

# Praktični napotki za ugotavljanje ponikalnih sposobnosti tal

## Practical Guidelines for Water Percolation Capacity Determination of the Ground

Mihael BRENČIČ

Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Privoz 11, Ljubljana;  
e-mail: mihael.brencic@ntf.uni-lj.si

Oddelek za hidrogeologijo, Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana

Prejeto / Received 3. 2. 2011; Sprejeto / Accepted 8. 3. 2011

**Ključne besede:** ponikanje, ponikanje padavinske vode, ponikalni poizkus, prepustnost, ponikalna sposobnost, vrtina, izkop, ponikalnice, ponikalne naprave

**Key words:** percolation, percolation of precipitation water, percolation test, permeability, percolation capacity, borehole, shaft, soakaway, percolation facilities

### Izvleček

Ponikalni poizkusi predstavljajo pomemben del projektiranja in izvedbe naprav za ponikanje čistih padavinskih vod. Z njihovo pomočjo ocenimo ponikalno sposobnost tal in predvidimo odziv ponikalnih naprav na dotok padavinskih vod. V primerjavi z drugimi *in situ* hidrogeološkimi poizkusi so ponikalni poizkusi enostavni, kljub temu pa se v praksi pri njihovi izvedbi in interpretaciji pojavljajo številni problemi. Opisani so postopki izvajanja ponikalnih poizkusov v vrtinah in v izkopih. Sledi prikaz teorije za izračun koeficienta prepustnosti pri stacionarnih in nestacionarnih ponikalnih poizkusih. Teorija je ilustrirana s primeri izračunov in interpretacijo posameznih tipov krivulj znižanja, do katerih lahko pride med izvajanjem nestacionarnih ponikalnih poizkusov.

### Abstract

Determination of water infiltration capacity of ground soils and rocks represents important part of design and construction procedures of the facilities for the infiltration of clean precipitation water. With their help percolation capacity of ground as well as response of the infiltration facilities to the inflowing precipitation water is estimated. Comparing to other *in situ* hydrogeological tests they can be understood as simple. However, in every day's practice several problems during their on site application and desk interpretation can arise. Paper represents review of existing practical engineering procedures during the performance of percolation tests. Procedures are described for the borehole and shaft percolation tests execution and calculation theory for stationary and non-stationary percolation tests are given. Theory is illustrated with practical exercises. Interpretations of typical departures from theoretical presumptions according to Hvorslev test of non-stationary test are illustrated.

### Uvod

Z intenzivnim razvojem urbanih območij, kot so na primer mesta ali strnjena primestna naselja, v katerih je prisotna velika pokritost naravnih tal in kjer imamo opraviti s pomanjkanjem naravnih odvodnikov, se pogosto pojavlja vprašanje, kako in kam odvesti padavinsko vodo, ki odteka s strešnih in drugih utrjenih površin. Dodatno spodbudo ponikanju padavinskih vod na območju strnjених pozidav predstavljajo tudi novejši pristopi k varovanju podzemne vode, ki izhajajo iz Evropske okvirne direktive o vodah in na njej temelječi nacionalni zakonodaji. V okviru teh postopkov skušamo kar v največji meri ohraniti količinsko in kemijsko stanje podzemne vode. Zaradi tega soglasodajalci s svojimi smernicami investitorje in projektante usmerjajo v to, da čisto padavinsko

vodo ponikajo v neposredni bližini načrtovanih objektov.

V današnji hidrogeološki in gradbeniški praksi opažamo vedno pogostejše zahteve za ugotavljanje ponikalnih sposobnosti tal. Hkrati se s tem pred hidrogeologe postavljajo tudi zahteve za dimenzioniranje ali za preverjanje že obstoječih ponikalnih objektov. Pri tem opažamo, da je prav v povezavi s testiranjem ponikalnih sposobnosti tal veliko vprašanj in tudi problemov, pa čeprav gre za relativno enostavno hidrogeološko problematiko, ki ne terja poglobljenega poznavanja teorije hidrodinamike poroznega medija.

Kljub temu velja poudariti, da bomo, v kolikor želimo problematiko ponikanja obravnavati natančno, v skladu z obstoječo teorijo toka vode v poroznem mediju, naleteli na velike težave, saj ponikanje praviloma izvajamo v območju tal, ki z

vodo niso zasičena. Na takšnih območjih enostavni odnosi, ki izhajajo iz Darcyvega toka in linearnih parcialnih diferencialnih enačb difuzijskega tipa, veljavnih za zasičeno območje, odpovejo. Kot primer naj navedemo, da v nenasičenem območju koeficient prepustnosti ni konstanten, spreminja se v odvisnosti od vlažnosti in posledičnega hidravličnega potenciala. V primeru natančne obravnave toka vode skozi nezasičeno območje potrebujemo relativno obsežne meritve različnih hidravličnih parametrov, pa tudi računski postopki niso preprosti. Teorijo toka v nezasičenem poroznem mediju bomo za dimenzioniranje ponikalnih sposobnosti tal uporabili le pri zahtevnih objektih, predvsem tam, kjer morajo imeti naše napovedi visoko stopnjo zanesljivosti. V takšnem primeru je nalogo dimenzioniranja boljše zaupati specialistu, ki bo problem reševal z numeričnim modeliranjem.

V literaturi naletimo na vrsto empiričnih enačb, s pomočjo katerih izračunamo fizikalne parametre sedimentov (zemljin). Lep primer je ocena koeficienta prepustnosti sedimenta na podlagi analize krivulje zrnivosti. Takšnim izračunom navkljub je potrebno poudariti, da noben teoretični ali empirični obrazec ne odtehta poizkusa v naravi – *in situ*. V praksi zelo pogosto naletimo na popolnoma napačno rabo teh enačb, ki je posledica neupoštevanja dejstva, da so te enačbe veljavne le na zelo ozkem pasu koeficienta enakomernosti sedimenta. Zaradi tega v dobri inženirski praksi težimo k izvedbi ponikalnih poizkusov tal. Strošek ponikalnega poizkusa je povsem zanemarljiv v primerjavi s stroški projektiranja, kaj šele v primerjavi s stroški, ki nastanejo kot posledica neustreznega dimenzioniranja ponikanja.

Za potrebe vsakdanje inženirske prakse, na primer za ponikanje padavinske vode s strešnih površin, lahko v večini primerov uporabimo enostavne pristope, ki temeljijo na preprostih fizikalnih izhodiščih in na inženirski presoji. Namen članka je tako:

- 1) opisati metodologijo izvedbe ponikalnih poizkusov na terenu,
- 2) podati osnovna teoretična izhodišča za izračun ponikalnih sposobnosti,
- 3) opozoriti na probleme pri interpretaciji ponikalnih poizkusov.

Metodologija, ki jo opisujemo, je primerna predvsem za sedimente (zemljine), v manjši meri pa tudi za nekatere, predvsem mehke kamnine (hribine). V članku so prikazani le enostavni ponikalni poizkusi. Prikaz metodike zahtevnejših ponikalnih (nalivalnih) poizkusov, kot so na primer VDP poizkusi ali impulzni – slug poizkusi, je izpuščen.

Članek je namenjen uspešni izvedbi ponikalnih poizkusov na terenu in prikazu problemov, na katere lahko pri tem naletimo. Teorija, ki jo podajamo, je že dolgo uveljavljena, čeprav ne brez slabosti. Nekateri izhodiščni viri o postopkih izračunov, ki jih navajamo, so zelo težko dostopni, ker so se koncepti razširili iz delovnih poročil in ne iz primarnih znanstvenih objav. Nekatere

enačbe je objavilo več avtorjev različnih narodnosti in v različnih časovnih obdobjih. Hkrati je potrebno poudariti, da je večino enačb, ki so podane v nadaljevanju, možno izpeljati na podlagi preprostega premisleka in poznavanja osnovnih hidrogeoloških zakonitosti. Zaradi tega, so namerno opuščene vse reference. Avtor je le povzel znanje hidrogeologov praktikov in mu na nekaterih mestih dodal nekoliko bolj trdne teoretične temelje. Prav zaradi morebitne uporabe zapisanega v praksi so vse izpeljave prikazane pojasnjevalno in s poenostavljenim matematičnim aparatom.

Čeprav namen članka ni razprava o terminologiji, se na tem mestu velja nekoliko pomuditi tudi pri tem vprašanju. Poizkusi, s katerimi ugotavljamo ponikalne sposobnosti tal, niso poimenovani enotno. Strokovnjaki različnih profilov uporabljajo različno izrazje, prav tako pa tudi znotraj posameznih strok poimenovanja niso usklajena. Če pustimo vnmear terminološka razhajanja in razlike pri razumevanju izrazov kot so poizkus, poskus, preizkus in test bomo v vsakdanji praksi zasledili izraze ponikalni, nalivalni ali požiralni poizkus. Izraz ponikalni poizkus uporabljamo predvsem takrat, ko nas zanima ponikanje čiste padavinske vode, predvsem s strešnih površin. Izraz požiralni poizkus se uporablja redkeje, predvsem takrat, kadar testiramo kapaciteto različnih tipskih požiralnikov. Izraz nalivalni poizkus pa uporabljamo takrat, ko merimo hidravlične karakteristike sedimentov ali kamnin in so te meritve namenjene splošni geotehnični ali hidrogeološki karakterizaciji geološkega medija. Fizikalno in tehnično gledano med temi poizkusi ni razlike. Metodologija izvedbe in modeli toka vode za izračun hidravličnih parametrov so si pri teh poizkusih med seboj podobni ali celo identični. Ker nas v našem članku zanima le ponikanje, bomo v članku uporabljali izraz ponikalni poizkus. Vrtino ali izkop, v katerem izvajamo poizkus, bomo imenovali testni objekt.

### Metodologija terenske izvedbe ponikalnih poizkusov

#### Priprava na poizkus

Ponikalne poizkuse izvajamo v:

- a) vrtinah,
- b) izkopih.

Poizkusi v izkopih se izvajajo na globinah do 5 m, le redko na večjih globinah, saj to zahteva razpiranje izkopa ali kopanje v etažah. Vrtine izvajamo v primerih, ko želimo podatke iz globin, večjih od 5 m. Izkopi se izvedejo s strojnim (bagerskim) izkopom, vrtine pa se izvedejo z vrtalno garnituro. Bagerski izkopi so praviloma cenejši od sondažnih vrtin, za izvedbo katerih potrebujemo kvalificirane izvajalce. Če poizkuse izvajamo na gradbišču, so nam gradbeni stroji že na razpolago in tako izkop ne predstavlja dodatnih stroškov.

Kot pri vsakem terenskem zbiranju podatkov in vzorčenju moramo tudi pri izvajanju ponikalnih

sposobnosti sedimentov in kamnin poskrbeti za ustrezno dokumentiranje in zbiranje podatkov. V ta namen imamo že ob odhodu na teren pripravljene merilne naprave (npr. merilec nivojev podzemne vode, tlačne sonde ipd.) ter dokumentacijo. Najbolje je, da si že pred odhodom na teren pripravimo ustrezne obrazce in opomnike, ki nam bodo omogočili, da bomo zbrali vse, za interpretacijo ponikalnega poizkusa, relevantne podatke.

