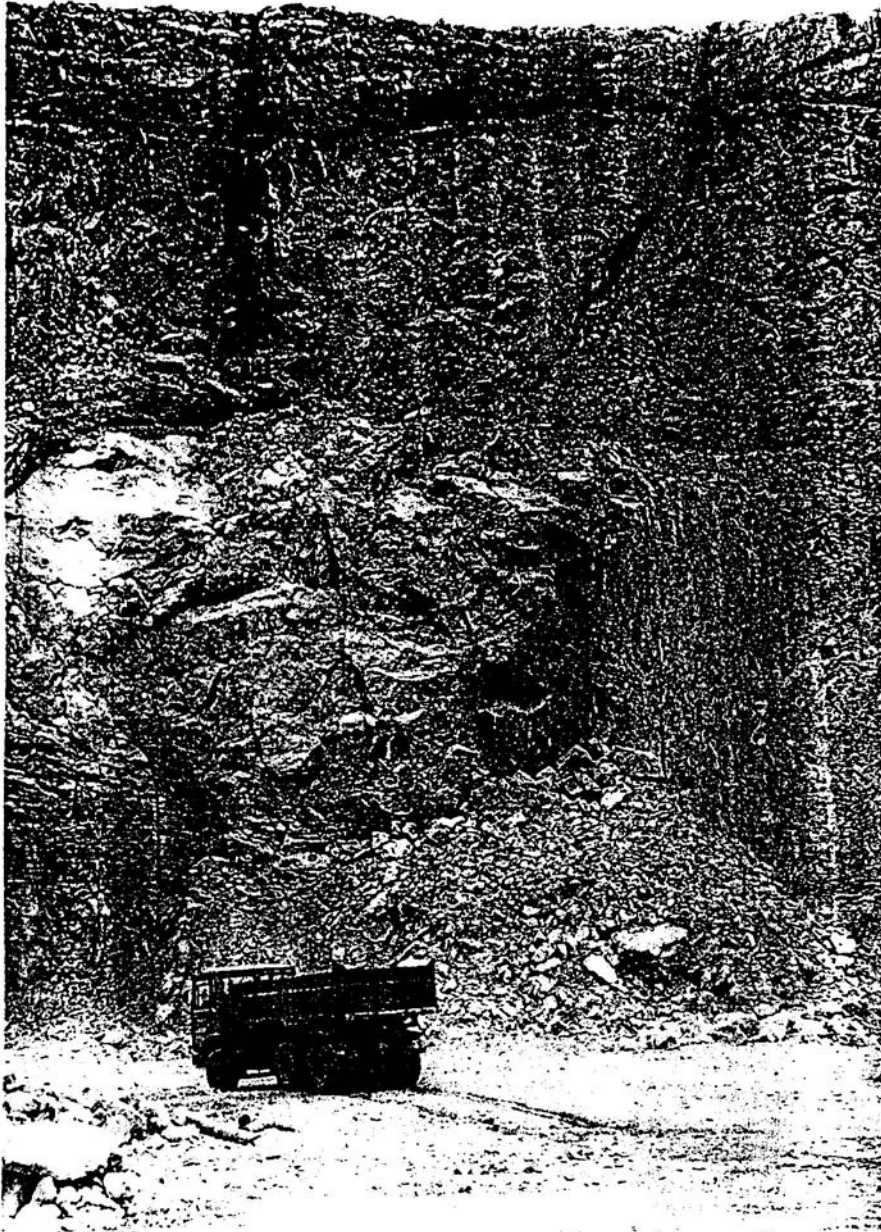
Ni jedan dosadašnji pokušaj kvantitativnog tretmana tečenja kroz karsni kolektor, primjenom poznatih hidrauličkih zakonitosti, nije završio očekivanim rezultatom.

Za analizu i određivanje infiltracije, formiranja podzemnih akumulacija i određivanja oticanja podzemnih voda bitne su karakteristike stijenskih masa koje izgrađuju sliv, odnosno tip njihove poroznosti.

Hidrološke specifičnosti krša su brza infiltracija palih oborina, mala akumulativna sposobnost u zoni sitne pukotinske poroznosti, te velika provodnost i stvaranje povremenih površinskih i podzemnih akumulacija u zonama krupnih pukotina. Posljedica ovakvih karakteristika je da slivovi, ili njihovi dijelovi izgrađeni od karstificiranih karbonatnih stijena, imaju slabo razvijenu mrežu površinskih vodotoka, pošto se provodna i kolektorska mreža nalaze pretežno u podzemlju.

U ovisnosti od pojave i veličine akumulacionih prostora dolazi do većeg ili manjeg zadržavanja vode u slivu. Režim otjecanja je neravnomjeran zbog neravnomjernosti ulaza i transformacije ulaznog hidrograma zbog i retencione sposobnosti vodonosnika koji ovise o karakteristikama krškog terena.

Mala poroznost i niska akumulativna sposobnost pukotinskog sistema ima za posljedicu brzi porast razina podzemnih voda, tako da pri nailasku većih voda intenzitet porasta razine podzemne vode često iznosi 20 i više metara na sat (Avdagić 1990). Razina podzemne vode obično brzo raste do neke veće površinske ili podzemne akumulacije, koja može prihvatiti značajnije količine vodene mase i omogućiti transformaciju vodnog vala. Najčešća je pojava sprege više akumulacija tako da se formira režim oticanja u ovisnosti o toj sprezi i režimu ulaza.



Slika 6.1 Fotografija presjeka kroz krški masiv (Bonacci)



Slika 6.2 Mreža pukotina sa glavnim pravcima kretanja podzemne vode (Avdagić)

Za korištenje voda u kršu neophodno je poznavanje prirodnih uvjeta među kojima su najznačajnije poznavanje položaja glavnih provodnika u slivu i podzemlju te poznavanje protoka kroz te provodnike u funkciji vremena.

Analiza režima tečenja započinje opisivanjem oblika pukotina. Prilikom strujanja kroz pukotine voda traži put najmanjeg otpora, tako da se vremenom neke pukotine zbog topljenja stijenske mase proširuju, a neke zamuljuju. U poprečnim presjecima pukotina koje čine podzemne tokove u kršu jedna dimenzija je razvijenija od druge (mala debljina, a velika širina). Svaka ovakva pukotina se ne treba zamišljati kao jedinstveni tok, već kao razgranati sustav sasvim nepravilnih cijevi raznih oblika i dimenzija, što bitno otežava opis strujanja.

Krš je sa hidrauličkog stanovišta izuzetno složena sredina te se pri modeliranju toka i pronosa razvijalo i koristilo niz pristupa. Najčešće aktivnosti se mogu svesti na dva osnovna pristupa:

a) *hidrološki pristup* koji se zasniva na mjerenju i obradi hidroloških parametara (oborina, razine podzemne vode, izdašnost izvora) i na osnovu njih bilance podzemne vode u nekoj regiji. Hidrološki pristup se najčešće koristi za određivanje raspoložive količine vode za potrebe vodoopskrbe ili energetike.

b) *modeliranje toka u pukotinama*. Sa hidrauličkog stajališta tok u sitnim pukotinama koje su u potpunosti saturirane vodom se može opisivati ili preko sheme kontinuuma (tok podzemne vode se promatra kao i kod stijenske mase sa međuzrnskom poroznošću) ili se promatra tečenje u pojedinoj pukotini odnosno u nizu pukotina što je slično modeliranju niza cijevi u sistemima pod tlakom. Hidraulički pristup se najčešće koristi pri sagledavanju zagađenja vodonosnih slojeva i za potrebe sagledavanja pronosa tvari kod deponiranja nuklearnog otpada.

Smjerovi toka podzemnih voda u kršu se najpouzdanije određuju trasiranjem. Trasiranje se sastoji od upuštanja traseru (obično boje ili nekog drugom markera) u ponor te mjerenjem intenziteta pojave traseru na izvoru. Na osnovu podataka o položaju ponora i izvora, vremenu koje je bilo potrebno da traser prijeđe put od ponora do izvora, kao i na osnovu podataka o promjeni koncentracije traseru u vremenu na lokaciji izvora se mogu donositi zaključci o privilegiranim putevima u stijenskoj masi pukotinske poroznosti.

6.1 Osnovne fizikalne karakteristike krša

Pojmovi kao što su ukupna poroznost, efektivna poroznost, koeficijent uskladištenja, ... su definirani slično kao i kod stijena međuzrnske poroznosti.

Zadržana voda (eng: *retained water*) je dio podzemne vode u krškim porama trajno zadržan uslijed površinske napetosti ili molekularnih sila. Odnos između volumena gravitacione vode i zadržane vode ovisi o veličini pora i mineraloškim karakteristikama stijenske mase. Ako su pore manje od 4 do 5 μ praktički nema gravitacionog kretanja vode.

6.1.1 Poroznost

Promatrat će se parametri stijena pukotinske poroznosti u koje se mogu svrstati sve eruptivne i metamorfne stijene, te većina kemijskih i organogenih sedimenata. Te stijene su porozne a njihova poroznost se definira kao postotak šupljina u volumenu stijenske mase:

$$n = V_p / V_{uk} \times 100 (\%) \quad \dots (6.1)$$

pri čemu je:

- n – poroznost
- V_p – volumen pora
- V_{uk} – ukupni volumen stijene

Poroznost može biti:

- a) primarna – nastala je u stijeni prilikom njenog postanka
- b) sekundarna – karakterizira čvrste stijene koje su naknadno bile izložene djelovanju nekih sila kao i posljedica topljenja stijenske mase.

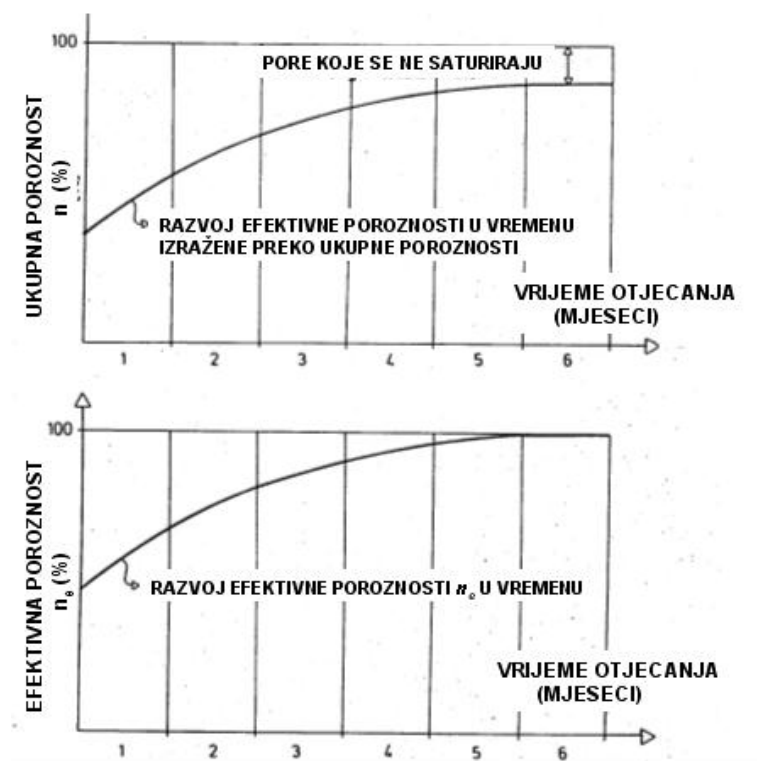
Pukotinska poroznost je u stvari diskontinuitet stijene i uglavnom je uzrokovana sekundarnim silama koje su djelovale na stijenu. Stijene koje su primarno imale gotovo zanemarivu poroznost postaju sekundarno porozne stijene. Disoluciona poroznost je prisutna u stijenama gdje je duž sekundarnih pukotina došlo do naknadnih procesa otapanja i to kod relativno topivih stijena kao što su karbonatne stijene (čitav južni dio Hrvatske).

