

UDK 627.8.034:552.512:551.791(282.243.743)(497.12)=863

Hidrogeološki pogoji za gradnjo elektrarne Mavčiče

Hydrogeologic conditions of the Mavčiče dam site

Ljubo Žlebnik

Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Kratka vsebina

Na Kranjsko-sorškem polju si je Sava vrezala svojo strugo trideset metrov globoko. Med Mavčičami in Kranjem je tako nastala prava soteska s strmimi stenami iz pleistocenskega konglomerata, morfološko ugodna za gradnjo vodne elektrarne pretočnega tipa. Za pregrado je bil izbran presek Mavčiče—Moše. Raziskovalne vrtine v profilu pregrade in akumulacijskega jezera so opozorile na poroznost konglomerata in prod. Zato so bile porozne plasti poskusno zatesnjene do take stopnje, da se je njihova vodoprepustnost izenačila s prepustnostjo oligocenskega meljevca v podlagi pleistocenskih zasipov.

Abstract

The Sava valley is cut thirty metres deep in the Kranj—Sora field. A true canyon is confined between rather steep walls built of Pleistocene conglomerate and gravel from the Mavčiče village to the town of Kranj. Thus natural conditions have come into existence being favourable for construction of a run of the river plant. An artificial barrier will be constructed across the Sava river at Mavčiče for a power plant. Many exploratory boreholes have been drilled for subsurface reconnaissance of the dam site and the artificial lake. They call attention to the porosity of the Pleistocene conglomerate and gravel. Therefore, a test grouting has been undertaken in the Mavčiče section to reach such watertightness of the foundation rock of the dam as has been measured in the underlying oligocene sandstone.

Uvod

Načrtovana hidroelektrarna Mavčiče na Savi je pretočna s padcem približno 20 m in sorazmerno majhnim akumulacijskim jezerom. Za jez in strojnico je bil izbran presek med vasjo Mavčiče na desnem bregu in Mošami na levem bregu Save (sl. 1). Akumulacijsko jezero bo zalilo ozko sotesko Save med Mavčičami in Kranjem in bo segalo malo nad cestni most čez Savo pri tovarni Planika v Kranju (sl. 2). Nekoliko se bo razširilo pod Trbojami in Žerjavko.

Geološki opis območja hidroelektrarne

Soteska Save, kjer bo zgrajena hidroelektrarna, je globoka okrog 30 m in je vrezana v kvartarni konglomerat in prod Kranjsko-sorškega polja. Na površju polja leži povečini prod mlajšepleistocenskega zasipa. Iz prodne ravnine se dvigajo starejše pleistocenske nizke valovite terase, prekrите z nekaj metrov debelo plastjo gline s prodniki: Velika Dobrava severno od Godešiča, Smrekova Dobrava med Gorenjo vasjo in Godešičem, Žejski hrib med Jeprco in Podrečo ter Plana gmajna vzhodno od Trboj in Dragočajne.