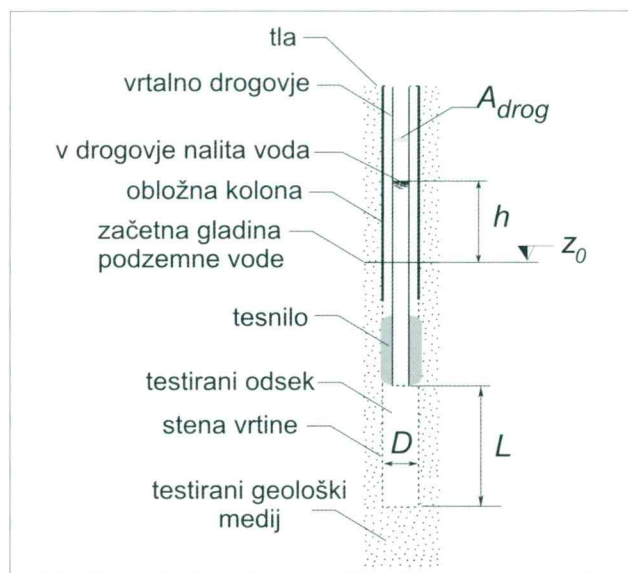
Tako kot tudi pri drugih geoloških in geomehanskih raziskavah, je tudi za interpretacijo ponikalnih poizkusov potrebno razpolagati z dobrim geološkim popisom jedra ali izkopanega materiala. Poleg standardnih zahtev moramo biti pri popisu pozorni zlasti na razmerje med drobnozrnatimi in debelo-zrnatimi frakcijami sedimenta. Če je le mogoče, pri tem opazujemo tudi njegovo teksturo; ugotavljamo ali debela zrna plavajo znotraj drobnih zrn – sediment z muljasto oporo (ang. mud supported texture) ali pa močno prevladujejo debela zrna – sediment z zrnsko oporo (ang. grain supported texture). Pri izvajanju ponikalnih poizkusov se je potrebno zavedati dejstva, da sedimenti ali kamnine niso homogeni in izotropni, zato je pomembno, da si pred in med izvajanjem poizkusa zabeležimo podatke o takšnih pojavih. Zlasti pri plitvih izkopih smo pozorni na pojave korenin ali rogov, ki jih izkopljejo živali (t.i. bioturbacija). Ti pojavi zelo vplivajo na oceno prepustnosti sedimenta in lahko v veliki meri zameglijo dejanske ponikalne značilnosti in imajo za posledico napačno dimenzioniranje ponikalnih objektov.

Pri vsakem ponikalnem poizkusu je zaželeno, da odvezamemo tudi vzorce za določitev zrnivosti sedimenta. S pomočjo rezultatov teh analiz lahko z izkustvenimi enačbami ocenimo koeficient prepustnosti sedimenta. Te ocene obravnavamo kot vzporeden rezultat s katerim kontroliramo naše meritve, tako pridobljene vrednosti pa ne morejo biti nadomestilo za izvedbo in situ poizkusov. Po presoji odvezamemo tudi vzorec za mineraloško analizo, predvsem takrat, ko predvidevamo prisotnost nabreklih mineralov (npr. montmorilonitne gline) ali lahkotopnih mineralov (npr. sadra). Sestavni del dobro dokumentiranega popisa so tudi dobre fotografije. Pri tem posnamemo ožjo in širšo lokacijo, na kateri izvajamo poizkus. Pri testiranju v vrtinah fotografiramo jedro, pri čemer ne smemo pozabiti na oznake, ki pojasnijo, za kateri interval jedra gre, in na njegovo orientacijo. Izkop fotografiramo iz različnih zornih kotov, pri čemer fotografiramo vse stene, dno pred in po koncu izvajanja poizkusa in izkopen material.

Poleg zgoraj navedenih informacij o testiranem sedimentu ali kamnini je za ustrezno interpretacijo rezultatov ponikalnega poizkusa potrebno natančno poznati geometrijo vrtine ali izkopa. Brez teh podatkov je ustrezna in strokovno utemeljena interpretacija ponikalnega poizkusa nemogoča.

Odločitev o geometriji testnega objekta sprejememo v fazi načrtovanja ponikalnega poizkusa in priprave idejnih zasnov ponikalnih objektov. Velikost je odvisna od razpoložljive tehnologije za pri-

pravo testnega objekta, od ocene volumna, grobe – ekspertne ocene prepustnosti ter pretoka vode, ki jo je potrebno ponikati. Pri večjih volumnih ponikane vode težimo k večjim testnim objektom. Pri vrtinah, ki se izvajajo za potrebe geološko geomehanskih raziskav, je ponikalni poizkus le eden od poizkusov v množici drugih, zaradi česar hidrogeolog na geometrijo testiranega odseka le stežka vpliva. V takšnem primeru je pomembna natančna obdelava rezultatov ponikalnega poizkusa in njegova interpretacija. Pri vrtini zabeležimo interval globine testiranega odseka, premer testiranega odseka ter notranje premere cevi v katerih opazujemo znižanje v vrtino nalite vode. Zabeležimo tudi podatke o morebitni uporabi tesnil (ang. packer) in njihovih značilnostih (npr. tlak s katerim je tesnilo napihnjeno). Pri testiranju v izkopih natančno zabeležimo njihovo globino in tlorisne dimenzije; širino in dolžino. Osnovna geometrija vrtine je prikazana na sliki 1.



Sl. 1. Splošni prikaz geometrije vrtine pri ponikalnem poizkusu

Poleg geometrije je zelo pomemben tudi podatek o pojavu podzemne vode v testnem objektu. Včasih je podzemna voda v vrtini ali izkopu prisotna, včasih pa je testni objekt suh. Pred začetkom poizkusa z merilcem nivojev podzemne vode zabeležimo globino do podzemne vode, nato pa to globino pretvorimo bodisi v kote, bodisi v referenčno višino nad začetno gladino podzemne vode. Podajanje višin je odvisno od ciljev in narave interpretacije ponikalnega poizkusa. Pri izkopih, kjer dno vidimo s površine, je prisotnost vode očitna, pri vrtinah pa temu ni tako. Tudi podatek, da vode v poizkusnem objektu ni, je zelo pomemben. Pri zelo slabo prepustnih sedimentih moramo upoštevati, da je tudi v primeru prisotnosti podzemne vode njeno izcejanje zelo počasno, kar lahko vpliva na potek izvajanja poizkusa in na njegovo kasnejšo interpretacijo. V takšnih primerih se izvajalec poizkusa odloči, ali bo s testiranjem začel nekoliko kasneje in s tem vodi omogočil, da se izcedi, ali pa bo spremenil geometrijo testnega objekta, tako da bo zmanjšal njegov volumen.

Pri izvajanju ponikalnih poizkusov je pomembno, da izkop ali vrtino pred nalivanjem uravnotežimo. To pomeni, da izkop ali vrtino pustimo nekaj časa stati. Takšno čakanje je namenjeno temu, da se v testni objekt nateče morebitna podzemna voda in da se nivoji podzemne vode v objektu in njegovi okolici uravnotežijo. Pri zrnastih sedimenta večjih od peska je priporočljivo čakanje do 10 minut, pri peskih od 10 min do 20 minut, pri zrnastih manjših od peska pa vsaj 30 min in več. Pri nekaterih vrstah ponikalnih poizkusov je podatek o gladini podzemne vode možno pridobiti s pomočjo dodatne interpretacije, vendar je ta vedno podvržena veliki negotovosti in jo uporabimo le v skrajni sili.

### *Izvedba ponikalnega poizkusa*

Pred izvedbo ponikalnega poizkusa se moramo odločiti kakšne vrste poizkus bomo opravili. V grobem poznamo:

- a) stacionarne ponikalne poizkuse,
- b) nestacionarne ponikalne poizkuse.

Pri stacionarnih poizkusih vodo v testni objekt nalivamo ob znanem dotoku – pretoku  $Q$  in vzdržujemo konstantno višino vode  $h$  v testnem objektu. Pri nestacionarnih nalivalnih poizkusih vodo v testni objekt nalijemo do neke poljubne višine  $h_{max}$ , nato pa opazujemo znižanje nalite vode  $\Delta h$  v odvisnosti od časa  $t$ . Stacionarne nalivalne poizkuse izvajamo zlasti tam, kjer bo ponikanje potekalo preko zadrževalnika padavinske vode, nestacionarne ponikalne poizkuse pa tam, kjer bo voda v ponikalni objekt dotekala v časovno spremenljivi obliki in kjer lahko dotok padavinske vode opišemo s hidrogramom padavinskega dogodka. Pomembna omejitev pri izvajanju stacionarnih ponikalnih poizkusov je razpoložljivost vode za testiranje. Stacionarni poizkusi praviloma terjajo večje količine vode, ki je zlasti na območjih, kjer gradbišče še ni vzpostavljeno, ni mogoče zagotoviti. Prav tako so zahtevnejši tudi s stališča opreme za izvedbo.

Če je pretok ponikanja pri stacionarnih poizkusih večji od 10 L/s v testiranem objektu nivo vode vzdržujemo 5 minut, če je pretok ponikanja večji od 1 L/s, 15 minut in 30 minut, če je pretok ponikanja manjši od 1 L/s. Navkljub temu, da smo izvedli stacionarni poizkus, po končanem nalivanju izvedemo opazovanje znižanja nalite vode. Analiza znižanja nam služi za kontrolo rezultatov stacionarnega poizkusa in morebitno dodatno analizo robnih pogojev, ki vplivajo na ponikanje. Pri nestacionarnih ponikalnih poizkusih vodo v testni objekt pogosto nalijemo do površine – kote tal. V večini primerov pri interpretaciji to ne predstavlja problemov. Problemi se lahko pojavijo pri globokih testnih objektih (globljih od 50 m), kjer lahko z nalivanjem do površine ustvarimo relativno visoke hidrostatske tlake, zaradi katerih pride do turbulentnega toka v testirani odsek ali celo do porušitve testiranih odsekov oziroma obtekanja tesnil ali začasne cevovod, ki ločujejo te-

stirani odsek od ostalih odsekov testnega objekta. V takšnem primeru se višino nalivanja določi na podlagi ciljev poizkusa in na podlagi predhodne presoje, do katere višine se bo voda dvignila v realnem ponikalnem objektu.