Efektivna pukotinska poroznost krša kao i konsolidiranih koherentnih materijala koji su ispucali kao što je silt ili glina, je vrlo mala. Vrijednosti poroznosti reda veličine 1% -0.001% ili 10^{-2} do

10^{-5} nisu rijetke. Iako je poroznost mala, brzine toka podzemne vode mogu biti velike (Pollak, 1995).

Istraživanja su pokazala da je efektivna poroznost kraških terena u usporedbi sa poroznošću nekraških terena mala. Male vrijednosti su posljedica građe sistema pukotina za koje je karakteristična linijska a ne prostorna struktura. Ovo je razlog da su i pored učešća velikih volumena (površine sa velikim dubinama) u akumuliranju voda efekti primarne poroznosti mali. Sa druge strane taj primarni pukotinski sistem ima veliku provodljivost, tako da kroz njega voda brzo dolazi do glavnog provodnika, kojim se još brže provodi do neke podzemne ili površinske akumulacije, a često i na sam izlaz iz sliva.

Valja podsjetiti da se efektivna poroznost mijenja tijekom vremena.



Slika 6.3 Promjena efektivne poroznosti u vremenu (Bonacci)

Sistem sitnih pukotina razvijen je po cijeloj dubini karstificiranog sloja, a najrazvijeniji je u površinskom dijelu stijenske mase. U vertikalnom presjeku se karstifikacija smanjuje u principu po eksponencijalnoj zakonitosti (Avdagić)

$$n = a \cdot e^{-by} \quad \dots (6.2)$$

pri čemu su

a i b parametri koji karakteriziraju sredinu

y dubina

n poroznost

Sa većom dubinom javljaju se krupniji provodnici. Pod kretanjem voda sistemom sitnih, obično slojnih pukotina, podrazumijeva se filtracija i infiltracija voda iz kraškog sliva u provodnik – kolektor koji odvodi i dovodi vodu.

6.1.2 Koeficijent uskladištenja

Uskladištenje pukotina je važno prilikom analiza strujanja kroz pukotine. Koeficijent uskladištenja (S) je definiran kao promjena količine tekućine u jediničnom volumenu porozne sredine ako se tlačna visina promjeni za jedinični iznos, a posljedica je kompresibilnosti tekućine i deformacije porozne sredine usljed promjene efektivnih napona:

$$S = b\rho_w g(\alpha' + n\beta) \quad \dots (6.3)$$

gdje je:

- S – koeficijent uskladištenja
- b – veličina pukotine
- ρ_w – gustoća fluida (vode)
- α' – stlačivost porozne sredine
- n – poroznost
- β – stlačivost fluida

Stlačivost porozne sredine se može definirati kao:

$$\alpha' = \frac{dV_t / V_t}{d\sigma} \quad \dots (6.4)$$

gdje je:

- V_t – ukupan volumen šupljina
- σ – efektivni napon

6.1.3 Vodopropusnost

Specifična vodopropusnost se izražava preko količine vode koja se kroz karstificiranu stijenu gubi na intervalu od jednog dužnog metra bušotine pod tlakom od 0,1 atmosfere. Ova veličina je definirana jednadžbom

$$q = \frac{Q}{P \cdot h} \quad [l / \text{min } m'0,1at] \quad \dots (6.5)$$

pri čemu je:

- q – specifična vodopropusnost
- Q – količina vode koja se iz ispitivanog intervala bušotine gubi kroz poroznu sredinu u l/min
- h – dužina ispitivanog intervala u m
- P – tlak pod kojim se voda utiskuje (at)

Prema specifičnoj vodopropusnosti stijene se mogu podijeliti u sedam kategorija (Trupak,1956)

	Specifična vodopropusnost l/min	Kategorija
1	<0.001	Vodonepropusne stijene
2	0.001 - 0.01	Slabo propusne
3	0.01 - 0.1	Propusne
4	0.1 - 1	Srednje propusne
5	1 - 10	Stijene sa velikom vodopropusnošću
6	10 - 100	Stijene sa vrlo velikom vodopropusnošću
7	100 - 1000	Stijene sa izuzetno velikom vodopropusnošću

Tablica 6.1 Podjela stijenske mase obzirom na vodopropusnost

Provodnost krša se najčešće izražava preko Lugeona (Lu).

Lugeonova jedinica se izražava preko količine vode koju prima stijena na jednom dužnom metru bušotine kod pritiska od 10 atmosfera a u vremenskom intervalu od 1 min.

Zavisnost između Lugeonovih jedinica i specifične vodopropusnosti se može izraziti sa

$$100 Lu = 1 l / \min(m') \text{ } 0,1 \text{ at} \quad \dots (6.6)$$

Borelli (1966) je izučavao odnos između koeficijenta filtracije (izraženog u m/dan) i propusnosti izražene u Lugeonima te odredio odnos

$$1 Lu = 0.007 - 0.015 \text{ m/dan} \quad \dots (6.7)$$

6.2. Modeli toka u sitnim pukotinama

6.2.1. Opis toka primjenom sheme kontinuuma

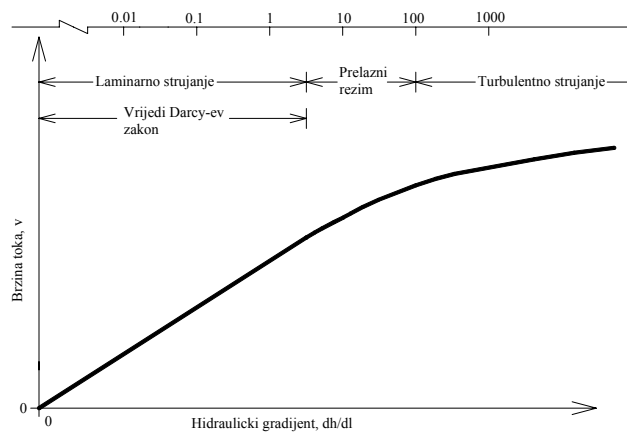
Primjena Darcyevog zakona zahtijeva usvajanje sheme kontinuuma, stijena sa pukotinskom poroznosti se pritom zamjenjuje kontinuumom koji ima definirane vrijednosti poroznosti, koeficijenta filtracije i kompresibilnosti. Ovaj pristup daje dobre rezultate kod stijena kod kojih je gustoća pukotina vrlo velika a razlika u veličini pukotina nije značajna, tako da se stijena sa pukotinskom poroznosti ponaša slično kao i sredina sa međuzrnskom poroznosti, ali je reprezentativni elementarni volumen za pukotinsku stijenu veći nego za sredinu međuzrnske poroznosti. Ako je razmak pukotina nepravilan tada se stijena ponaša heterogeno, a ako je različit u pojedinim smjerovima stijena se ponaša anizotropno.

Snow (Prema Zimmerman 1999) je uočio da za paralelne redove pukotina veličine b gdje ima N pukotina po jediničnoj duljini naličja stijenske mase, može definirati poroznost kao: $n_f = Nb$ a koeficijent filtracije je definiran izrazom:

$$k = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left(\frac{Nb^3}{12} \right) \quad \dots (6.8)$$

Ova jednadžba se bazira na hidraulici toka kroz složeni niz međusobno udaljenih blokova stijene za veličinu b i vrijedi kada je strujanje laminarno tj. u granicama važenja Darcy-evog zakona.

Prilikom korištenja pristupa preko sheme kontinuuma treba voditi računa da u slučaju kad su pukotine relativno velike može doći do prelaska iz laminarnog u turbulentni režim toka pa se više ne može koristiti Darcyev zakon. Na slici 6.4 su prikazana tri karakteristična režima strujanja koja se mogu javiti u strujnoj cijevi (a time i u pukotini).



Slika 6.4 Odnos brzine toka i hidrauličkog gradijenta

Pri malim brzinama vode, tečenje je laminarno dok sa povećanjem brzine vode dolazi do pojave turbulentnog tečenja. Režim tečenja je definiran vrijednošću Reynoldsovog broja. Za laminarno tečenje je odnos hidrauličkog gradijenta i brzine linearan dok je u turbulentnom režimu ovaj odnos nelinearan.

Često se usvaja da se tečenje kroz pukotinski sistem odvija u laminarnom režimu po Darcy-evom zakonu koji se za jednodimenzionalno strujanje može napisati u obliku:

$$v = k \cdot I \quad \dots (6.9)$$

pri čemu je:

- v filtraciona brzina
- k koeficijent filtracije
- I pad linije energije (identičan padu vodnog lica)

6.2.2 Tok kroz pojedinu pukotinu

Na početku razvoja modela toka za tečenje u kršu su se koristili modeli zasnovani na ideji da se tok odvija između dvije međusobno paralelne ploče (Snow prema Witherspoon, 2002). Takav pristup se je koristio za razvoj modela toka u pojedinoj pukotini ili u mreži međusobno spojenih pukotina. U takovom pristupu je obično usvojeno da je protok proporcionalan sa veličinom otvorenosti pukotina na treću potenciju i hidrauličkim gradijentom.

Koncept dvije paralelne ploče se pokazao dobrim kao prva aproksimacija, ali se pokazalo da takav pristup ima nedostatke kod istraživanja hrapavih pukotina, kao i prilikom sagledavanja razlike u veličini pukotina na oblik strujne mreže (Witherspoon, 2000).

Najjednostavnije je opisivati strujanje u sredinama pukotinske poroznosti tako da se promatra jedinstvena pukotina. Zaključci i principi se mogu primjeniti na vodonosnike sa više pukotina. Karakteristike takve pukotine se mogu iskoristiti kako bi se definirala hidraulička propusnost stijenske mase te rješavanjem inverznog problema odredila veličina pukotina.

Ako su pukotine na većem međusobnom razmaku ili ako postoji značajnija razlika u njihovoj veličini, potrebno je tok podzemne vode analizirati u svakoj pukotini posebno. Ovakav način analize toka podzemne vode u stijenama pukotinske poroznosti je baziran na rješavanju Navier-Stokes-ove jednadžbe.

6.2.2.1. Od Navier-Stokes-ove do Stokes-ove jednadžbe

Određivanje jednofaznog toka kroz hrapavu pukotinu je početni korak u analizi kompleksnijih problema toka kroz mrežu pukotina ili višefaznog toka, odnosno za generalizaciju toka u sredini pukotinske poroznosti. Sa inženjerskog stanovišta bi bilo poželjno pronaći način odnosno uvijete koji bi dozvolili korištenje jednadžbi jednostavnijih od Navier-Stokes-ove jednadžbe (koje imaju nelinearni odnos između pada tlaka i srednjeg protoka kroz pukotinu). Iz tog razloga se često usvajaju pojednostavljenja te se koriste Stokesove ili Reynolds-ove lubrikatne jednadžbe kojima je definiran linearni odnos između pada tlaka i srednjeg toka kroz pukotinu. Svrha matematičkih analiza je dobivanje odgovora na praktično pitanje: kako definirati odnos propusnosti pukotina na osnovu njenih geometrijskih karakteristika poput srednje otvorenosti pukotine (b), hrapavosti ili kontaktnih ploha pukotine ?

Tok kroz hrapavu pukotinu u stijeni opisan je Navier –Stokesovom jednadžbom koja za slučaj stacionarnog i laminarnog strujanja poprimaju sljedeći oblik (Zimmerman i Yeo, 2000):

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad \dots (6.10)$$

gdje je :

\mathbf{u} – vektor brzine

ρ - gustoća proticajnog fluida

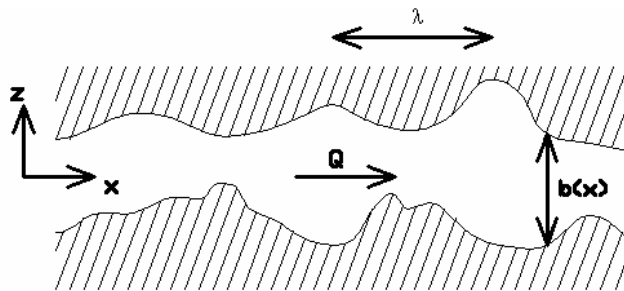
μ - dinamički koeficijent viskoznosti

P – reducirani tlak ($P = p - \rho gz$)

Član sa lijeve strane gornje jednadžbe predstavlja konvektivni član ubrzanja (prijenosno ubrzanje). Prvi član sa desne strane predstavlja gradijent tlaka odnosno površinske sile a drugi član desne strane jednadžbe predstavlja silu nastalu usljed viskoznosti fluida.