Ponikalne poizkuse izvajamo s čisto vodo. Zelo pogosta napaka pri izvajanju ponikalnih poizkusov je uporaba onesnažene vode. Do te napake zelo pogosto pride, ko na delovišču ni hidrantnega omrežja in je vodo potrebno pripeljati od drugod. Če je za ta namen uporabljena cisterna ali rezervoar, ki služi drugačnim namenom kot prevozu čiste vode (npr. gnojenju ali prevozu gnojevke), bo voda onesnažena. Takšna voda ima drugačno viskoznost kot čista voda, vsebuje pa tudi suspendirane delce, ki kolmatirajo – zamašijo pore sedimenta ali kamnine v testiranem objektu. Na deloviščih, kjer gradbišče še ni odprto, se za namene ponikalnih poizkusov pogosto uporablja tudi voda iz bližnjega potoka. V primeru uporabe takšne vode je potrebno zagotoviti, da se iz potoka ne črpa voda s suspendiranimi snovmi. Najbolje je, da se voda prečrpa v rezervoar, v katerem se odsede in šele nato nalije v testni objekt. Poizkus, opravljen z onesnaženo vodo, bo dal pristranske rezultate, praviloma nižje vrednosti prepustnosti in ponikalnosti, kot bi jih dobili s čisto vodo.

Vse meritve ponikalnih poizkusov izvajamo z elektronskimi merilniki, ki so danes na tržišču dostopni po ugodnih cenah. Pri nestacionarnih ponikalnih poizkusih uporabljamo tlačne sonde z zapisovalcem podatkov (data loggerjem). Na trgu so na voljo tlačne sonde z zelo različno občutljivostjo. Občutljivost sonde je odvisna od narave izvajanja ponikalnega poizkusa. Pri običajnih nestacionarnih ponikalnih poizkusih v izkopih in deloma tudi v vrtinah uporabljamo tlačne sonde z občutljivostjo 1 bara. Če izvajamo poizkuse na večjih globinah uporabimo sonde z manjšo občutljivostjo in večjo odpornostjo (10 m, 20 m in 100 m sonde). Pri izvedbi poizkusa je pomembna tudi hitrost odčitavanja meritev. Priporočeni maksimalni interval med odčitki je 10 sekund, za natančno interpretacijo pa je smiselno uporabiti krajše intervale odčitkov na vsaj 2 sekundi. Glede na dostopnost in nizke cene elektronskih merilcev je v današnjem času uporaba ročnih meritev nesprejemljiva. Te meritve uporabimo le še izjemoma, ko moramo na gradbišču opraviti hiter ponikalni poizkus in pri roki nimamo ustrezne opreme. Meritve, ki jih opravimo z elektronsko opremo, so pri interpretaciji rezultatov poizkusa zelo dragocene.

Med izvajanjem ponikalnega poizkusa bodisi v vrtini bodisi v izkopu beležimo vse posebnosti in dogodke, ki bi lahko vplivali na interpretacijo rezultatov poizkusa. Zabeležimo morebitne zruške testiranih odsekov. V redkih primerih med izvajanjem ponikalnega poizkusa gladina nalite vode zaniha ali pa se celo dvigne. Slednje se pogosto dogodi takrat, ko v slabše prepustnih sedimentih ali kamninah nismo počakali dovolj časa, da bi se testni objekt uravnotežil z okolico. Do nihanja gladine v vrtino nalite vode prihaja tam, kjer izvajamo poizkuse v zaprtih vodonosnih strukturah in so v okolici prisotni viri dinamičnih obremenitev

(npr. ob železniških progah ali ob avtocestah) ali pa tam, kjer imamo opraviti s slabo prepustnimi sedimenti. Takšne dogodke zabeležimo in jih pri kasnejši obdelavi poizkusa poizkušamo interpretirati. Če med izvajanjem poizkusa pride do takšnega dogodka, je najbolje, da testirani odsek očistimo in ponikalni poizkus ponovimo.

#### *Izvajanje ponikalnih poizkusov v vrtinah*

Na reprezentativnost ponikalnih poizkusov v vrtinah v veliki meri vpliva tehnologija vrtanja. Če nam tehnologija vrtanja dopušča in so geološke razmere (lega in zaporedje plasti) na testiranem območju dobro poznane, vrtino izvrtamo z izpihavanjem izvrtanine s stisnjenim zrakom (npr. rotacijsko-udarno vrtanje s sprotnim cevljenjem). V kolikor to ni mogoče, se testirani interval izvrti z vodo kot izplačnim medijem. Testiranj odsekov vrtin, ki so bile izvrtane z izplačnimi tekočinami, se izogibamo. V takšnih primerih ponikalne poizkuse izvedemo le izjemoma. Pred ponikalnim poizkusom v vrtini, ki je bila izvrtana s pomočjo polimerne izplake, mora biti izveden obrat viskoznosti izplake, testirani odsek pa temeljito izpran z vodo. Ponikalni poizkusi, ki so izvedeni v vrtinah izvrtanih z bentonitno izplako, so pristranski. Testiranje odsekov vrtin, ki so bile izvrtane z izplačnimi tekočinami, je problematično tudi zaradi tega, ker je testirani odsek potrebno predhodno pripraviti z izpiranjem, pri tem pa lahko pride do rušenja sten vrtin in s tem do spremembe geometrije testiranega odseka, česar pa s površja ne moremo zaznati. V najslabšem primeru to povzroči težave pri nadaljnjem vrtanju. Pri uporabi izplake v vrtinah, ki so namenjene hidrogeološkemu testiranju, je pomembno dobro sodelovanje med tehnologom – glavnim inženirjem vrtalne garniture in izvajalcem ponikalnih poizkusov – hidrogeologom.

Pogosta napaka pri izvajanju nalivalnih poizkusov v vrtinah je neustrezna uporaba vrtalnega drogova in obložnih kolon. V vrtinah le izjemoma izvajamo testiranje v nezacevljenih vrtinah. Zaradi preprečevanja porušitve so testirane vrtnice zacevljene z obložnimi kolonami. Če izvajamo nestacionarni ponikalni poizkus v vrtini zacevljeni z obložno kolono težimo k temu, da imamo v predelu, v katerega smo nalili vodo, enoten prečni profil cevovte. V ta namen uporabljamo vrtalno tankostensko drogovo tipa Q (npr. HQ, BQ ipd.). Če se prečni profil v predelu, kjer opazujemo upadanje v kolono nalite vode, spremeni, se nam bo spremenila tudi hitrost upadanja nivoja vode. V primerih, ko moramo testirane odseke izolirati s tesnili, vodo v testirani odsek nalivamo skozi vrtalno drogovo, na katerem je obešeno tesnilo (sl. 1). Tudi v tem primeru mora biti prečni profil vrtalnega drogova, v katerega nalivamo vodo in opazujemo znižanje, enakomeren. Uporaba debelostenskega drogova s spojnicami zaradi katerih so znotraj prisotne zožitve, ni priporočljiva.

Pri nekaterih vrtinah v nekonsolidiranih sedimentih stabilnosti sten vrtnice ne moremo zagotoviti (npr. pri izvedbi nalivalnih poizkusov v pro-

dno peščenih plasteh). V takšnem primeru v vrtino vstavimo filtre, ki preprečujejo rušenje sten. Pri tem moramo uporabiti takšne filtre, ki so za



Sl. 2. Prikaz izkopa opremljenega z mersko lato



Sl. 3. Izkop pripravljen na izvajanje ponikalnega poizkusa – dotočna cev z zaščito sonde (foto Z. Bole)

nekaj velikostnih redov prepustnejši od testiranega medija. S tem bomo zagotovili, da hidravlične izgube, ki nastanejo na režah filtrov, ne bodo imele vpliva na izvedbo nalivalnega poizkusa. Te pogoje praviloma zlahka zagotovimo, kljub temu pa je prepustnost filtrov potrebno predhodno testirati. Poizkus izvedemo tako, da dno filterske cevi zapremo in vanjo nalijemo vodo. V notranjosti filterske cevi opazujemo hitrost znižanja nivoja nalite vode. Pri filterih z zelo visokim deležem odprtin prepustnosti ne bomo mogli izmeriti.

Način izvedbe ponikalnih poizkusov v vrtinah in zaporedje opravil lahko strnemo v naslednje korake:

- Testirani odsek vrtine ustrezno pripravimo z izpiranjem in odstranitvijo morebitne izplake.
- Preverimo prehodnost vrtine. Ta postopek praviloma opravimo z merilcem nivojev podzemne vode ali utežjo tako, da ga spustimo do dna vrtine. Med spuščanjem smo pozorni na morebitne ovire, če je prisotna podzemna voda, izmerimo globino do podzemne vode.
- V vrtino spustimo merilno sondo. Zaradi varnosti sondo obesimo tik nad testirani odsek vrtine. Vrtina mora biti ustrezno opremljena, zaščitena z obloženimi cevmi, testiranju v nezacevljenih vrtinah se izogibamo.
- V vrtino nalijemo čisto vodo, če je le mogoče, skušamo izmeriti ali oceniti pretok vode, ki jo nalivamo v vrtino. Z merilno sondo opazujemo dvig nivoja nalite vode v vrtino.
- Pričnemo s ponikalnim poizkusom. Izvedemo bodisi stacionarni bodisi nestacionarni ponikalni poizkus.
- Če izvajamo nestacionarni ponikalni poizkus, ga vsaj dvakrat ponovimo. Priporočljivo je, da poizkus izvajamo toliko časa, da nivo nalite vode upade na nivo pred začetkom poizkusa. Pri nizkih prepustnostih, kjer je znižanje nivoja podzemne vode zelo počasno, posamezno fazo poizkusa izvajamo vsaj pol ure.
- Odstranimo merilno opremo.
- Preverimo prehodnost vrtine po končanem testiranju.

#### *Izvajanje ponikalnih poizkusov v izkopih*

Pri izvajanju ponikalnih poizkusov v izkopih, je potrebno posvetiti pozornost varnosti izvajalca poizkusa. V nepodprte izkope, globlje od 1,5 m, ne vstopamo, zato vsa dela in vse meritve opravimo s površine. Meritve opravimo z mersko lato (sl. 2), ustrezno dolgim merskim trakom ali laserskim merilcem razdalj. V primeru prisotnosti podzemne vode, ta počasi meži iz sten izkopa, zaradi česar lahko pride do rušenja sten (sl. 4 in sl. 5). Takšna porušitev je pogosto zelo hitra. V takšnem primeru izkoplujemo širši izkop, da nam med izvajanjem poizkusa ne zasuje merske sonde in da spremenjena geometrija izkopa ne vpliva na potek in na kasnejšo interpretacijo poizkusa. Zasutju sonde se izognemo tako, da sondo vstavimo v perforirano cev (sl. 3).



Sl. 4. Primer porušenega izkopa v spodnjem delu pod slabo prepustnim pokrovom (foto T. Matoz)



Sl. 5. Primer porušenega izkopa v spodnjem delu izkopa v prodo peščenih plasteh (foto Z. Bole)

Pri izkopu stene izkopa oblikujemo čim bolj vertikalno. Izkop mora biti v predelu, kjer bomo izvedli poizkus, oblikovan v obliki kvadra, ki mu natančno določimo dimenzije. Izkopov nepravilnih ali ovalnih oblik se pri izvajanju ponikalnih poizkusov izogibamo.