Ako je moguće zanemariti inercioni član u Navier-Stokesovoj jednadžbi (član sa lijeve strane jednadžbe 6.10) dobiva se Stokesova jednadžba (jednadžba 6.15) koja definira linearan odnos između gradijenta tlaka i srednjeg protoka kroz pukotinu.

U cilju pojednostavljenja analize promatra se "jednodimenzionalna" pukotina sa odabirom x smjera kao smjera strujanja i z smjera okomitog na njega. Pod pojmom "jednodimenzionalna" pukotina se pri tome podrazumijeva pukotina u kojoj će se parametri toka i pronosa promatrati u jednom smjeru odnosno u smjeru toka.



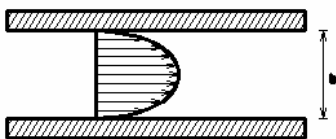
Slika 6.5 Hrapava pukotina sa promjenama otvorenosti (debljine) pukotine samo u x smjeru ("jednodimenzionalna pukotina")

Jednadžba kontinuiteta za nestišljivi fluid i konzervativno tečenje se može pisati u obliku:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots(6.11)$$

Jednadžbe 6.10 i 6.11 čine sustav od 4 jednadžbe sa 4 nepoznanice (\mathbf{u} , P).

6.2.2.2 Protok između dvije paralelne ploče



Slika 6.6 Shematski prikaz laminarnog tečenja između dvije ravne paralelne ploče

Na početku prikazane analize toka kroz pukotinu definirat će se najjednostavniji slučaj strujanja između dvije paralelne ploče na međusobnoj udaljenosti b , a što je jedini geometrijski oblik za

koji je moguće egzaktno riješiti Navier-Stokesovu jednadžbu. Pojednostavljenje Navier-Stokesove jednadžbe u ovom slučaju sadržano je u tome da se varijacija vektora brzina ostvaruje samo u z smjeru pa su brzina i njezin gradijent međusobno okomiti zbog čega nestaje član sa lijeve strane jednadžbe 6.10. Time je dobiven i vektor brzina između dvije paralelne glatke ploče (Bachelor, prema Zimmerman 1999):

$$u_x = -\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} [z^2 - (b/2)^2] \quad u_z = 0 \quad \dots(6.12)$$

Integracijom profila brzina dobiva se protok kroz pukotinu

$$Q_x = \int_0^w \int_{-b/2}^{b/2} u_x(z) dx dy = -w \int_{-b/2}^{b/2} \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} [z^2 - (b/2)^2] dz = \frac{-wb^3}{12\mu} \frac{dP}{dx} \quad \dots (6.13)$$

gdje je :

w – otvorenost (širina) pukotine (u y smjeru)

Rezultat integracije u jednadžbi 6.13 uobičajeno je prikazivati sa uvedenim parametrom transmisivnosti T a definiranog na način $Q_x = (-T/\mu)(dP/dx)$ pri čemu je:

$$T = \frac{wb^3}{12} \quad \dots(6.14)$$

Protok između dvije hrapave ploče

Za pukotinu koja nije ograničena sa glatkim pločama, uobičajeno je kvantificirati transmisivnost kroz uvođenje parametra «hidrauličke» debljine (otvorenosti) pukotine b_H .

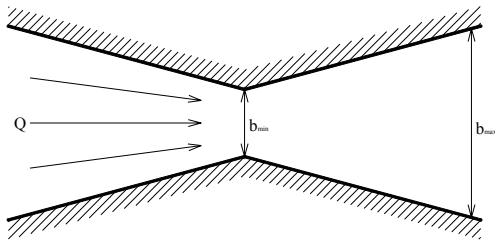
Navier-Stokesovu jednadžbu nije moguće deterministički rješavati za realnu hrapavu pukotinu proizvoljne geometrije kao i za slučaj u kojem se geometrija rubova pukotine predpostavlja u obliku sinusoide ili šiljaka (*eng: sawtooth*). Iz ovih razloga pojednostavljenja Navier-Stokesove jednadžbe provode se u smislu zanemarenja inercionog člana jednadžbe te se dobiva:

$$\nabla P = \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad \dots(6.15)$$

Ove jednadžbe su linearne te daju i linearan odnos između gradijenta tlaka i srednjeg protoka kroz pukotinu.

Redukcija inercionog člana jednadžbe 6.10 predstavlja prelazak na Stokesovu jednadžbu, a njezino korištenje je smislaono samo ukoliko je inercialni član puno manji od viskoznog člana sa desne strane jednadžbe 6.10. U općem slučaju je veličina pukotine promjenjiva u prostoru, vektor brzine ima komponentu i u z smjeru, a time gradijent brzine i u x smjeru.

Promotrimo jednostavni oblik pukotine prikazan na slici 6.7.



Slika 6.7 Pukotina sa konvergentno-divergentnim tokom (pukotina sa "šiljkom")

Riješenje ovog problema pokazuje da su kod malih Reynolds-ovih brojeva strujnice u obliku pravaca i usmjerene prema tjemenu pukotine (ili od njega), pa se može napisati sljedeća jednačba (Zimmerman 1999):

$$\frac{U_z}{U_x} \approx \frac{b_{\max} - b_{\min}}{\lambda} \approx \frac{\langle b \rangle}{\lambda} \quad \dots(6.16)$$

Sada se obadva uvijeta iz jednačbe 6.15 mogu reducirati na:

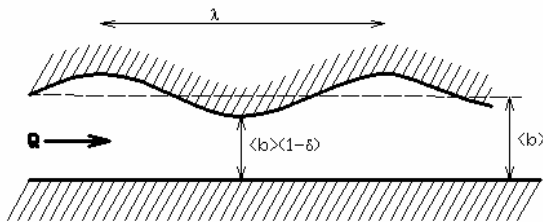
$$\frac{\rho U_x \langle b \rangle}{\mu} \cdot \frac{\langle b \rangle}{\lambda} = Re \frac{\langle b \rangle}{\lambda} \ll 1 \quad \dots(6.17)$$

gdje je:

Re – Reynolds-ov broj

$Re \langle b \rangle / \lambda$ je bezdimenzionalni parametar koji se često naziva "Reducirani Reynolds-ov broj"

Uvijet opisan jednačbom 6.17 je potrebno provjeriti sa nekim od analitičkih rješenja strujanja kroz pukotinu. Prikladno analitičko rješenje relevantno Navier-Stokes-ovoj jednačbi je rješenje drugog reda koje su dali Hasegawa i Izuchi (prema Zimmerman 1999) za strujanje kroz pukotinu koja je sa jedne strane omeđena ravnom pločom, a sa druge sinusoidalnom stijenkom (slika 6.8).



Slika 6.8 Pukotina omeđena sa jednom ravnom stijenkom i sa stijenkom sinusoidalnog oblika. Srednja vrijednost otvorenosti pukotine je $\langle b \rangle$, duljina vala je λ , a amplituda promjene veličine pukotine u odnosu na srednju vrijednost je δ .

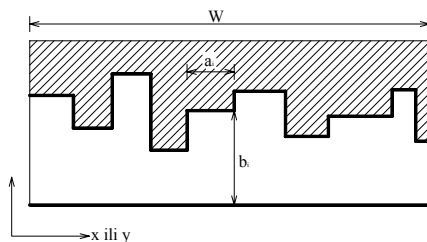
Veličina pukotine u ovom modelu se može opisati sljedećom jednačbom:

$$b(x) = \langle b \rangle \left[1 + \delta \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right] \quad \dots(6.18)$$

Prema opsežnim ispitivanjima raznih autora (Berkowitz, Oron, Skjetne, Zimmerman, Yeo, prema Zimmerman 1999) došlo se do zaključka da inercioni član dovoljno malen za njegovo zanemarenje ukoliko je Reynolds-ov broj $Re < 10$ pa se za strujanja koja zadovoljavaju navedeni kriterij može upotrijebiti Stokesova jednadžba u kojoj je zadržana linearnost odnosa transmisivnosti i protoka. Poznavanjem činjenice da strujanje u kršu kao jednom od vidova strujanja u sredinama pukotinske poroznosti ne zadovoljava ovakvu pretpostavku nailazimo na «sljepu ulicu» odnosno potrebu da se cijeli model strujanja i sa njime povezani model pronosa zagađivala usmjeri na drugu razinu koja neće biti strogo deterministička, odnosno ona koja će u sebi sadržavati i elemente stohastike i empirije.

6.2.2.3 Stepenasta pukotina

Prvo će se pogledati utjecaj oblika pukotina na definiranje srednje veličine pukotine $\langle b \rangle$ koja je potrebna za definiranje transmisivnosti T u laminarnom režimu strujanja. Brojna proučavanja hrapavosti stijena pokazuju da ta hrapavost ima značajnu veličinu u odnosu na otvorenost pukotine. Razni autori su pokušali shematizirano opisati razne oblike pukotina. Utjecaj promjene širine otvora pukotine po prostoru na karakteristike strujanja su proučavali Tsang i Witherspoon. Predpostavili su da pukotina ima stepenasti oblik kao što je prikazano na slici 6.9, te su razmatrali longitudinalni i transverzalni tok:



Slika 6.9 Shematski prikaz otvorenosti pukotine

a) za čisto longitudinalno strujanje u profilu pukotine, uz pretpostavku da nema varijacije u otvorenosti pukotine u x smjeru, odnosno u smjeru osnovnog toka, srednja vrijednost širine pukotine se može izraziti:

$$\langle b^3 \rangle_x = \frac{\sum_j a_j b_j^3}{\sum_j a_j} \quad \dots(6.19)$$

gdje a_j i b_j predstavljaju inkremente duljine a_j i širine otvora b_j kao što je pokazano na slici 6.9 i slici 6.10.

b) Ako postoji varijacija veličine otvora pukotine u x smjeru, odnosno u smjeru osnovnog toka (u longitudinalnom) i varijaciju u y smjeru (transverzalna) treba uzeti u obzir. Zbrajanjem padova energetske linije duž smjera glavnog toka x , može se pisati:

$$\left\langle \frac{a}{b^2} \right\rangle_y = \frac{\sum_j a_j}{\sum_j b_j^2} \quad \dots(6.20)$$

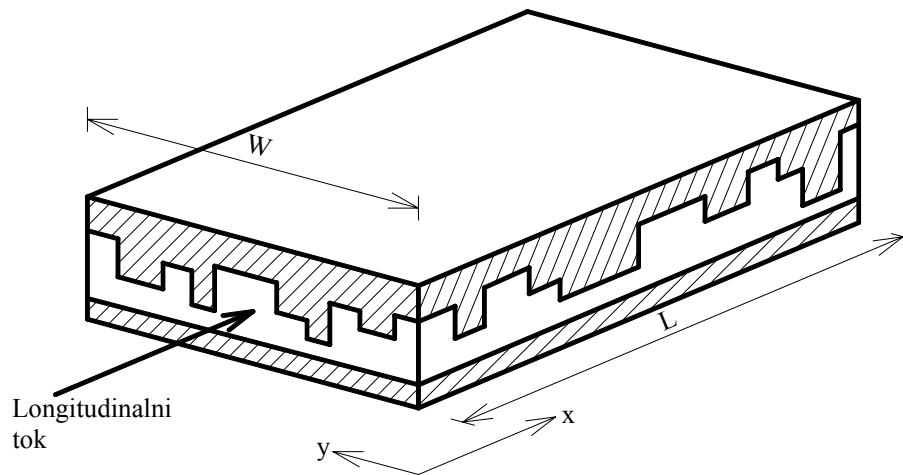
6.2.2.4 Strujanje kroz pukotinu uz zanemarivanje efekta zavojitosti strujanja

Kombinacijom jednadžbi 6.19 i 6.20 može se dobiti izraz za strujanje unutar pravokutnog bloka stijene širine W i duljine L , gdje je zavojitost strujanja zanemarena:

$$Q = \frac{W}{L} \frac{g}{12\nu} \left\langle b^3 \right\rangle_x^{1/3} \left\langle 1/b^2 \right\rangle_y [H(0) - H(x)] \quad \dots(6.21)$$