Način izvedbe ponikalnih poizkusov v izkopih in zaporedje opravil lahko strnemo v naslednje korake:

- Izvedemo izkop.
- Izmerimo dimenzije izkopa, izvedemo popis in fotografiramo izkop ter izkopan material.
- Izmerimo globino do podzemne vode.
- V izkop vstavimo merilno sondo, ki jo zaščitimo pred zruškom sten tako, da jo vstavimo v perforirano cev.
- V izkop nalijemo čisto vodo, če je le mogoče, skušamo izmeriti ali oceniti pretok vode, ki jo nalivamo v izkop. Z merilno sondo opazujemo dvig nivoja nalite vode v izkop.
- Pričnemo s ponikalnim poizkusom. Izvedemo bodisi stacionarni bodisi nestacionarni ponikalni poizkus.
- Če izvajamo nestacionarni ponikalni poizkus, poizkus ponovimo. Priporočljivo je, da poizkus izvajamo toliko časa, da nivo nalite vode upade na nivo pred začetkom poizkusa

ali pa da se izkop posuši. Pri nizkih prepustnostih, kjer je znižanje nivoja nalite vode zelo počasno, posamezno fazo poizkusa – vsako nalivanje, izvajamo vsaj pol ure.

- h) Odstranimo merilno opremo.
- i) Preverimo geometrijo izkopa po končanem poizkusu.

### Teoretična izhodišča

Teorija ponikalnih (nalivalnih) poizkusov je zelo kompleksna in skoraj tako obsežna kot teorija črpalnih poizkusov. Tako kot v primeru slednjih, so tudi pri ponikalnih poizkusih na razpolago enostavne metode, kot tudi zelo kompleksne in zahtevne metode. Na tem mestu bomo podali le nekaj osnovnih in najpogostejše uporabljenih metod obdelave ponikalnih poizkusov v vrtinah ali izkopih, ki se prav zaradi enostavnosti uporabljajo v vsakdanji praksi dimenzioniranja ponikalnih objektov.

#### *Teorija nestacionarnih ponikalnih poizkusov v vrtinah*

Stacionarni tok vode v zasičenem poroznem mediju opišemo z Darcyevim zakonom, ki podaja odvisnost med volumskim pretokom  $Q$  vode skozi dano površino  $A$  in hidravličnim gradientom  $dh/dr$ , kjer je  $h$  hidravlična ali piezometrična višina in  $r$  razdalja v cilindričnem koordinatnem sistemu. Če Darcyovo enačbo v skladu z Dupuitovo hipotezo zapišemo v cilindričnem koordinatnem sistemu sledi:

$$Q = -KA \frac{dh}{dr} = -2\pi rh(r)K \frac{dh}{dr} \quad (1)$$

Za nestacionarne ponikalne poizkuse v praksi najpogostejše uporabimo enačbo Hvorsleva, ki temelji na predpostavki, da voda, nalita v testirani odsek cilindrične oblike, odteka skozi linearni rezervoar. Zanj je značilno, da je hitrost upadanja nivoja vode prenosorazmerna višini nalite vode. Pri izpeljavi enačbe po Hvorslevu izhajamo iz bilančne enačbe, ki podaja pretok v vrtalnem drogovju in pretok ponikanja v testiranem odseku. Pretok vode v vrtalnem drogovju  $Q_{drog}$ , skozi katerega nalivamo vodo opredelimo kot:

$$Q_{drog} = A_{drog} \frac{dh}{dt} = \pi \frac{d_{drog}^2}{4} \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

kjer je  $A_{drog}$  prečni presek drogovja, v katerega nalivamo vodo, in  $d_{drog}$  premer drogovja. Pretok skozi testirani odsek  $Q_{odsek}$  določimo s pomočjo Darcyevega zakona po enačbi (1):

$$Q_{odsek} = -KA \frac{dh}{dr} \quad (3)$$

Ker imamo pri ponikalnih poizkusih v testiranih odsekih pogosto opraviti z zelo raznolikimi

geometrijami, Darcyev zakon zapišemo nekoliko drugače. Uvedemo faktor oblike  $F$  in enačbo (3) poenostavimo:

$$Q_{odsek} = -KFh \quad (4)$$

$F$  zajame tako obliko testiranega odseka kot tudi vpliv hidravličnega gradienta na tok vode. Gradient tako v zgornji enačbi zajamemo le posredno s hidravlično višino  $h$ , ki predstavlja razliko med tlakom v vrtini in tlakom v nemotenem vodonosniku. Iz načela zveznosti izhaja, da sta  $Q_{drog} = Q_{odsek}$  in od tod iz enačb (3) in (4) sledi:

$$\pi \frac{d_{drog}^2}{4} \frac{dh}{dt} = -KFh \quad (5)$$

Enačba (5) je preprosta diferencialna enačba z ločljivimi spremenljivkami. Če imamo opraviti z robnimi pogoji, kjer je ob času  $t = t_1$ ,  $h = h_1$  in ob času  $t = t_2$ ,  $h = h_2$  sledi:

$$\pi \frac{d_{drog}^2}{4} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = -KF \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (6)$$

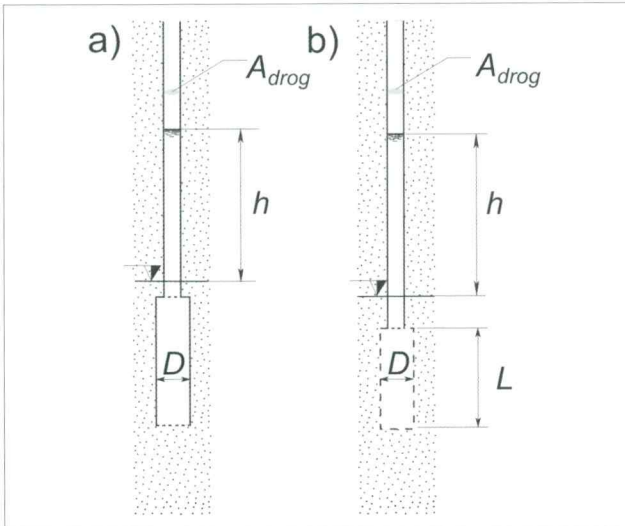
in rešitev enačbe (6) se glasi:

$$K = \frac{A_{drog}}{F(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{\pi d_{drog}^2}{4F\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (7)$$

Nekoliko poenostavljeno enačbo (7) zapišemo v bolj tradicionalni obliki zapisa po Hvorslevu:

$$K = \frac{A_{drog}}{F\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

Faktor  $F$  je odvisen od geometrije vrtine in testiranega odseka. Teoretično faktor oblike določimo z rešitvijo osnovne enačbe toka podzemne vode v cilindričnem ali eliptičnem koordinatnem sistemu, vendar na tem mestu zaradi matematične zahtevnosti izpeljave ne bomo podali. Velik del faktorjev oblike, na katere bomo naleteli v literaturi, je določen eksperimentalno. V vsakdanji praksi uporabljamo le nekaj faktorjev oblike  $F$ , ki jih najdemo v ustreznih priročnikih. Najpogostejše geometrije testiranih odsekov v vrtinah so prikazane na sliki 6. Na levi strani (sl. 6a), je prikazana geometrija v primeru, ko vodo nalivamo le skozi dno vrtine, v tem primeru potrebujemo le podatek o premeru testiranega odseka  $D$ , o višini nalite vode  $h$  nad statičnim nivojem podzemne vode in površini prečnega prereza  $A_{drog}$  vrtalnega drogovja, v katerem opazujemo višino ali znižanje v vrtino nalite vode. Na desni strani (sl. 6b) je prikazana geometrija, ko nalivanje izvajamo v odprt odsek vrtine dolžine  $L$  in premera  $D$ , tudi tukaj imamo opraviti s prerezom  $A_{drog}$ . Za relativno grobo oceno hidravličnih značilnosti testiranega geološkega medija lahko prikazane sheme (sl. 6) uporabimo tako v primeru prisotnosti gladine podzemne vode, kot v primeru, da je vrtina suha. Če je vrtina suha, višino  $h$  računamo od sredine testiranega odseka  $L$ , pri ponikanju le v dno vrtine pa od dna.



Sl. 6. Prikaz najpogostejših geometrij pri izvajanju ponikalnih poizkusov

Vsaka od podanih geometrij testiranih odsekov ima svoj geometrijski faktor  $F$ . Za primer nalivanja vode v vrtino, kjer je odprto le dno (sl. 6a), preostali del vrtine pa je zacevljen, je primeren faktor oblike:

$$F = 2,75D \quad (9)$$

Zgornji faktor oblike (9) lahko uporabimo tudi v primeru, ko nalivamo v izkop v katerega smo vstavili polno cev ali sod brez dna in ju nato obsuli z izkopanim materialom. V primeru, ko vodo nalivamo v odprt odsek vrtine, kot to prikazuje (sl. 6b), pa uporabimo geometrijski faktor:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)} \quad (10)$$

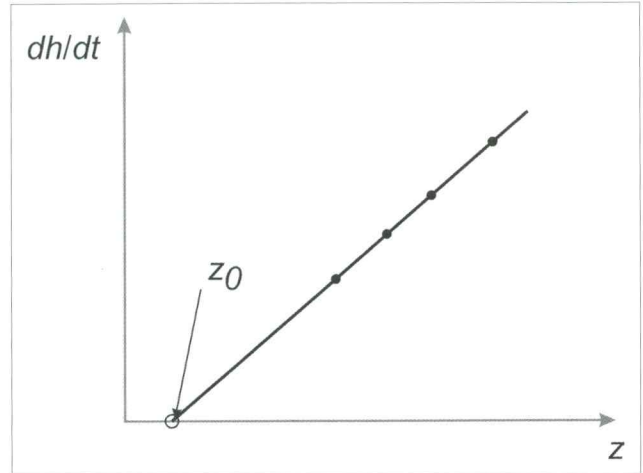
Obstajajo pa tudi drugačne geometrije testiranih odsekov in s tem tudi drugačni faktorji oblike  $F$ , ki jih lahko najdemo v literaturi. Pri nestacionarnih ponikalnih poizkusih velja omeniti še metodo za določitev nivoja gladine podzemne vode, za primer, ko je bila voda v vrtini prisotna, pa tega podatka nimamo na razpolago. Metoda izhaja iz enačbe (5) kjer imamo na levi strani podano hitrost znižanja v vrtino nalite vode  $dh/dt$  na desni strani pa višino  $h$ . Če enačbo preuredimo v nizu tako da je:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{K4F}{\pi d_{\text{drog}}^2} h \quad (11)$$

$$c = -\frac{K4F}{\pi d_{\text{drog}}^2} \quad (12)$$

$$\frac{dh}{dt} = -ch \quad (13)$$

Iz enačbe (13) vidimo, da je hitrost upadanja v vrtino nalite vode linearno odvisna od višine. Če nanesemo hitrost upadanja  $dh/dt$  v diagram odvisnosti od absolutne kote gladine vode  $z$  nalite



Sl. 7. Prikaz ocene začetnega nivoja podzemne vode

v drogovje, kot to prikazuje slika 7, bo odnos v tem diagramu opredeljen kot premica. Absolutna kota gladine podzemne vode je definiran kot  $z = z_0 + h$ , kjer je  $z_0$  gladina podzemne vode pred nalivanjem.