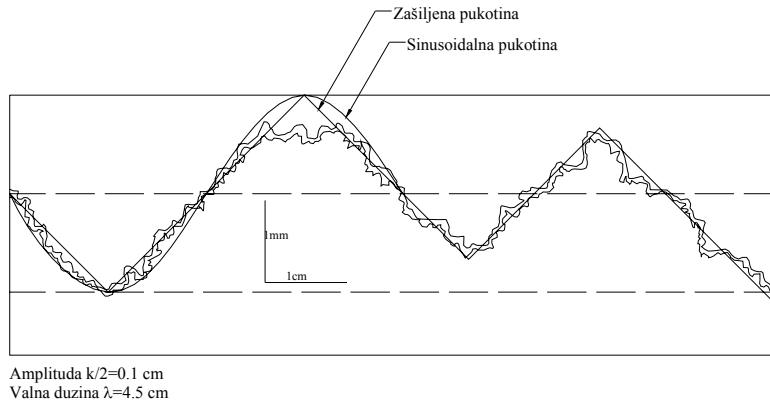
gdje je:

Q – je protok kroz ovakav sistem
 $[H(0) - H(x)]$ - padovi linije energije duž sistema



Slika 6.10 Shematski trodimenzionalni prikaz pukotine

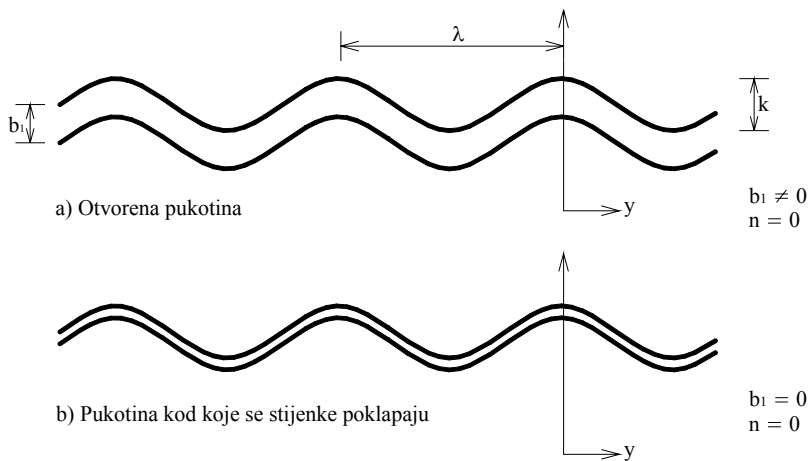
Predpostavka koja je usvojena prilikom ovakvog tumačenja strujanja kroz 2D pukotine je da strujnice i ekvipotencijale čine kvadratičnu mrežu. Za vijugavi tok ova pretpostavka ne vrijedi. Zbog toga se prirodni lomovi u stijenama kroz koje se odvija strujanje mogu promatrati kao valovite površine i aproksimirati sinusoidnim ili zašiljenim oblikom (Slika 6.11).



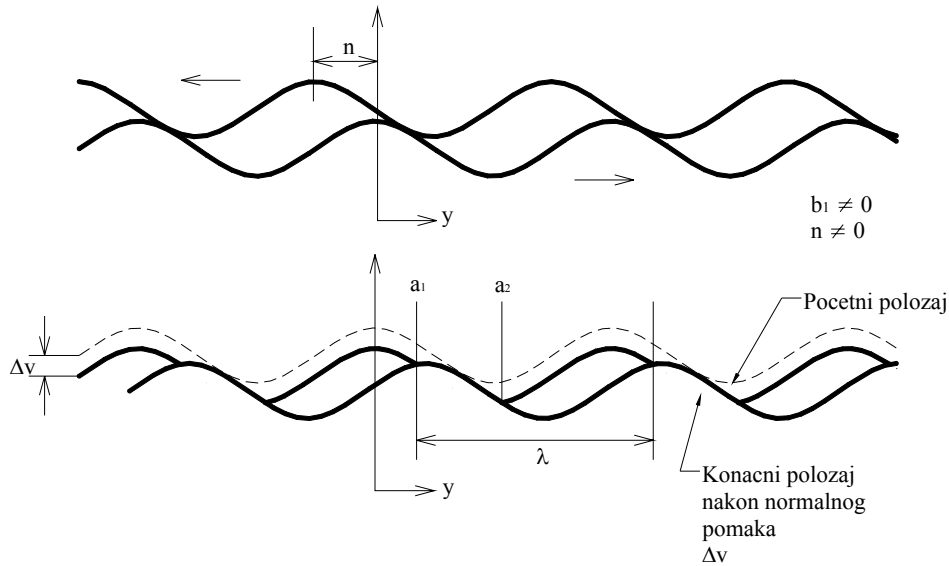
Slika 6.11 Aproksimacija oblika pukotine sinusoidalnim ili zašiljenim oblikom

6.2.2.5 Sinusoidalne pukotine

Idealizirana geometrijska forma koja odgovara sinusoidalnoj pukotini je prikazana na slici 6.12, a na slici 6.13 je prikazana raspodjela debljine pukotine kao posljedica uzdužne i poprečne deformacije.



Slika 6.12 Pukotina sinusoidalnog oblika



Slika 6.13 Pukotina sa izmaknutim sinusoidalnim oblikom

Za strujanje okomito na prikazanu ravninu (Slika 6.13) ako nema promjene u otvoru pukotine u x smjeru (smjeru osnovnog toka), otvor pukotine b na bilo kojoj poziciji je određen:

$$b = b_1 - k \sin\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \quad \dots(6.22)$$

gdje je:

b_1 – je osnovni razmak stijenki pukotine

k – amplituda

n – uzdužni pomak

Ako su stijenke pukotine u kontaktu:

$$b_1 = k \sin\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \cdot l \quad \dots(6.23)$$

tada je veličina otvora pukotine na bilo kojoj poziciji y :

$$b = k \sin\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \left[l - \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \right] \quad \dots(6.24)$$

Na ovaj način se srednja vrijednost širine pukotine $\langle b^3 \rangle$ može izračunati za bilo koju karakterističnu duljinu koja je višekratnik valne duljine λ :

$$\langle b^3 \rangle_x = \frac{l}{\lambda} \int_0^\lambda \left[b_1 - k \sin\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \right]^3 dy \quad \dots(6.25)$$

- ako se stijenke pukotine ne poklapaju tada je :

$$\langle b^3 \rangle_x = b_1^3 + \frac{3}{2} b_1 k^2 \sin^2\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \quad \dots(6.26)$$

- te ako su stijenke pukotine i u kontaktu, može se pisati:

$$\langle b^3 \rangle_x = \frac{5}{2} k^3 \sin^3 \left(\frac{\pi n}{\lambda} \right) \quad \dots(6.27)$$

6.2.2.6 Zašiljene pukotine

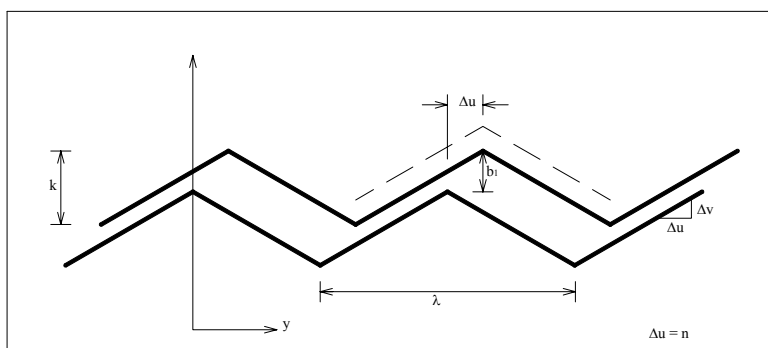
Ako se pukotine idealiziraju linijama kao na slici 6.14, tada je otvor pukotine određen:

$$\langle b^m \rangle = \frac{\Delta u}{\lambda \Delta v (m+1)} \left[(\Delta v + b_l)^{m+1} - (b_l - \Delta v)^{m+1} \right] + \left[(\Delta v + b_l)^m + (b_l - \Delta v)^m \right] \left[\frac{1}{2} - \frac{\Delta u}{\lambda} \right] \quad \dots(6.28)$$

gdje je:

m – proizvoljni eksponent

Δu – uzdužni pomak



Slika 6.14 Shematski prikaz "zašiljenih" pukotina

Ako se stijenke pukotine poklapaju tada je $b_l = \Delta v$, a otvor pukotine je određen sa:

$$\langle b^3 \rangle = \frac{(2\Delta v)^3}{2} \left(1 - \frac{\Delta u}{\lambda} \right) \quad \dots(6.29)$$

gdje je:

$$\Delta u = n$$

$$\Delta v = \frac{2nk}{\lambda} \quad \dots(6.30)$$

Idealizacija sa zašiljenim pukotinama daje uvijek manje koeficijente propusnosti nego što je to slučaj za idealizirane sinusoidalne pukotine.

6.2.2.7 Trodimenzionalni opis pukotine

Sinusoidalne pukotine

Varijacija debljine pukotine kada je ona idealizirana sinusoidalnom poklapajućom formom u dvije dimenzije je dana izrazom:

$$b = \frac{k}{4} \left(\frac{n\pi}{\lambda} \right) \left[2 - \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) - \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \right] \quad \dots(6.31)$$

pri čemu k ima isto značenje kao i kod strujanja sa zanemarenim efektom zavojitosti strujnica. Tada je:

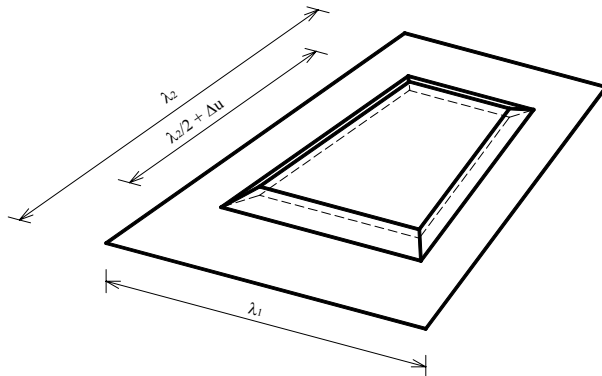
$$\langle b^3 \rangle_{x,y} = \frac{I}{\lambda_1 \lambda_2} \int_0^{\lambda_1} \int_0^{\lambda_2} b^3 dx dy \quad \dots(6.32)$$

Ako pretpostavimo da su kod većine slučajeva valne dužine idealiziranih pukotina jednake: $\lambda_1 = \lambda_2$ i da su stijenke u kontaktu, tada je:

$$\langle b^3 \rangle_{x,y} = \frac{14}{64} k^3 \sin^3\left(\frac{\pi n}{\lambda}\right) \quad \dots(6.33)$$

Prema slici 6.15 može se napisati izraz za otvor zašiljene pukotine b :

$$\langle b^m \rangle_{x,y} = \frac{(2\Delta v)^m}{2} \left[\frac{\Delta u}{\lambda_1} \left(\frac{2}{m+1} - 1 \right) + \frac{1}{2} \right] \quad \dots(6.34)$$



Slika 6.15 Shematski prikaz zašiljenih pukotina u 3D

6.2.3 Opis turbulentnog strujanja u pukotini

Kod turbulentnog strujanja ne postoji linearni odnos specifičnog protoka i gradijenta potencijala. Navedena nelinearnost je rezultat zajedničkog djelovanja inercijalnih i kinetičkih efekata koji su posljedica strujanja relativno velikom brzinom.

Za određivanje odnosa brzine strujanja i hidrauličkog gradijenta kod nelinearnog zakona strujanja se najčešće koriste dva zakona:

1. *Forchheimer-ov zakon* koji koristi polinomni izraz za opis brzine toka u ovisnosti o hidrauličkom gradijentu:

$$\nabla h = av + bv^2 \quad \dots(6.35)$$

gdje je:

- a, b – konstante koje se određuju eksperimentalno i predstavljaju karakteristike fluida i medija u kojem se odvija strujanje
- v – brzina strujanja

Konstante a i b vrijede samo u određenim granicama brzine strujanja, a izvan tih granica moraju se odrediti nove konstante.