Iz enačbe (13) in definicije kote gladine podzemne vode izhaja, da je v primeru  $dh/dt = 0$ ,  $h = 0$ , ter  $z = z_0$ . Če nanesemo v diagram realno hitrost zniževanja v vrtino nalite vode v odvisnosti od kote in dobljeno premico ekstrapoliramo do  $dh/dt = 0$ , dobimo oceno začetne gladine podzemne vode. Ker lahko v praksi pri dejanski izvedbi meritev izračunamo le hitrost med dvema meritvama  $dh/dt = h_2 - h_1/(t_2 - t_1)$ , kot oceno trenutne višine  $h$  upoštevamo  $h_{\text{sred}} = (h_1 + h_2)/2$ .

#### Teorija stacionarnih ponikalnih poizkusov v vrtinah

Pri podajanju teorije ponikalnih poizkusov v vrtinah pri stacionarnem režimu se v inženirski praksi praviloma uporablja le ena enačba, za katero pa literatura večinoma ne poroča o izpeljavi in njenem teoretičnem ozadju. Del literaturnih virov to enačbo razume kot empiričen obrazec, ki se je v praksi izkazal kot najustreznejši. Enačbo je možno izpeljati s pomočjo predpostavk o idealnem vodnjaku na podlagi Dupuitove teorije, vendar ta izpeljava ne zdrži resne teoretične presoje. Iz tega sledi, da je enačbo potrebno obravnavati predvsem kot empirično. Kljub temu si to izpeljavo zaradi razjasnitve narave enačbe oglejmo nekoliko podrobneje.

Predpostavimo, da imamo opraviti s hidrodinamsko zaprto vodonosno strukturo za katero velja Darcyev zakon, zapisan po Dupuitu:

$$Q = AK \frac{dh}{dr} = 2\pi rBK \frac{dh}{dr} \quad (14)$$

kjer imamo, poleg že uveljavljenih oznak, še debelino vodonosne strukture ali testnega odseka  $B$ . Zaradi lažje izpeljave, enačbo (14) pišemo kot pozitivno, za razliko od enačbe (1), ki jo pišemo kot negativno. Če so robni pogoji postavljeni v mejah od  $h = h$  in  $h = 0$  ter  $r = r_{\text{test}}$

$r = R$ , kjer je  $R$  radij vpliva vrtine, potem se ob dejstvu, da imamo ponovno preprosto diferencialno enačbo z ločljivimi spremenljivkami, rešitev (14) glasi:

$$Q \int_{r_{\text{test}}}^R \frac{dr}{r} = 2\pi BK \int_0^h dh \quad (15)$$

in tako sledi:

$$Q = 2\pi KB \frac{h}{\ln(R/r_{\text{test}})} \quad (16)$$

Uvedemo še nekaj zelo grobih predpostavk. Dolžino testiranega odseka  $L$  izenačimo z debelino  $B$  in radij vpliva vrtine  $R$  prav tako z dolžino testiranega odseka  $L$ , polmer  $r$  pa nadomestimo s premerom  $D$  potem sledi izraz za stacionarni ponikalni poizkus:

$$K = \frac{Q}{2\pi Lh} \ln \frac{2L}{D} \quad (17)$$

kjer je  $Q$  – pretok nalivanja,  $L$  – dolžina testiranega odseka,  $D$  – premer testiranega odseka,  $h$  – višina nalite vode nad gladino podzemne vode. Po delu literaturnih virov naj bi bila enačba veljavna le v primeru, ko je dolžina testiranega intervala  $L$  večja od 5 premerov  $D$  testiranega odseka.

Poglejmo natančneje, kaj s tako grobo izpeljavo storimo. Predpostavimo, da je tok vode iz testiranega odseka v okolico vrtine horizontalen in da vpliv nalivanja seže le do radija  $R$ , ki ustreza dolžini testiranega odseka  $L$ . Že preprosta presoja dejanskih hidravličnih razmer v okolici testirane vrtine pokaže, da so to zelo grobe predpostavke in poenostavitve, ki deloma veljajo le za enostavne geometrije vodonosnih struktur.

Enačbo (17) bomo v literaturi srečali pod zelo številnimi imeni. V slovenski hidrogeološki praksi in tudi v delu anglosaksonske strokovne literature je najbolj poznana pod imenom Lefrancova enačba. Del nekdanje jugoslovanske hidrogeološke literature jo je po zgledu ruske imenoval Nasbergova enačba. V anglosaksonski literaturi to enačbo zasledimo kot enačbo USBR – *Earth Manual*. Nekatera od teh imen se občasno uporabljajo tudi za nestacionarne poizkuse.

V slovenski hidrogeološki praksi naletimo tudi na empirično enačbo imenovano Barbedette-jeva enačba:

$$K = 0,366 \frac{Q}{Lh} \log \frac{L}{r} \quad (18)$$

kjer je pomen oznak enak kot predhodno, v enačbi nastopa le polmer testiranega odseka  $r$ . Z malce aritmetike se izkaže, da gre za enak zapis enačbe kot pri (17). Enačbi (17) in (18) se med seboj razlikujeta le v pretvorbi konstant. Naravni logaritem  $\ln$  je pretvorjen v desetiški logaritem  $\log$  s konverzijskim faktorjem 2,3, upoštevani pa sta še konstanti  $2\pi$  v imenovalcu ulomka, namesto premera  $D$  pa je uporabljen polmer  $r$ .

## Teorija ponikalnih poizkusov v izkopih

Če izhajamo iz dejanske teorije toka vode v poroznem mediju, bomo ugotovili, da je zelo težko podati teoretično izvedene enačbe, ki bi bile v primeru izkopov enostavne in uporabne brez večjih računskih naporov. Zaradi tega pri testiranju ponikalnih sposobnosti v izkopih uporabljamo še nekoliko večje poenostavitve kot v primeru vrtin. Pri izkopih zaradi večje zanesljivosti težimo k izvedbi stacionarnih nalivalnih poizkusov. Pri ponikalnih poizkusih v izkopih opazujemo tudi volumen vode in pretok ponikle vode. Te podatke pri dimenzioniranju ponikalnih objektov uporabimo tako, da jih primerjamo s projektnim hidrogramom, to je razvojem pretoka vode, ki ga je potrebno ponikniti. Ponikalni poizkus uporabimo kot analogijo kasnejšega ponikanja, tako da skušamo v čim večji meri posnemati realno ponikanje. Tako opredelimo:

- povprečni pretok ponikanja  $Q_{\text{pov}}$ , ki ga izračunamo na podlagi poznavanja celotnega volumna vode  $V_{\text{cel}}$ , ki smo ga poniknili v času izvajanja poizkusa  $t$ :

$$Q_{\text{pov}} = \frac{V_{\text{cel}}}{t} \quad (19)$$

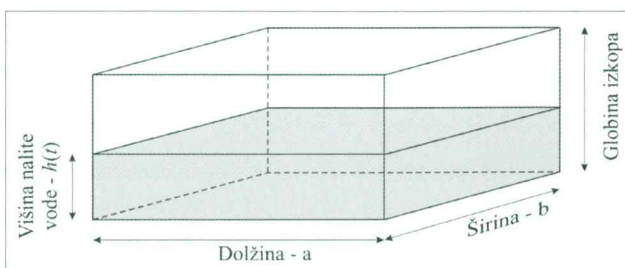
- specifično ponikalnost  $q_{\text{spec}}$ , ki podaja povprečni pretok  $Q_{\text{pov}}$  normiran na omočeno površino izkopa  $A$ :

$$q_{\text{spec}} = \frac{Q_{\text{pov}}}{A} \quad (20)$$

Omočena površina izkopa pri stacionarnem nalivalnem poizkusu je definirana kot:

$$A = ab + 2h_{\text{max}}(a + b) \quad (21)$$

kjer  $a$  in  $b$  določata širino in dolžino izkopa,  $h_{\text{max}}$  pa višino v izkop nalite vode. Geometrija izkopa je prikazana na skici (sl. 8).



Sl. 8. Prikaz geometrije izkopa

Za potrebe ocene hidravličnih lastnosti tal pri preprostejših ponikalnih objektih v nezasičenem območju uporabljamo modificirano Bindenmannovo metodo, ki izhaja iz Darcyvegega zakona in zgornjih definicij (19) in (20). Koeficient prepustnosti pri stacionarnih ponikalnih poizkusih izračunamo po enačbi:

$$K = \frac{2V_{\text{cel}}}{At} = 2 \frac{Q_{\text{pov}}}{A} = 2q_{\text{spec}} \quad (22)$$

Poizkus podaja grobo oceno koeficienta prepustnosti  $K$ , zanesljivost ocene pa narašča s časom trajanja poizkusa. Med izvajanjem tega poizkusa težimo k vzpostavitvi stacionarnih pogojev; poizkus izvajamo toliko časa, da se pretok ponikanja  $Q$  in višina nalite vode  $h$  povsem umirita in stabilizirata. Podoben izraz bi dobili, če bi izhajali iz izkustvenega priporočila nekaterih avtorjev, da je v nezasičenem območju koeficient prepustnosti enak:

$$K = \frac{K_{sat}}{2} \quad (23)$$

kjer je  $K_{sat}$  koeficient prepustnosti nasičenega poroznega medija in iz definicije Darcyvega zakona ob predpostavki, da je hidravlični gradient enak 1. Slabost modificirane Bindmanove enačbe (22) je prav ta, da med izvajanjem ponikalnega poizkusa ne upošteva spreminjanja hidravličnega gradienta s časom.

Pri nestacionarnih ponikalnih poizkusih izkopih se znajdemo še v večjih težavah, kot pri stacionarnih poizkusih. Predvsem zaradi tega, ker v primeru izkopov, za razliko od vrtin, ne moremo opredeliti konstantnega območja  $A$ , preko katerega poteka ponikanje, temveč se ta površina med upadanjem gladine neprestano spreminja. Torej velja  $A = A(t)$  in  $h = h(t)$ . Tako izhajamo iz Bindmanove metode (22) spremenjene definicije omočene površine  $A$  (21).

$$A(t) = ab + 2(a + b)h(t) \quad (24)$$

Enačbo (22) aritmetično preuredimo in namesto  $Q_{pov}$  vpeljemo  $Q(t)$

$$Q(t) = 2KA(t) \quad (25)$$

ker je pretok  $Q(t)$  v izkopu s pravokotnim izkopom tlorisa  $ab$  enak

$$Q(t) = abh(t) \quad (26)$$

sledi izraz

$$h(t) = \frac{2K}{ab} A(t) \quad (27)$$

Na podlagi enačbe (27) narišemo diagram z neodvisno spremenljivko  $h(t)$  in neodvisno spremenljivko  $A(t)$  ter poiščemo tisti del, v katerem lahko raztros podatkov meritev aproksimiramo z ravno črto, od tod pa ob poznavanju geometrije izkopa izračunamo koeficient prepustnosti  $K$ . Pri tem pa je potrebno poudariti, da gre za zelo grobo poenostavitev, in da pogosto podatkov ni mogoče interpolirati na takšen način. V takšnem primeru je izračun v veliki meri odvisen od sposobnosti in znanja interpretatorja poizkusa.