2. *Missbach-ov zakon* ima oblik eksponencijalne funkcije, a ovaj zakon je potvrdio Louis (prema Elsworth i Goodman, 1986) tako što je promatrao strujanje u simuliranoj stijenskoj pukotini

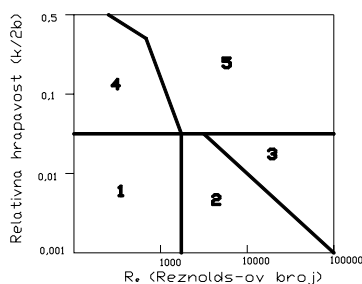
$$v = -K\nabla h^\alpha \quad \dots(6.36)$$

gdje je:

- K - konstanta proporcionalnosti, predstavlja propusnost pukotine – hidraulička vodljivost
- α – eksponent koji varira između 0.5 i 1.

Propusnost pukotina je funkcija veličine pukotina i relativne hrapavosti stijenki. Vrijednosti K i α variraju ovisno o brzini strujanja, ali se mogu smatrati konstantnim unutar određenog raspona brzine.

Analitičko rješavanje strujanja u pukotinama je moguće ako se pukotine idealiziraju kao udaljenost dvaju paralelnih ploča. Ova analogija je relativno zadovoljavajuća ako se promatra saturirana sredina, laminarno strujanje nestlačivog fluida gdje je strujanje kroz stijenke koje omeđuju pukotinu zanemarivo. Hrapavost stijenki mora biti vrlo mala u odnosu na veličinu pukotine.



Slika 6.16 Područja toka za laminarno i turbulentno strujanje

Režim strujanja u pukotini ovisi o Reynoldsovom broju i relativnoj hrapavosti. Louis je podijelio strujanje u 5 karakterističnih zona a na slici 6.16 su prikazane hidrauličke zone koje ovise o Reynolds-ovom broju i relativnoj hrapavosti.

Ako je hrapavost stijenki znatna u odnosu na veličinu pukotina, njen utjecaj se može uzeti u obzir prema Louis-ovim izrazima u tablici 6.2.

Hidraulička zona	Hidraulička vodljivost (L/T)	EkspONENT (α)
1	$\frac{gb^2}{12\nu}$	1.0
2	$\frac{I}{b} \left[\frac{g}{0.079} \left(\frac{2}{\nu} \right)^{1/4} b^3 \right]^{4/7}$	4/7
3	$4g^{1/2} \log \left[\frac{3.7}{(k/D_h)} \right] b^{1/2}$	0.5
4	$\frac{gb^2}{12\nu(1+8.8(D_h)^{3/2})}$	1.0
5	$4g^{1/2} \log \left[\frac{1.9}{(k/D_h)} \right] b^{1/2}$	0.5

Tablica 6.2 Ekvivalentne hidrauličke propusnosti (prema Louis-u)

Prema Louis-u se ovisno o režimu strujanja mogu napisati sljedeće jednadžbe:

$$\text{Laminarno strujanje: } v = k_L \nabla h \quad \nabla h = \frac{v}{k_L} \quad \dots(6.37)$$

$$\text{Turbulentno strujanje: } v = k_T (\nabla h)^{1/2} \quad \nabla h = \frac{v^2}{k_T^2} \quad \dots(6.38)$$

Missbach-ove jednadbe su analogne Forchheimer-ovim za koje su tada koeficijenti a i b :

$$\text{Laminarno strujanje: } a = \frac{I}{k_L} \quad b = 0 \quad \dots(6.39)$$

$$\text{Turbulentno strujanje: } a = 0 \quad b = \frac{I}{k_T^2} \quad \dots(6.40)$$

Istim metodama kao i za linearni zakon strujanja mogu se odrediti ekvivalentne veličine pukotina.

Za tok u kojem se efekti zavojitosti ne uzimaju u obzir specifični protok se može izraziti kao:

$$q = \frac{W}{L} \cdot \langle b^{3/2} \rangle_x [H(0) - H(x)] \cdot d \quad \dots (6.41)$$

gdje je:

- W – širina promatranog područja
- L – duljina promatranog područja
- d – eksperimentalno određen koeficijent
- q – specifični protok

6.3 Režim tečenja vode sistemom krupnih provodnika -kolektora

Niz provedenih mjerenja u provodnicima je pokazalo da je režim tečenja sistemom krupnih provodnika turbulentni. Otjecanje provodnicima –kolektorima je 100 pa i više puta brže od oticanja slojnim pukotinama. Ovi provodnici mogu raditi povremeno ili stalno a njihov rad može biti pod tlakom ili sa slobodnim vodnim licem a ovisi o količini vode akumuliranih voda na višim kotama koje ti provodnici dreniraju i odvede u glavne provodnike ili na izvor.

U turbulentnom režimu se zakon otpora može prikazati jednadžbom:

$$I = \phi \frac{v^2}{2gR} \quad \dots(6.42)$$

pri čemu je

- I pad linije energije proporcionalan kvadratu brzine
- R hidraulički radijus
- ϕ koeficijent ovisan o karakteristikama mjerne dionice

Za promatranu dionicu toka duljine ΔL i za tečenje pod tlakom pri čemu je površina proticajnog presjeka konstantna pri svim razinama vode može se pisati

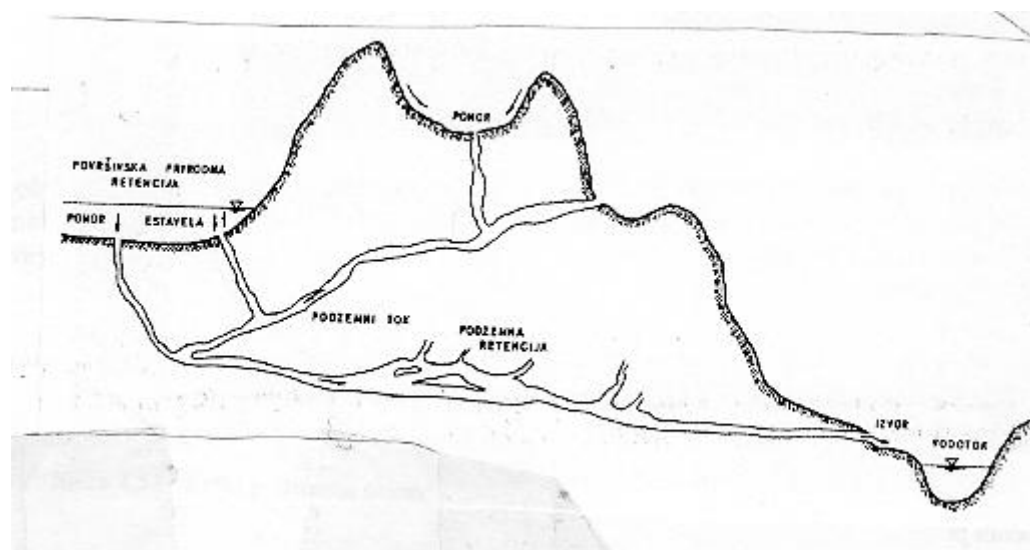
$$v = \psi \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad \dots(6.43)$$

pri čemu je sa ψ označena konstanta ovisna o karakteristikama krške sredine.

6.4 Vodni objekti

Pod vodnim objektima u kršu se misli na izvore, estavele i ponore (Slika 6. 17).

Pod *zonom objekata* se podrazumijeva međusobno povezana grupa ponora, estavela ili izvora.



Slika 4.17 Kraški podzemni sustav

Hidraulika velikih provodnika – kolektora se svodi na primjenu zakonitosti kojima je opisano tečenje u otvorenom koritu, sistemima pod tlakom, istjecanje i druge zakonitosti koje su opisane odgovarajućim hidrauličkim izrazima. U ovom poglavlju će se navesti neki primjeri hidrauličkog pristupa opisivanju protjecanja u pojedinim krškim sredinama.

6.4.1 Ponori

Ponori se mogu definirati kao (velike) pukotine u kršu kroz koje voda ulazi (ponire) u podzemlje (stijensku masu - vodonosnik)

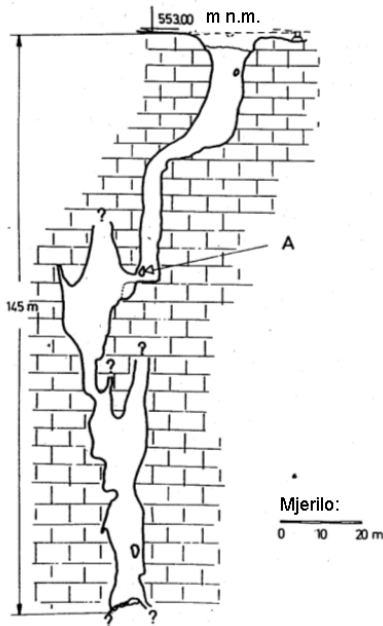
Podzemno oticanje vode u kršu i njena pojava na površini u krajnjoj i najnižoj točki sliva, stvara brojne probleme za racionalno korištenje i zaštitu raspoloživog vodnog bogatstva.

Ponori mogu biti kontinuirani ili povremeni.

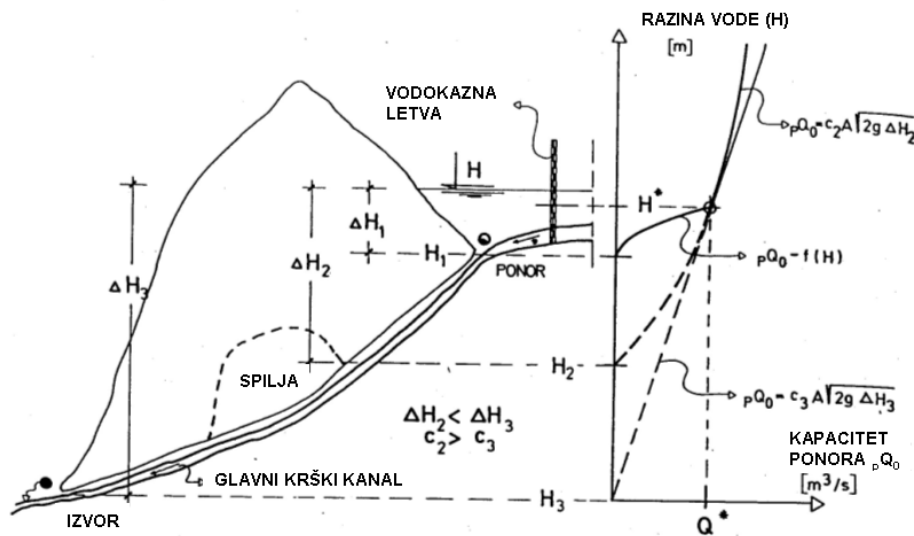
Sa morfološkog stanovišta ponori mogu biti

- velike pećine, spilje i jame
- niz malih pukotina
- aluvijalni ponori

Kapacitet ponora ovisi o razini vode u zoni ispred njega (slika 6.19). Pri malim protocima kod kojih se javlja tečenje sa slobodnim vodnim licem se protok može računati po analogiji sa protocima u otvorenom koritu. U trenutku kad se u glavnom provodniku javi tečenje pod tlakom dolazi do značajnije promjene oblika konsumpcione krivulje a protok ovisi o razlici između razine vode na ponoru i na izvoru ΔH_3 .



Slika 6.18 Presjek kroz ponor Turčić (Bonacci)



Slika 6.19 Primjer konsumpcione krivulje ponora (Bonacci)

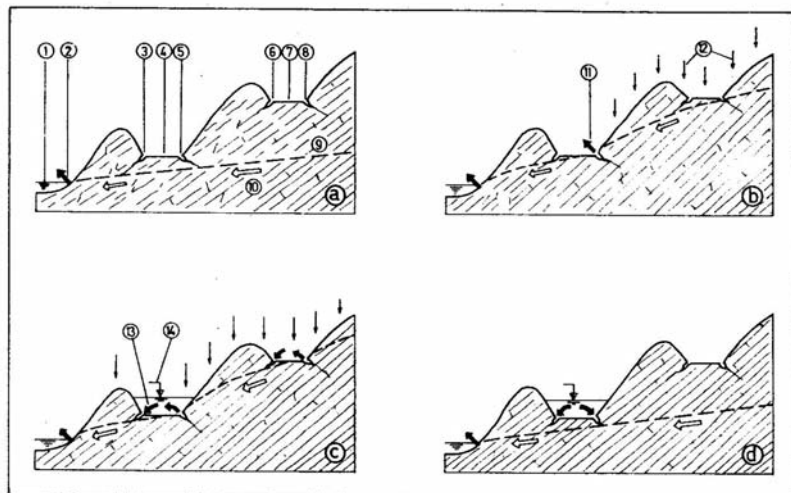
U takvom slučaju se protok kroz ponor može definirat jednadžbom

$$Q_0 = cA\sqrt{2g\Delta H} \quad \dots(6.44)$$

pri čemu je c koeficijent protoka a A površina proticajnog presjeka.

6.4.2 Estavele

Estavele su objekti kroz koje se vrši i doticaj i otjecanje u vodospremu ili kraško polje. One imaju dvostruku funkciju – u sušnom periodu djeluju kao ponori a u kišnom periodu djeluju kao izvori. U kišnom periodu je razina podzemne vode viša od kote estavele a u sušnom je obično niža.



Slika 6.20 Princip rada estavele (Milanović)

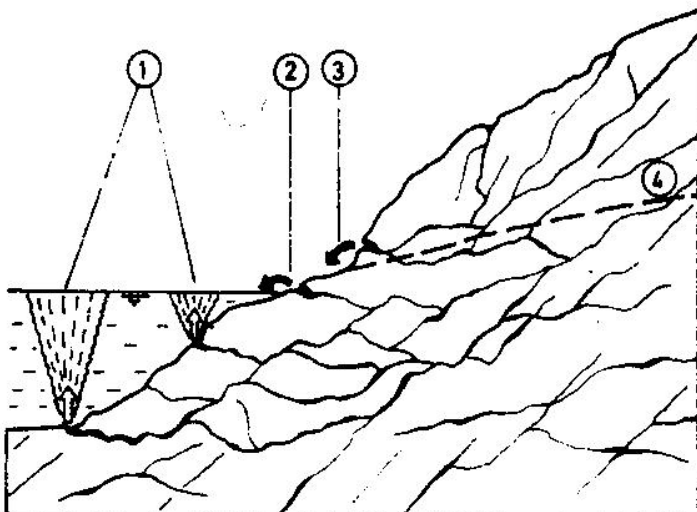
1) razina mora, 2) izvor (vrulja) 3) zona poniranja, 4) niže krško polje, 5) estavelaska zona), 6) ponorska zona višeg polja, 7) više krško polje, 8) izvorska zona višeg krškog polja, 9) razina podzemne vode, 10) smjer toka podzemne vode, 11) estavela funkcionira kao izvor, 12) oborine, 13) oticanje podzemne vode kroz ponore, 14) razina vode u polju

- a) sušni period - postoji samo izvor na razini mora
- b) usljed oborina razina podzemne vode raste - estavela počinje raditi kao izvor
- c) daljnje oborine uzrokuju pojavu ponora u gornjem i donjem polju koje se plavi
- d) prestanak oborina - estavela radi kao ponor

Jedne od poznatijih estavela na području Hrvatske se nalaze u dolini Neretve.

6.4.3 Izvori

Izvori su prirodno istjecanje podzemne vode na površinu kroz pukotine u stijenskoj masi krša. Izvori se najčešće javljaju na mjestu dodira karbonatne stijenske mase i vodonepropusne podloge.



Slika 6.21 Vidovi pražnjenja krškog sloja na području apsolutnog erozionog bazisa (Milanović str. 75)
 1) vrulje, 2) povremeni izvor na razini mora i vrelo za visoke vode 3)

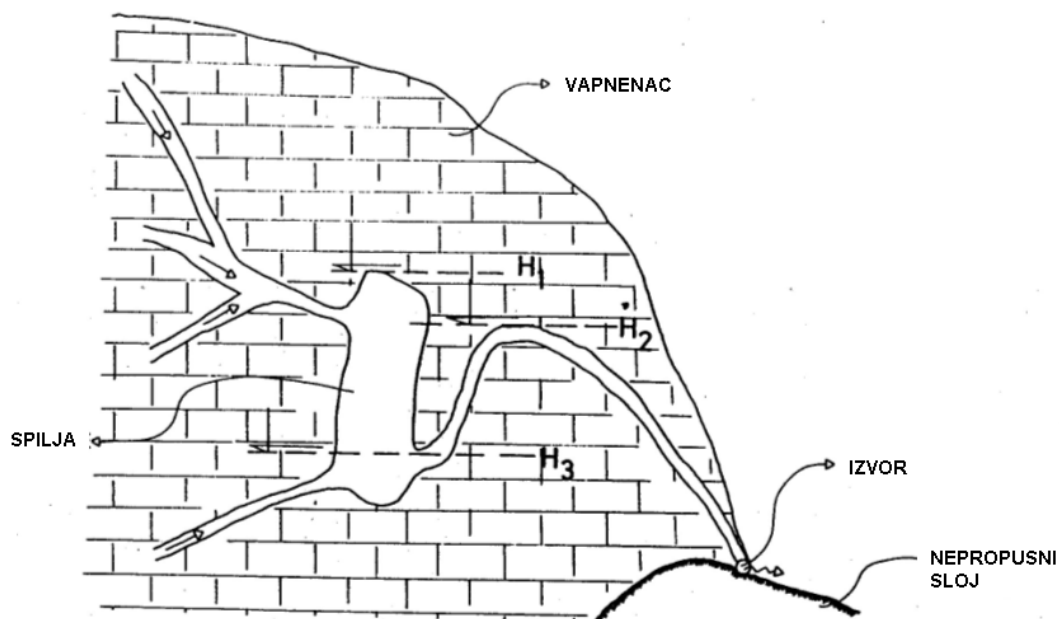


Slika 6.22 Vrulja kod Doli (Milanović)

Po teoriji geografa Alfreda Grunda (1903, Prema Milanović) u kršu postoji jedinstveni vodonosni horizont - izdan. Prema njegovoj teoriji postoji dva sloja podzemne vode -

stagnirajuća i *karstna voda*. Stagnirajuća voda se ne kreće jer je akumulirana u pukotinama i kavernama koje se nalaze na velikoj dubini tj. blizu razine mora i blago su nagnute prema moru. Preko ovog sloja leži zona tekuće vode koja se naziva karstna voda. Karstna voda ima slobodnu površinu jače nagnutu prema zoni istjecanja - moru. Stagnirajuća voda ima funkciju podinskog izolatora po kojem se kreće karstna voda. Razina mora predstavlja apsolutni erozioni bazis i proces karstifikacije se odvija iznad te razine.

Osim stalnih postoje i povremeni izvori. Prikazan je primjer povremenog (periodičnog) izvora na doljnoj slici.



Slika 6.23 Povremeni - periodični izvor (Bonacci)

Vrulje su oblik izvora ispod razine morske vode.

6.5 Zasljanjivanje priobalnih izvora

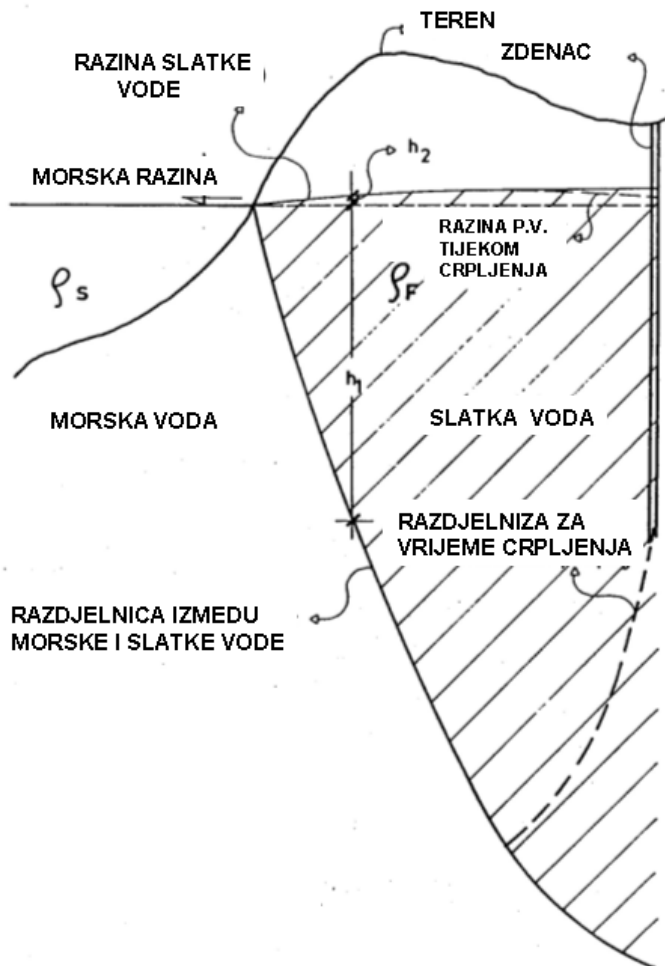
Problem zasljanjivanja priobalnih izvora je dosta značajan sa stanovišta vodoopskrbe. Postoje značajne količine bočate vode koje se ne mogu koristiti za vodoopskrbu stanovništva, industriju ni za poljoprivredne svrhe zbog previsoke koncentracije klorida (Cl).

Oblik linije koja razdvaja slatku i slanu vodu u priobalnim područjima su za stacionarno stanje definirali Ghyben (1889) i Herzberg (1901). Njihova jednadžba se zasniva na hidrostatskom zakonu i na odnosu gustoće slatke i slane (morske) vode. Zakon pretpostavlja da leća slatke vode stoji iznad morske koja je ujedno gušća.

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad \dots(6.45)$$

pri čemu je

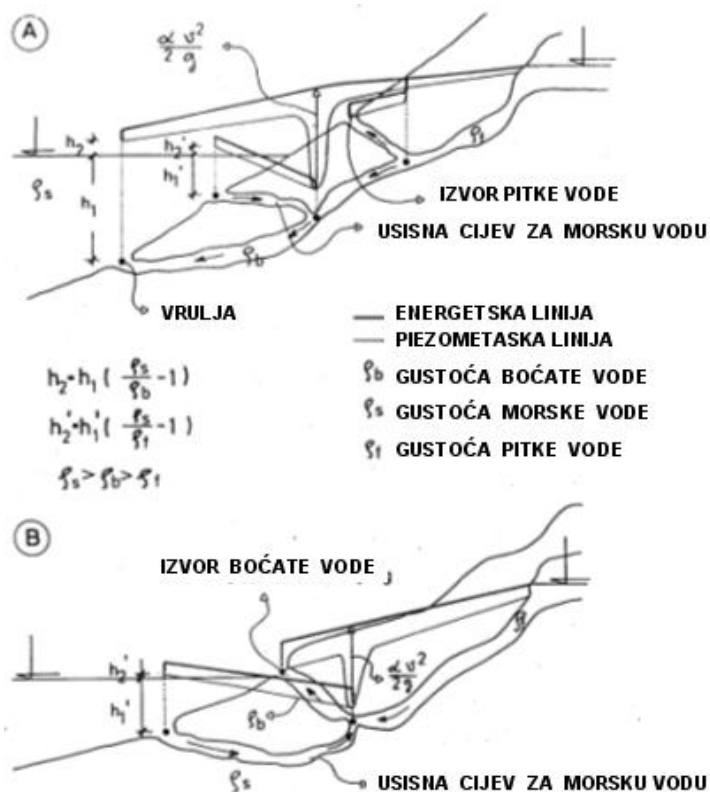
- h_1 dubina slatke vode ispod razine mora
- h_2 visina slatke vode iznad razine mora
- ρ_f gustoća slatke vode ($\rho_f \cong 1000 \text{ kg/m}^3$)
- ρ_s gustoća morske vode ($\rho_s \cong 1025 \text{ kg/m}^3$)



Slika 6.24 Odnos slatke i slane vode u slučaju hidrostatskog zakona (Bonacci)

Na osnovu Gyben-Herzbergovog zakona se može zaključiti da se uzdizanje slane vode ispod razine mora h_1 ovisi o nadvišenju slatke vode iznad razine mora, odnosno o obliku vodnog lica. Odnos slatke i morske vode (h_1/h_2) je obično konstantan i kreće se u granicama od 28 do 42 a najčešće u granicama od 36 do 40. To praktički znači da će sniženje razine vodnog lica u zdencu od 1 m uzrokovati podizanje razine mora tj. smanjenje stupca slatke vode za cca 40 m.