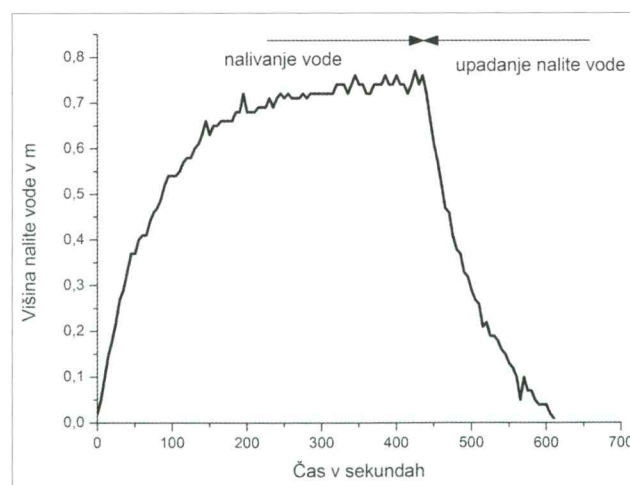
## Primeri izračunov

V nadaljevanju je prikazan postopek izračuna za predhodno opisane ponikalne poizkuse. Prikazani podatki izvirajo iz poizkusov, ki so bili opravljeni na terenu. Namen tega prikaza je ilustrirati postopek izračuna, ko se rezultati meritev skladaajo s predpostavkami računskih modelov. Pred začetkom opisovanja in podajanja izračunov velja opozoriti, da so rezultati meritev in podatki o geometriji vrtin pogosto podani v različnih enotah. Neupoštevanje tega dejstva ima za posledico povsem napačen rezultat. Čeprav gre pri uporabi enot za navidezno samoumevnost pa se pri recenzijah različnih tehničnih elaboratov prav to neupoštevanje enot izkaže za zelo pogosto napako.

### Izračun stacionarnega ponikalnega poizkusa v vrtini

V testiranem odseku vrtine dolžine  $L = 2$  m in premera  $D = 0,1$  m je bil opravljen stacionarni ponikalni poizkus pri katerem je bil dosežen pretok ponikanja  $Q = 0,23$  L/s. Pri tem je bila v vrtalno drogovje nalita voda v višini  $h = 0,76$  m. Premer vrtalnega drogovja znaša  $d_{drog} = 76$  mm.

Potek celotnega ponikalnega poizkusa je prikazan na diagramu na sliki 9. Diagram, kjer je podana višina nalite vode v vrtini nad začetno gladino podzemne vode v odvisnosti od časa, je sestavljen iz dveh delov. Prvi začetni del predstavlja nalivanje vode, drugi del pa predstavlja upadanje nalite vode, to je tisti del poizkusa, ki ga enačimo z nestacionarnim ponikalnim poizkusom, po tem, ko smo prenehali z nalivanjem vode v vrtino. Iz krivulje nalivanja lahko vidimo, da je nivo vode v vrtini sprva strmo naraščal, nato se je hitrost navkljub manjšim nihanjem ustalila. Ta ustalitev nivoja ustreza stacionarnemu ponikalnemu poizkusu, v skladu z zgoraj podanimi meritvami in podatki.



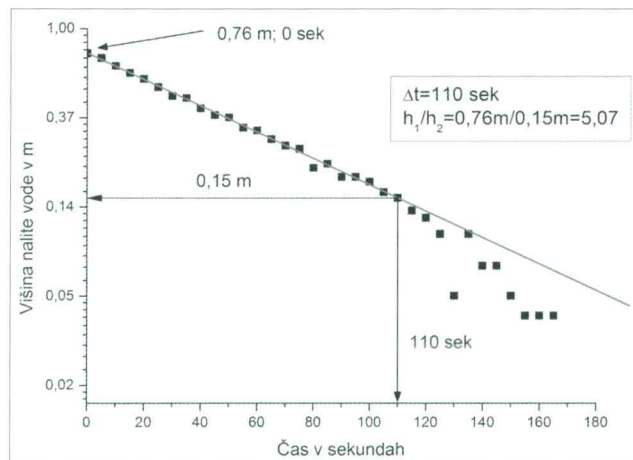
Sl. 9. Potek ponikalnega poizkusa v vrtini

Ob upoštevanju enačbe (17) sledi izračun koeficienta prepustnosti  $K$ , ki v danem primeru znaša  $8,90 \times 10^{-5}$  m/s.

### Izračun nestacionarnega ponikalnega poizkusa v vrtini

V predhodnem podpoglavju smo podali krivuljo nalivanja in krivuljo znižanja (sl. 9). Izračunajmo koeficient prepustnosti  $K$  še iz krivulje znižanja. V semilogaritemski diagram, kjer je višina nalite vode  $h$  podana v logaritemskem merilu, vnesemo meritve iz krivulje znižanja. Če izmerjeni podatki ustrezajo modelu po Hvorslevu, bodo v semilogaritemskem diagramu nanizani vzdolž ravne črte, tako kot lahko to vidimo na sliki 10. Skoraj vedno bomo pri meritvah opazili odstopanja od predpostavljenega modela. Če so ta odstopanja, tako kot v našem primeru, manjša, jih zanemarimo, v nasprotnem primeru jih moramo interpretirati.

Iz diagrama odčitamo višine  $h_i$ . Te višine izberemo tako, da se nahajajo vzdolž ravnega dela krivulje znižanja, pri tem težimo k temu, da je časovna razlika  $\Delta t$  med odčitki čim večja. Na diagramu (sl. 10) smo izbrali začetno višino  $h_1 = 0,76$  m, ki ustreza času  $t_1 = 0$  sekund in višino  $h_2 = 0,15$  m, ki ustreza času  $t_2 = 110$  sekund. Zaradi majhne višine vode v zaključnem delu ponikalnega poizkusa podatke od  $t = 140$  sekund dalje zanemarimo. Sledi izračun faktorja oblike  $F$ , kjer glede na podane podatke o obliki testiranega odseka vrtine, izberemo enačbo (10). Ob upoštevanju podane geometrije je  $F = 3,40$ . Sledi izračun po enačbi Hvorsleva (8). Iz odčitanih podatkov in podane geometrije vrtine znaša izračun koeficienta prepustnosti  $K = 7,81 \times 10^{-5}$  m/s.



Sl. 10. Prikaz izračuna nestacionarnega ponikalnega poizkusa po Hvorslevu

Kot lahko vidimo, se izračuna za stacionarni del ponikalnega poizkusa in nestacionarni del poizkusa med seboj nekoliko razlikujeta. Vzrokov za takšne razlike je več. Glavne razlike izhajajo iz teoretičnih predpostavk, na podlagi katerih so izvedene enačbe za izračun koeficientov prepustnosti  $K$ . Med izvajanjem stacionarnega poizkusa in nestacionarnega poizkusa v vrtini vladajo drugačni hidravlični pogoji. Med izvajanjem stacionarnega poizkusa lahko pri višjih pretokih pride do turbulenc, s tem pa do odstopanja od predpostavk veljavnosti Darcyvega zakona, takšen tok lahko povzroči tudi manjše spremembe v geometriji testiranega odseka vrtine.

Katerega od koeficientov prepustnosti bomo uporabili, je odvisno od poteka poizkusa. Prav zaradi razlik v rezultatih je priporočljivo, da poizkus vsaj enkrat ponovimo. Če odstopanja med rezultati niso velika, izračunamo povprečen rezultat. Tako je v našem primeru koeficient prepustnosti  $K = (K_1 + K_2)/2 = 8,35 \times 10^{-5}$  m/s. Pri podajanju reprezentativne vrednosti koeficienta prepustnosti  $K$ , moramo imeti v mislih tudi namen rezultata. V primeru, ko bo rezultat namenjen dimenzioniranju ponikanja, bomo uporabili nižjo – konzervativnejšo vrednost, v primeru napovedovanja dotokov vode med gradnjo objekta, ko varujemo izkop in zagotavljamo varnost, pa višjo vrednost. S takšnim pristopom na posreden način upoštevamo varnostni faktor, kar je potrebno pri podajanju rezultatov tudi navesti.

### Izračun stacionarnega ponikalnega poizkusa v izkopu

Opraviti imamo z izkopom v tla tlorisne površine  $1,5 \times 1,0$  m, ki smo ga izkopali do globine 1,0 m. Sediment v katerem izvajamo poizkus se razlikuje od zgornjega primera v katerem smo prikazali obdelavo nestacionarnega nalivalnega poizkusa. Stene izkopa so vertikalne. V izkop smo nalili vodo in vzdrževali konstanten nivo nalite vode na globini 0,4 m. V izkop smo vodo nalivali 19 minut, od tega smo 10 minut vzdrževali konstanten nivo nalite vode s pretokom  $Q = 3$  L/s.

Iz enačbe (24) izhaja, da je pri višini nalite vode  $h = 0,6$  m površina omočenega dela sten izkopa  $A = 4,5$  m<sup>2</sup>. Od tod iz enačbe (22) sledi izračun koeficienta prepustnosti  $K = 1,33 \times 10^{-3}$  m/s.

### Interpretacija krivulj znižanja

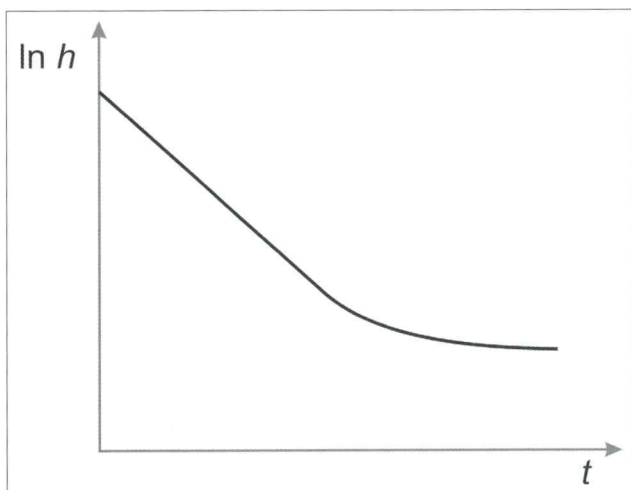
Interpretacija stacionarnih ponikalnih poizkusov je premočrtna. Ko v vrtini ali izkopu dosežemo ustaljeno ponikanje in stabilen nivo nalite vode, je izračun le še preprosta aritmetična operacija. Veliko več problemov in težav nastopa pri interpretaciji krivulj znižanja nalite vode pri nestacionarnih poizkusih. Odstopanja od teoretične krivulje po Hvorslevu lahko razdelimo v štiri osnovne skupine, ki jih na kratko interpretiramo in razlagamo v nadaljevanju. Skupine krivulj smo poimenovali z oznakami od A do D in so predstavljene na slikah od 11 do 14. Obliko krivulj interpretiramo podobno kot pri črpalnih poizkusih, kjer opazujemo odstopanje izmerjenih krivulj znižanja od teoretično predpostavljenih krivulj. Krivulje, ki so podane v nadaljnji razlagi, so prikazane shematsko v semilogaritemskem diagramu in brez navajanja dejanskih vrednosti.