U slučaju da se nadvišenje vodnog lica iznad razine mora snizi uslijed crpljenja podzemne vode, uslijedit će i odgovarajuće uzdizanje morske vode pa postoji opasnost da zdenci zahvate morsku vodu odnosno da dođe do penetracije morske vode u leću slatke vode čime ona gubi na kakvoći. Ovaj fenomen se najčešće javlja na manjim otocima i u priobalju.



Slika 6.25 Primjer vrulja te slatkih i bočatih izvora (Bonacci)

6.6 Regionalni modeli toka u kršu

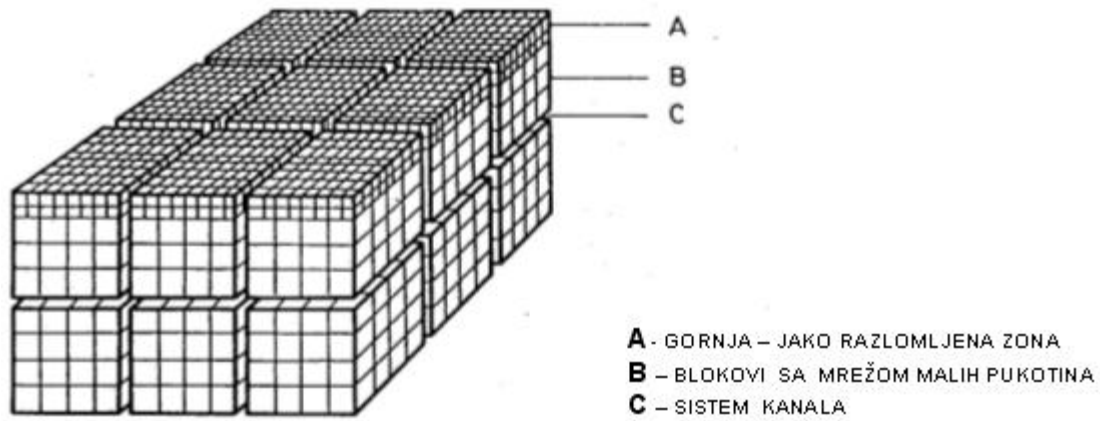
Jedna od podjela modela u kršu je i podjela na:

- identifikaciju karakteristika sredine pomoću ćelijskih modela
- identifikacija karakteristika sredine pomoću vodsprema i provodnika
- identifikacija karakteristika sredine korištenjem statističkog pristupa

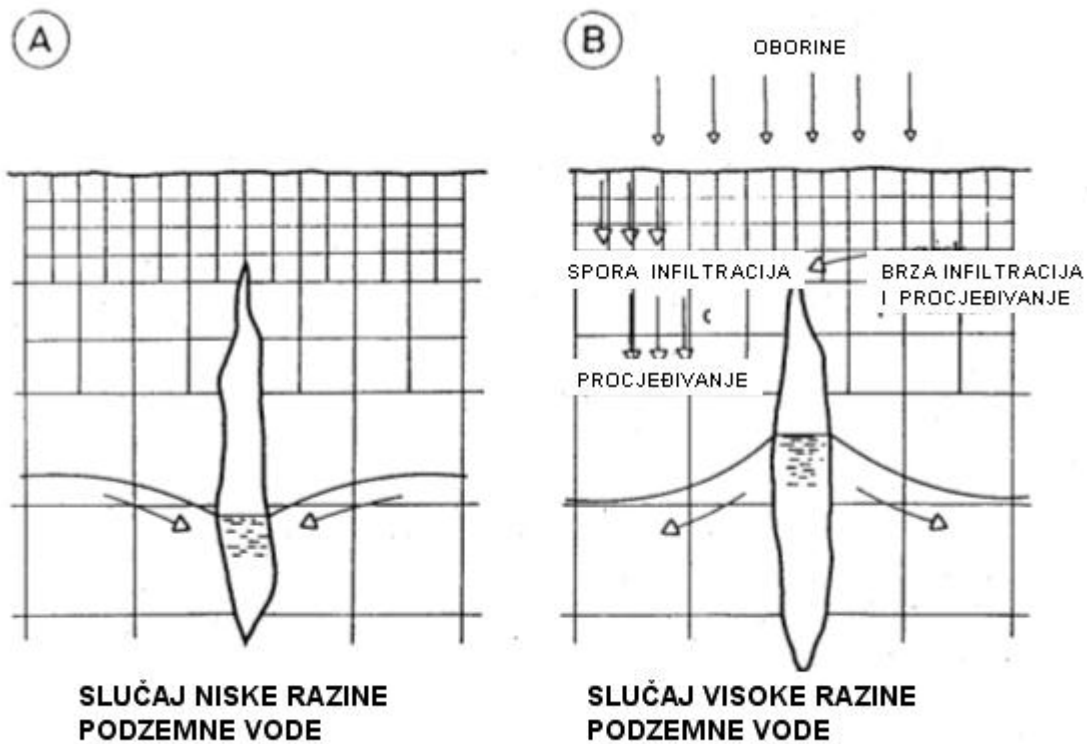
Opisivanje tečenja u kršu pomoću provodnika i vodsprema kao i ćelijskim modelima imaju svoju punu vrijednost u slučajevima postojanja podataka o raspodjeli ulaza (dotoka vode, infiltracije) po prostoru, i što je najznačajnije za ćelijske modele, razine ili proticaja po prostoru.

6.6.1 Ćelijski modeli

Relativno jednostavan model, prikladan za početak analize nekog hidrološkog sustava je predložio Drouge (1980, prema Bonacci) a shema je predstavljena na slici 6.26.

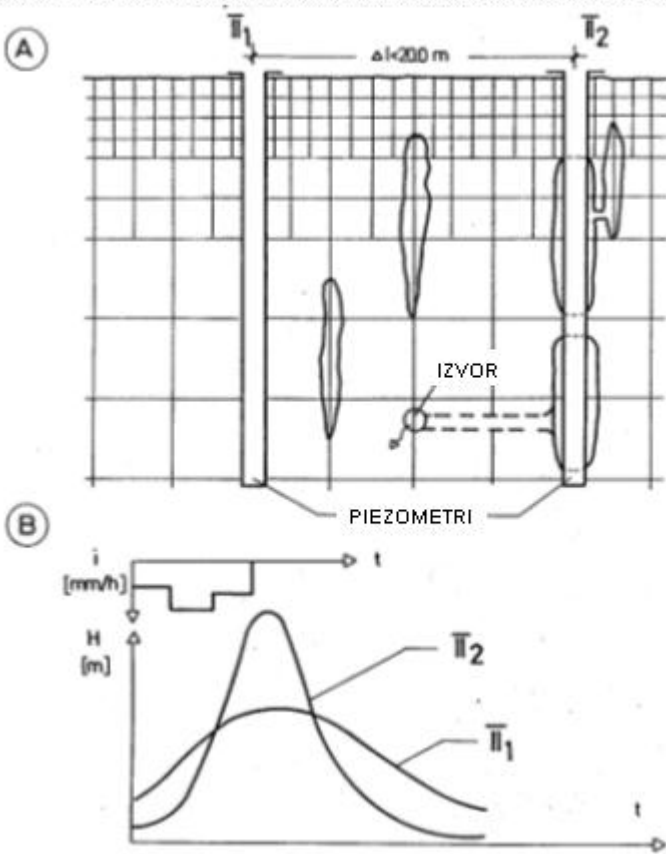


Slika 6.26 Shematski prikaz pukotina Drougue 1980, (prema Bonacci)

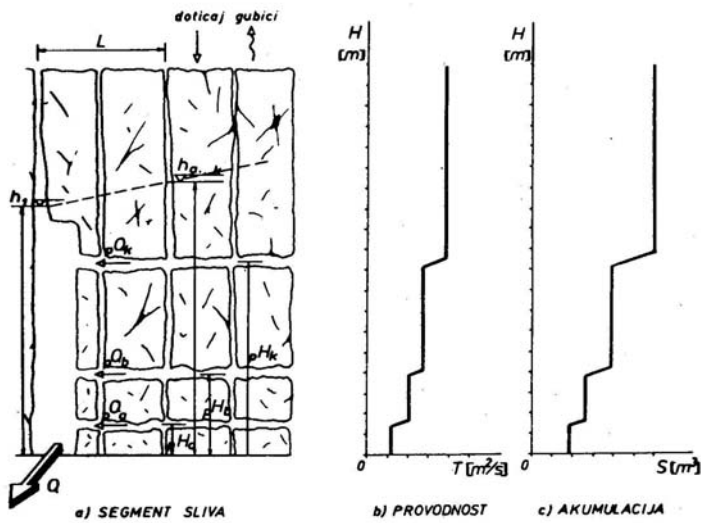


Slika 6.27 Primjer toka podzemnih voda u kršu za a) sušni period i b) kišni period (Bonacci)

RAZLIKE U IZGLEDU NIVOGRAMA OVISNO O POLOŽAJU PIEZOMETRA



Slika 6.28 Nivogrami za dva bliska piezometra u slučaju infiltracije istih oborina (Bonacci)



Slika 6.29 Šema modela dijela slivne površine sa provodnikom – kolektorom (Avdagić)

Dio slivne površine i njen provodnik – kolektor mogu se predstaviti šemom prikazanom na gornjoj slici. Na istoj slici je prikazana i ovisnost provodnosti i akumulativnosti u funkciji razine vode.

Provodnost dijela krškog sliva ovisi o razini vode i o položaju te obliku provodnika. Pri velikim vodama aktivne su sve pukotine od a do k dok pri malim vodama mogu biti aktivne na primjer samo pukotine a i b . Zbog toga u ovom dijelu sliva provodnost i akumulacija voda skokovito zavise od razine vode kako je to prikazano na gornjim slikama.

Protoci po slojnim pukotinama, polazeći od usvojenog koncepta, za vrijednosti razina vode h u podslivu su definirani:

$${}_p Q_k = \begin{cases} = \frac{2T_k B}{L}(h - h_x) & \text{za } h > H_k \\ = 0 & \text{za } h < H_k \end{cases} \quad \dots(6.46)$$

a u provodniku

$${}_p Q = \sum_{k=a}^n {}_p Q_k \quad \dots(6.47)$$

pri čemu je

Q	proticaj u provodniku - kolektoru
${}_p Q_a, {}_p Q_n$	proticaji pojedinih pukotina
${}_p H_a, {}_p H_n$	visinski položaj pukotina
h	vodostaj – razina vode
T	provodnost (transmisivnost)
S	aktivni akumulacijski prostor (akumulacijska karakteristika krša)
L	razmak između pukotina

6.6.2 Podzemne vodospreme i provodnici

Za određivanje oticaja i karakteristika režima voda javlja se potreba za rasčlanjivanjem sliva na podslivove i definiranjem svakog podsliva posebno. Za konceptualni element matematskog modela kraškog hidrološkog sistema kao najpogodniji je odabran podzemna vodosprema i provodnik.

Rad ovakovo usvojenog sustava se može opisati jednačbom vodospreme

$$V = K(t) \cdot Q^N \quad \dots(6.48)$$

i jednadžbom kontinuiteta:

$$\frac{dV}{dt} = I - Q \quad \dots(6.49)$$

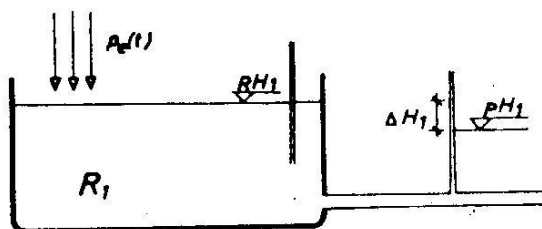
pri čemu je:

- V zapremina podzemne vodospreme
- Q količina vode koja istječe
- I količina vode koja dotječe
- t proteklo vrijeme
- K karakteristika vodospreme zavisna ili nezavisna od vremena i razine vode

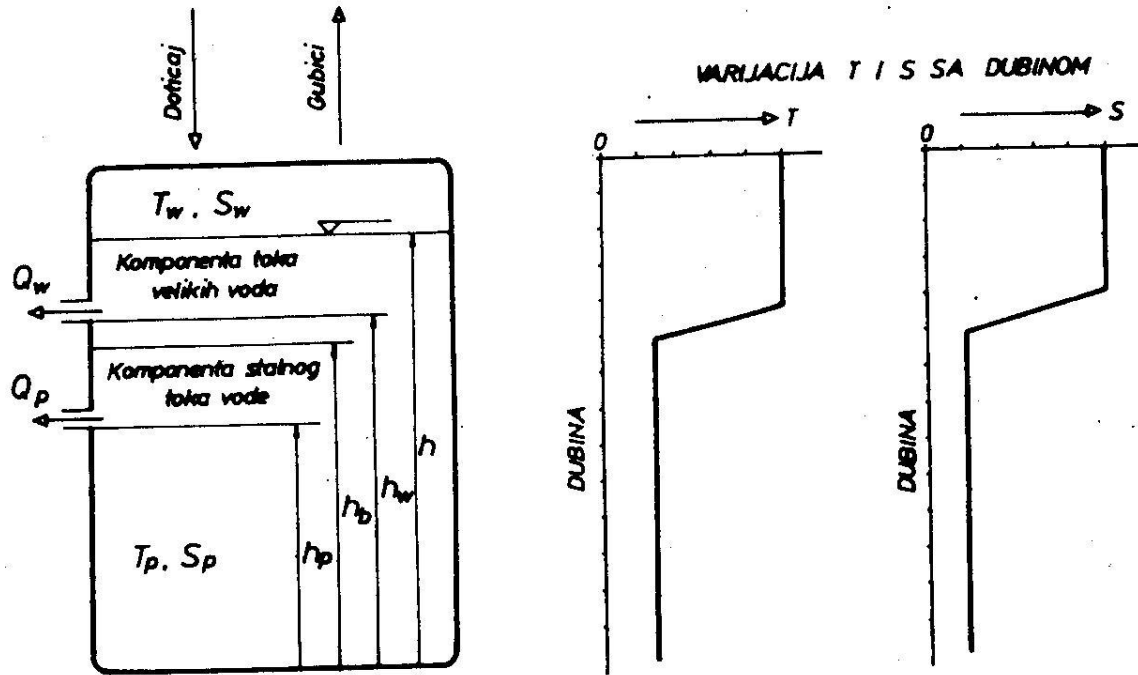
Kraški sliv karakterizira dva tipa akumulacija voda: akumulacije voda u sitnom pukotinskom sistemu i akumulacije voda u velikim podzemnim i površinskim prostorima u koje se ubrajaju i povremeno plavljena kraška polja. Oticanje voda iz ova dva tipa akumulacija odvija se sistemom makro i mikro pukotina. Makro pukotine, u značajnijoj transportnoj funkciji se često nazivaju i provodnici.

Vode u kraškim slivovima se skupljaju u sistemima akumulacija, pri čemu često otiču iz jednih akumulacija u druge i na izlaz kroz sistem provodnika. Provodnici su uglavnom podzemni, nevidljivi i nepristupačni, a njihov prostorni položaj na veličinu slivnih površina, funkciju i režim otjecanja.

Ovisno o hidrogeološkim odnosima, kraški sliv se može šematizirati sa određenim brojem vodosprema i provodnika. U nastavku je dato nekoliko šema.



Slika 6.30 Šema vodospreme sa provodnikom i mjernim mjestom (Avdagić)



Slika 6.31 Model provodnog sistema u kršu (Avdagić)

Od globalnih modela koji koriste provodnost i akumulacione karakteristike, kao konceptualne elemente, može se istaći model Kaeting-a(1982) (prema Avdagić) primjenjen na kraški vodonosnik u Hampshire u Engleskoj. U kraškoj sredini razlikuje se dva sistema provodnosti i oticanja. Proticaji za ove sisteme su definirani:

$$Q_w = \begin{cases} = \frac{2T_w B}{L} (h - h_w) & \text{za } h > h_w \\ = 0 & \text{za } h < h_w \end{cases} \quad \dots(6.50)$$

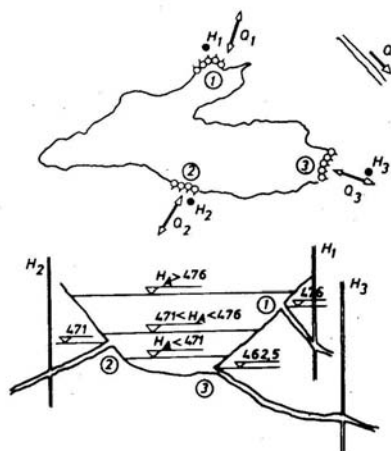
$$Q_p = \frac{2T_p B}{L} (h - h_p) \quad \text{za } h \geq h_p \quad \dots(6.51)$$

a ukupni proticaj je :

$$Q = Q_w + Q_p \quad \dots(6.52)$$

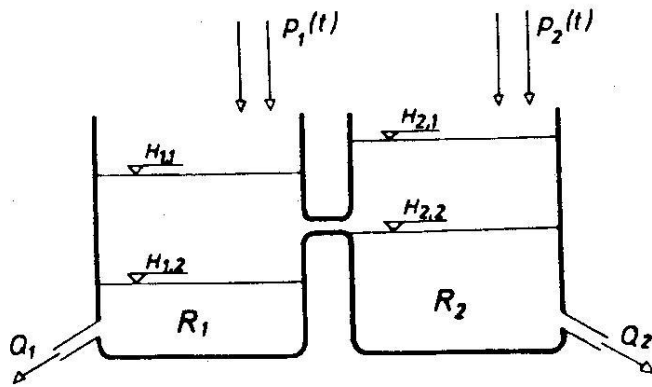
pri čemu je :

- B širina provodne zone
- L razmak između mjernog mjesta i izlaza
- T provodnost
- S koeficijent akumulacije

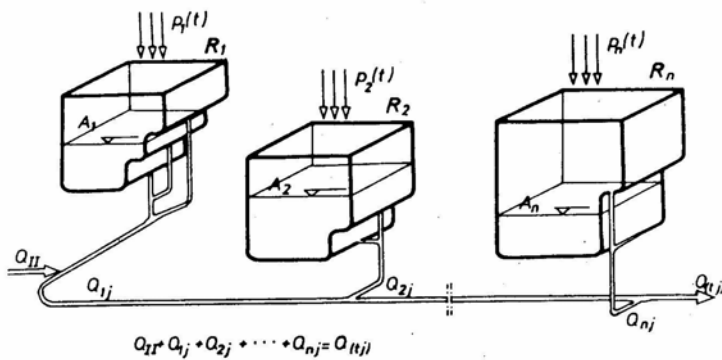


Slika 6.32 Položaj glavnih provodnih zona i mjernih mjesta u kraškom polju II (Avdagić)

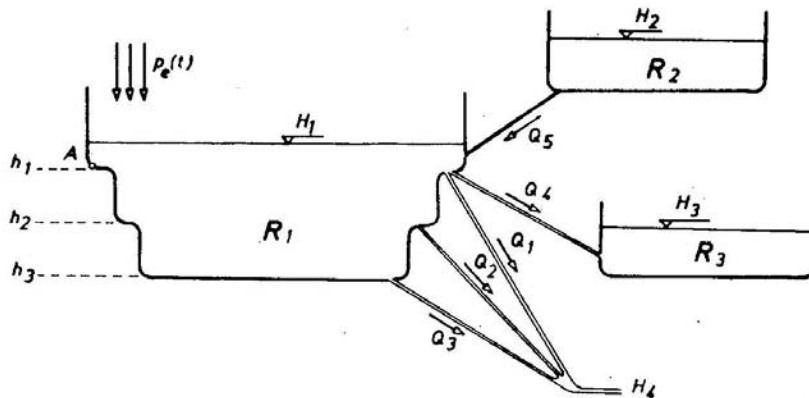
Na slici 6.32 je prikazano povremeno plavljeno krško polje. Doticaj i istjecanje iz površinskog djela polja se odvija kroz tri naznačene zone. Za razine koje su više od 476 sudjeluju sva tri provodnika, u slučaju da je razina između kote 471 i 476 m nije moguće otjecanje kroz provodnik 1 dok u slučaju da je razina ispod kote 471 nije moguće istjecanje kroz provodnike 1 i 2.



Slika 6.33 Šema sprege dva podsliva u kršu (Avdagić)



Slika 6.34 Šema kraškog hidrološkog sistema razloženog na podslivove – vodospreme (Avdagić)



Slika 6.35 Shema sistema sa tri vodospreme i veza vodospreme sa provodnicima (Avdagić)

Primjeri promjenjive geometrije

Podslivove koji su aproksimirani vodosprema u određenom opsegu karakteriziraju dvije konstante: efektivna površina A (H_i) i provodnost k_i . Za svaku od ove dvije fizikalne veličine interesantno je poznavanje njene promjene po visini (Avdagić).

Za opisivanje sistema vodosprema povezanih cijevnim provodnicima potrebno je formirati n jednadžbi kojima je opisana jednadžba kontinuiteta za svaku pojedinu vodospremu:

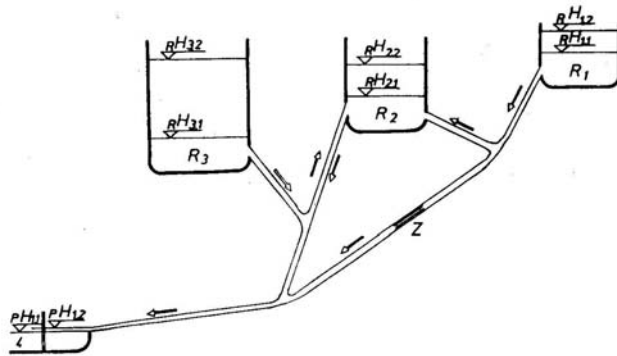
$$p_e(t) + Q_i(t) = A \frac{dH(t)}{dt} \quad \dots(6.53)$$

pri čemu su $p_e(t)$ ukupne efektivne padavine u slivu (infiltracija u vodospremu), $Q_i(t)$ protoci pojedinih provodnika a H razina vode u vodospremi.

U slučaju da imamo sistem vodosprema, opća jednadžba k -tog podsliva modeliranog pomoću vodosprema je

$$A_k(H_k) \frac{dH_k}{dt} = \sum_{i=1}^{M_k} U_{ki} + p_{ek} - \sum_{i=1}^{D_k} Q_{ki} \quad \dots(6.54)$$

pri čemu je U_{ki} dotok a Q_{ki} otjecanje iz vodospreme.



Slika 6.36 Šema primjera sistema sa plavljenim poljem (Avdagić)

Na prikazanoj shemi dolazi do plavljenja kraškog polja (vodosprema R_2) uslijed ograničene propusne moći nekih provodnika u sistemu, kroz koje ne može proteći sva voda koja se javlja u sistemu.

Može doći do tečenja pod pritiskom u trenucima kad se javljaju velike vode.

Zainteresirani čitaoci mogu pronaći i opise pronosa zagađivala u kršu u Avdagiću (str 8 i 9) kao i u Bonaccijevom članku u Građevnom godišnjaku 03/04.str 91-184