Podana interpretacija je lahko v pomoč pri razlagi realnih, v naravi izvedenih poizkusov, ne more pa biti obvezno vodilo. Zavedati se je potrebno, da je vsak ponikalni poizkus samosvoj in da je njegovo interpretacijo potrebno izvesti na podlagi vseh razpoložljivih terenskih podatkov in ne zgolj

meritev znižanja nivojev nalite vode. Prav tako se moramo zavedati, da so nekatere podane razlage le interpretacije, ki jih je potrebno z nadaljnjim teoretičnim delom še preveriti.

### Krivulja A

Pri krivulji, ki je podana na sliki 11, vidimo, da nivo v testni objekt nalite vode sprva upada eksponentno (ravni del črte), nato pa se s časom hitrost upadanja nivoja zmanjša in ustali. Če izhajamo iz enačbe Hvorsleva (8) bi to pomenilo, da se je med izvajanjem opazovanja koeficient prepustnosti  $K$  v testiranem odseku zmanjšal. Kadar se znižanje nalite vode obnaša tako, se nalita voda ustali nad nivojem vode, pri katerem smo začeli z nalivanjem ali pa v sicer predhodno suhem odseku voda obstoji. Vzrokov za takšno obnašanje krivulje je več. Eden od vzrokov je, da poizkus ni bil izveden s čisto vodo zaradi česar so se med izvajanjem poizkusa pore zamašile – kolmatirale. Takšno znižanje se lahko pojavi tudi pri testiranju predhodno zelo suhega sedimenta.



Sl. 11. Krivulja A – krivulja znižanja ne doseže začetnega nivoja

Podobno obliko krivulje dobimo tudi takrat, ko poizkuse izvajamo v sedimentih z muljasto oporo. Med pripravo testnega odseka in med kasnejšim nalivanjem s sten odprtega dela vrtine speremo melj in glino, kar ima za posledico, da se znotraj vrtine tvori suspenzija. Ko hidrostatski tlak  $h$ , ki ga povzroči nalita voda pade, in s tem hitrost strujanja vode iz testnega odseka v okoliški geološki medij, se pričnejo drobno zrnati delci nabirati na stene testnega odseka, in ne prodirajo več globlje v testirani odsek, zaradi česar upade prepustnost na meji med vrtino in testiranim medijem. Na obodu vrtine se tvori film podoben izplačnemu kolaču pri vrtanju z izplako.

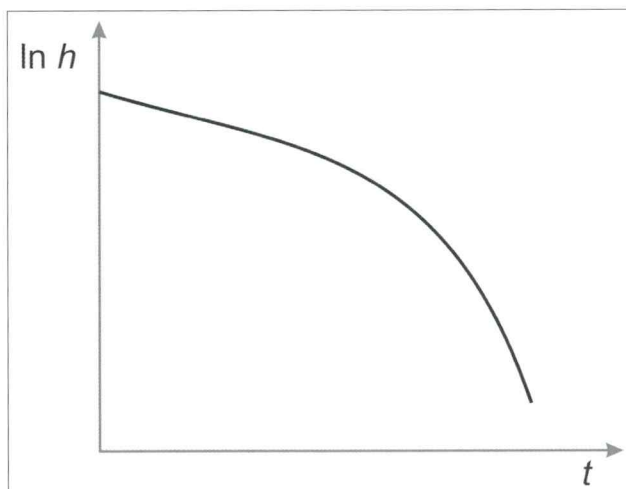
Poleg naštetih glavnih vzrokov do takšne oblike krivulje pride tudi takrat, ko smo z nalivanjem pričeli pred stabilizacijo in uravnoteženjem nivoja vode z okolico. Zaradi tega je končni, stabilizirani nivo po zaključku poizkusa višji od začetnega.

V vseh treh primerih izračun izvedemo le na začetnem delu krivulje, če pa je takšno obnašanje

krivulje opaženo že med izvajanjem poizkusa na terenu, je potrebno ustrezno ukrepati. Če je vzrok onesnažena, kalna voda, ki jo nalivamo v vrtino, je vodo potrebno zamenjati in vrtino ponovno očistiti, če pa je vzrok v naravi sedimenta, ki ga testiramo ali pa v spreminjanju nivoja in njegovega uravnoveženja z okolico, je poizkus potrebno večkrat ponoviti.

### Krivulja B

Na sliki 12 je prikazan primer, ko v začetnem delu zniževanje v testni objekt poteka v skladu s teoretičnim modelom po Hvorslevu (8), nato pa se koeficient prepustnosti prične navidezno povečevati. Do takšnih krivulj prihaja v zaključnem delu ponikalnega poizkusa. Najpogostejši vzrok za takšno obnašanje krivulje je način opazovanja zniževanja nivoja nalite vode. Začetni – eksponentni del krivulje je zabeležen v predelu, ko je bila nalita voda še znotraj vrtalnega drogova, nato pa je nivo vode padel v testirani odsek pod vrtalno drogovo, zaradi česar se je spremenila geometrija prečnega profila, v katerem opazujemo znižanje in narava odtoka vode iz vrtine v medij. Redko se takšna oblika krivulje znižanja pojavi takrat, kadar testiranje ponikalnih sposobnosti opravljamo v nezasičenem poroznem mediju.

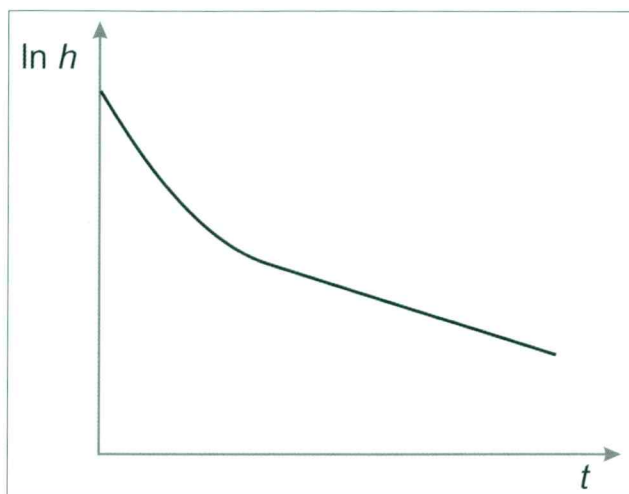


Sl. 12. Krivulja B – prepustnost se proti koncu poizkusa navidezno poveča

### Krivulja C

Na sliki 13 je prikazan primer, ko se med opazovanjem znižanja vode nalite v vrtino prepustnost med poizkusom s časom navidezno zmanjša. Iz krivulje izhaja, da imamo sprva navidez visoko prepustnost, nato pa ta prepustnost upade in se ustali, postane konstantna. Opisana krivulja je tipična krivulja znižanja za testirane objekte, ki se nahajajo v nezasičenem območju. Ta krivulja je po obliki zelo podobna nekaterim infiltracijskim krivuljam (npr. Hortonova infiltracijska krivulja).

V začetnem delu izvajanja poizkusa je prepustnost navidezno višja, ker voda pri svojem toku ne vzpostavlja zgolj toka, temveč tudi polni si-



Sl. 13. Krivulja C – prepusnost se proti koncu poizkusa navidezno zmanjša

cer prazne ali le deloma zasičene pore. Ko se delež zasičenih por zmanjša, se prične zmanjševati navidezni koeficient prepustnosti, dokler ne doseže končne vrednosti, kjer se krivulja približa eksponentni krivulji. Pri interpretaciji takšnih krivulj izvedemo izračun po Hvorslevu (8) na končnem delu krivulje. Takšno interpretacijo lahko po analogiji primerjamo s klasično interpretacijo črpalnih poizkusov, po kateri nas zanima tisti del črpalnega poizkusa, pri katerem je prišlo do stabilizacije, ustaljenih pogojev in pretoka. Pri obsežnejših nezasičenih območjih, kjer se nahajamo visoko nad gladino podzemne vode, se je potrebno zavedati, da je izračunani koeficient prepustnosti nekoliko nižji od koeficienta prepustnosti zasičenega območja (glej enačbo (23)).

Pridobljeno obliko krivulje pri dimenzioniranju ponikalnih objektov izkoristimo v celoti. Izhajamo iz ocenjenega koeficienta prepustnosti, poleg tega pa upoštevamo tudi dodatni volumen, ki je rezultat začetne hitre infiltracije.

V primeru, da je začetni del krivulje relativno kratek imamo lahko s tako oblikovano krivuljo opraviti tudi v primeru, ko smo v vrtalno drogovje nalivali vodo s pomočjo batne črpalke in sesalnega koša. V takšnem primeru je v vodi prisotnih veliko zračnih mehurjev. Zaradi tega je, dokler se voda ne odzrača in ne začne prodirati v testirani odsek, v začetnem delu poizkusa tlak vode navidezno višji. Če tako z zračnimi mehurčki nasičeno vodo nalivamo v dobro prepusten sediment ali razpokano kamnino, bo izračunani koeficient prepustnosti nekoliko pristranski, praviloma nižji od dejanskega.

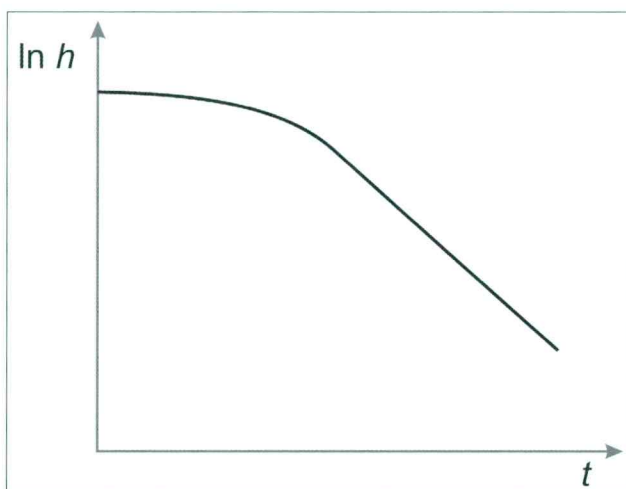
Podobno obliko krivulje dobimo tudi takrat, ko ponikalni poizkus v vrtini izvajamo s pomočjo pnevmatičnega tesnila (packerja) ali začasne cevovite (obložne kolone). Ti so napihnjani s pomočjo stisnjenega zraka, ki ustreza nekemu tlaku. Če v vrtalno drogovje nalijemo vodo do hidravlične višine  $h$ , ki je blizu tlaku v tesnilu ali pa celo višje, bo voda pričela prodirati navzgor ali navzdol pod tesnilom, tesnilo bo spustilo. Zaradi tega bo prepustnost na začetku poizkusa, ko imamo večje hidravlične višine, navidezno višja, kot kasneje,

ko bodo zaradi nižjega hidrostatičnega tlaka, tesnila ponovno prijela.

### Krivulja D

Oblika krivulje, podana na sliki 14, je praviloma rezultat neustrezno pripravljenega testnega odseka kar je najpogostejše, posledica vrtanja z izplačnim medijem in tvorba izplačnega kolača na stenah vrtine. Iz poteka krivulje vidimo, da je na začetku hitrost znižanja vode skoraj zanemarljiva, nato pa se počasi poveča in stabilizira.

Do navideznega povečanja prepustnosti pride zaradi luščenja izplačnega kolača s sten vrtine; če se ta med poizkusom odluči in pade na dno se prepustnost testiranega odseka poveča. Med vrtanjem se izplačni kolač ne tvori le na stenah vrtine, temveč izplaka prodira tudi v notranjost sedimenta ali kamnine. Zaradi tega lahko med izvajanjem poizkusa, zlasti pri višjih hidravličnih višinah  $h$ , na začetku poizkusa pride tudi do sprememb v izplačnem kolaču v neposredni okolici vrtine. Koeficienti prepustnosti, ki jih izračunamo iz takšnih podatkov, so pristranski in odražajo nižje prepustnosti od dejanskih.



Sl. 14. Krivulja D – prepusnost se s časom navidezno zmanjšuje

Podobno obliko krivulje dobimo tudi v primeru testiranja razpokanih kamnin, v katerih so razpoke zaglinjene ali zameljene. Zaradi relativno visoke hidravlične višine  $h$  na začetku poizkusa se razpoke postopoma izpirajo in prepustnost se navidezno poveča, ko višina nalite vode upade, se izpiranje razpok ustavi in prepustnost testiranega odseka se navidezno ustali.

### Sklep

Kvalitetna interpretacija in izračun ponikalnih poizkusov je odvisna od sposobnosti in izkušenosti interpretatorja – hidrogeologa ter od kakovosti terenskih podatkov, ki so rezultat meritev in natančnega zbiranja informacij o izvedenih sondažnih izkopih ali vrtinah. Pri tem je potrebno poudariti, da je vsak ponikalni poizkus samosvoj

in terja natančen premislek o tem, kako je bil poizkus izveden, kakor tudi o tem, kako lahko pridobljene rezultate interpretiramo, in nenazadnje, kakšne praktične posledice bodo imeli naši rezultati. Interpretatorjeva odgovornost je odvisna od narave objekta, za potrebe katerega se izvedejo poizkusi. Napačna interpretacija ponikalnih poizkusov privede do napačnega dimenzioniranja ponikalnih objektov, to pa lahko ima v skrajnem primeru za posledico ogrožanje varnosti stavb.

Prav tako velja opozoriti, da je namen v članku opisanih ponikalnih poizkusov testiranje ponikalnih sposobnosti tal – sedimentov in izjemoma kamnin. Ponikalni poizkusi ne morejo predstavljati nadomestila za črpalne poizkuse s katerimi bolj reprezentativno določamo koeficiente prepustnosti večjega dela vodonosnika. Ne smemo jih uporabiti kot osnovo za dimenzioniranje odvodnje gradbenih jam ali za ugotavljanje lastnosti vodonosnikov. Črpalni poizkusi so mnogo bolj zanesljivi kot ponikalni (nalivalni) poizkusi. Slednji lahko pri regionalnih raziskavah in zahtevnejših geotehničnih projektih predstavljajo le dopolnilo in komplementarno informacijo. V primeru, ko izvajamo hidrogeološke raziskave nad gladino podzemne vode, pa so ponikalni poizkusi edini poizkusi, s katerimi lahko ugotavljamo hidravlične lastnosti kamnin in sedimentov.

Praksa kaže, da pri ponikalnih poizkusih težimo le k oceni koeficienta prepustnosti, vse pre malo pa se zavedamo, da nam ti poizkusi omogočajo mnogo več. Pravilno izvedeno nalivanje, pri katerem posnemamo projektni hidrogram ponikanja, to je količino in dinamiko vode, ki jo bo objekt, za potrebe katerega izvajamo poizkus, ponikal, nam pove tudi kakšen mora biti volumen ponikalnega objekta in kako se bo ta objekt med odtokom padavin z vodo polnil in praznil. To pa so podatki, ki jih zgolj iz poznavanja koeficienta prepustnosti ne dobimo.

Ker so ponikalni objekti z gradbeno tehničnega vidika enostavni, in zaradi tega tudi poceni, se jim v vsakdanji praksi ne posveča dovolj pozornosti. To je razvidno že iz vpogleda v teorijo ponikalnih poizkusov in teoretičnih osnov za dimenzioniranje ponikalnih objektov, ki so daleč od tega, da bi bili konsistentni in ustrezni. Prav tako so z neustreznim ponikanjem povezani številni praktični problemi, ki jih opazimo šele čez čas, ko so stavbe že nekaj časa v svoji funkciji. Najpogostejši problem je zamakanje temeljev stavbe in vdiranje vode v kletne prostore. Prav tako ni malo primerov, ko zaradi napačno izvedenega ponikanja pride do posevkov ali celo do sprožitve pobočnih nestabilnosti. Pri tem velja omeniti tudi zmanjšanje ponikovalne sposobnosti, ki se zaradi procesov kolmatacije s časom pojavi skoraj pri vsaki ponikalnici. Vse naštetu terja od hidrogeologov, da se

v prihodnje problematiki ponikanja padavinskih voda temeljiteje posvetijo, tako s teoretičnega vidika, kot tudi s stališča razvoja praktičnih metod. Dodatno spodbudo tem naporom lahko predstavlja tudi sodobna zakonodaja s področja zaščite voda, ki zahteva ohranjanje kemijskega in količinskega stanja podzemne vode.

### Zahvala

Članek je rezultat večletnega dela na problematiki ponikanja, pri katerem je avtor sodeloval s tehnično ekipo Oddelka za hidrogeologijo Geološkega zavoda Slovenije. Kolegom Zmagu Boletu, Tomislavu Matozu, Jožetu Heriču in Marku Hötzlu gre zahvala za marsikatero idejo, za kritičen pregled članka in diskusijo, predvsem pa zahvala za sodelovanje pri izvedbi številnih poizkusov na terenu. Hvala tudi Marjanu Grmu za pomoč pri risanju skic. Zahvala gre tudi Jožetu Janežu in Jožetu Rateju, recenzentoma, ki sta znatno prispevala k izboljšanju članka.

Članek je nastal v okviru dejavnosti programske skupine P1-0020 »Podzemne vode in geokemija«, ki deluje na Geološkem zavodu Slovenije in jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS.

### Priporočeno branje

Zainteresirani bralec se lahko o ponikalnih poizkusih pouči podrobneje tudi v specializirani literaturi. Za nadaljnji študij priporočam zlasti spodaj navedeno literaturo. V teh knjigah je podrobneje obdelana teorija, poizkusi pa so umeščeni v širši kontekst toka vode v poroznem mediju. V večini citiranih knjig je problematika ponikalnih poizkusov deloma obdelana v poglavju o impulznih poizkusih – slug testih, katerih metodologijo lahko uporabimo tudi pri ponikalnih poizkusih, Butlerjeva knjiga jim je posvečena v celoti. Seveda pa je veliko člankov o tej problematiki raztresenih tudi po znanstveni periodiki.

- BATU, V. 1998: *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*, John & Wiley & Sons, New York: 727 p.
- BUTLER, J.J. 1998: *The Design, Performance and Analysis of Slug Test*. Lewis Publishers, Boca Raton: 252 p.
- CEDERGREN, H, R. 1989: *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. John & Wiley & Sons, New York: 465 p.
- KRUSEMAN, G.P. & DE RIDDER, N.A. 1990: *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen: 377 p. (dostopno tudi na [http://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/Kruseman\\_and\\_De\\_Ridder\\_2000.pdf](http://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/Kruseman_and_De_Ridder_2000.pdf))

**Simboli in oznake**

|               |                                                                  |
|---------------|------------------------------------------------------------------|
| $a$           | širina izkopa [m]                                                |
| $A$           | površina [m <sup>2</sup> ]                                       |
| $A_{drog}$    | površina prečnega preseka vrtalnega drogovja [m <sup>2</sup> ]   |
| $b$           | dolžina izkopa [m]                                               |
| $B$           | debelina vodonosne strukture [m]                                 |
| $c$           | konstanta                                                        |
| $d_{drog}$    | notranji premer vrtalnega drogovja [m]                           |
| $D$           | premer testiranega odseka [m]                                    |
| $F$           | faktor oblike [m]                                                |
| $h, h_1, h_2$ | višina nalite vode; hidravlična višina; piezometrična višina [m] |
| $h_{sred}$    | ocena srednje višine v vrtino nalite vode [m]                    |
| $h_{max}$     | maksimalna višina nalite vode [m]                                |
| $dh/dr$       | hidravlični gradient                                             |
| $dh/dt$       | hitrost zniževanja v vrtino nalite vode [m/s]                    |
| $\Delta h$    | znižanje [m]                                                     |
| $K$           | koeficient prepustnosti (splošna oznaka) [m/s]                   |
| $K_{sat}$     | koeficient prepustnosti nasičenega poroznega medija [m/s]        |
| $L$           | dolžina testiranega odseka [m]                                   |
| $q_{spec}$    | specifična ponikalnost [m/s]                                     |
| $Q$           | volumski pretok [m <sup>3</sup> /s]                              |
| $Q_{drog}$    | volumski pretok skozi vrtalno drogovje [m <sup>3</sup> /s]       |
| $Q_{odsek}$   | volumski pretok skozi testirani odsek [m <sup>3</sup> /s]        |
| $Q_{pov}$     | povprečni pretok ponikanja [m <sup>3</sup> /s]                   |
| $R$           | radij vpliva vrtine [m]                                          |
| $r$           | polmer [m]                                                       |
| $r_{test}$    | radij testiranega odseka vrtine [m]                              |
| $t, t_1, t_2$ | čas [sek]                                                        |
| $\Delta t$    | razlika časa [sek]                                               |
| $V_{cel}$     | celotni volumen ponikle vode [m <sup>3</sup> ]                   |
| $z$           | absolutna kota v vrtalno drogovje nalite vode [m]                |
| $z_0$         | absolutna kota začetne gladine podzemne vode [m]                 |