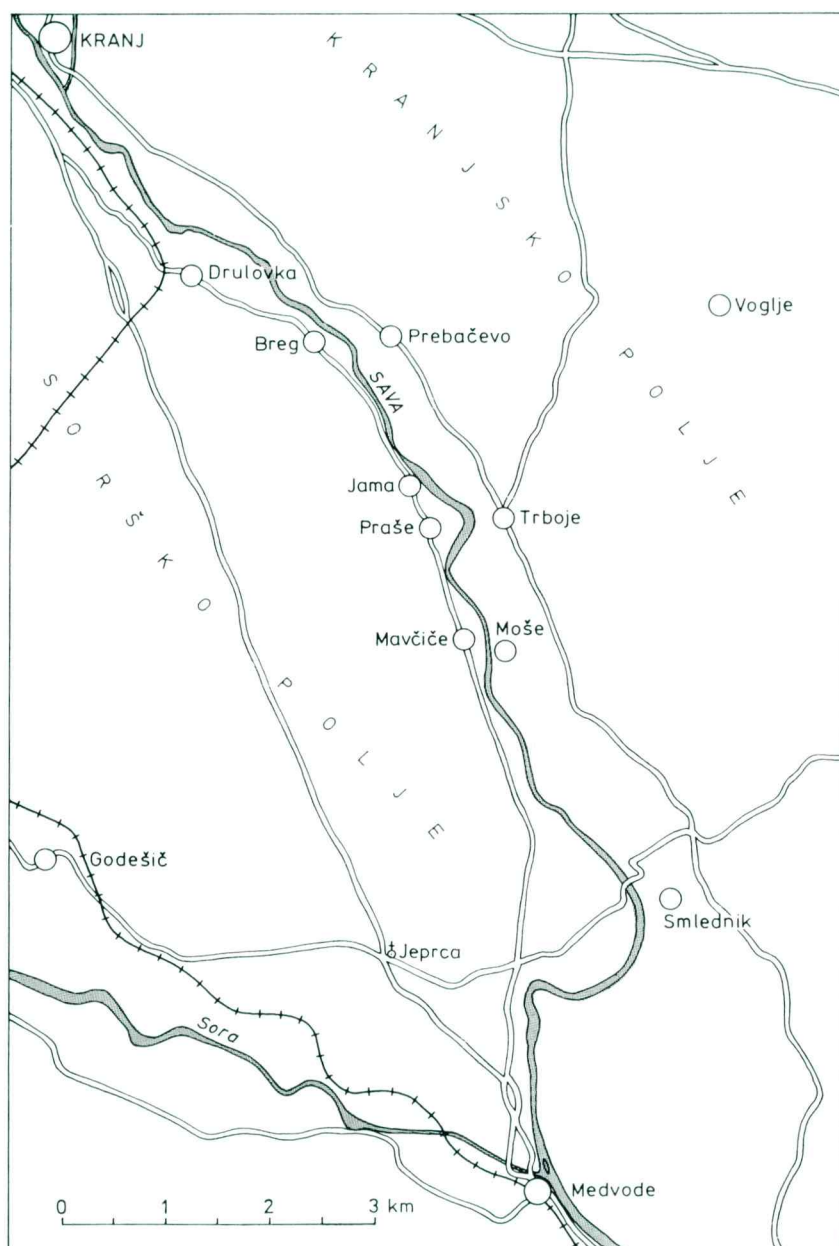
Pod prodom ravnega dela polja sledi serija srednje in staropleistocenskih konglomeratnih in prodnih plasti, ki so delno razkrite v soteski Save. Prodni pokrov povečini ne presega 10 m, le v ozkem pasu med Drulovko, Jeprco in Senico, kjer poteka po sredini Sorškega polja stara zasuta savska struga, je prodni zasip debel 35 do 45 m. Dno stare struge po dosedanjih podatkih ni globlje od dna današnje savske soteske.

Srednje in staropleistocenska serija plasti, ki leži pod mlajšepleistocenskim (würmskim) prodnim zasipom, je zelo heterogena, ker naplavine Save in Kokre niso bile odložene kontinuirano, ampak verjetno v treh ciklih, ki se ujemajo s poledenitvenimi dobami, gūnško, mindelsko in riško. Najstarejše, gūnške naplavine leže spodaj, riške pa zgoraj neposredno pod prodnim pokrovom Kranjsko-sorškega polja. Na površju so riške plasti razkrite v soteski Save.

V zaporednih ledenih dobah sta Sava in Kokra nanašali ob poletnih visokih vodah velike količine proda iz čelnih moren ledenikov v Alpah in ga nalagali eden na drugega. Rečna gladina, pa tudi gladina podtalne vode v prodnih naplavinah, je bila plitvo pod tedanjim površjem. V medledenih dobah sta se Sava in Kokra globoko zarezali v lastne naplavine. Vzporedno z znižanjem rečne gladine se je znižala tudi gladina podtalne vode v prodnih naplavinah, s tem pa so se začeli procesi sprijemanja prodnih naplavin. V ledenih dobah, ko sta reki zasuli svoji strugi do vrha in nato odložili novo plast proda, se je gladina podtalne vode dvignila in začela izpirati in raztapljati delno sprijet prvotno odložen prod. Ta je postajal vse bolj porozen, kajti poleg prvotne medzrnske poroznosti je nastala sekundarna poroznost z večjimi prazninami, ki so ostale za raztopljenimi prodniki.

Najmočnejše se je sprijela spodnja konglomeratna plast, ki jo štejemo v gūnško ledeno dobo. Njena sekundarna poroznost je velika, ker je bila podvržena dvem do trem zaporednim ciklom sprijemanja in izpiranja. Više ležeče plasti je prizadelo manjše število ciklov, zato so v glavnem manj trdno sprijete, delno celo nesprijete, pa tudi velikih por je manj. To potrjujejo novejše vrtine v Mavčičah in geološko kartiranje staropleistocenskih teras severozahodno od Kranja. Najstarejše, gūnške terase so povsem sprijete, medtem ko so mlajše sprijete le v vrhnjem delu. V splošnem velja, da so bolj trdno sprijete starejše prodne naplavine Save, ki vsebujejo manj melja in so zato bolj prepustne v navpični smeri. Starejše Kokrine prodne naplavine vsebujejo več melja, pa tudi številne vložke in plasti gline. Zato je njihova manjša prepustnost v navpični smeri močno zavrla proces sprijemanja proda, ki je napredoval od zgoraj navzdol, vendar samo do gladine podtalne vode.

Izpiranje in raztapljanje konglomerata s pretakanjem podtalne vode skozenj v ledenih dobah izenačujemo z zakrasevanjem na našem Krasu. Na ta način



Sl. 1. Položajna karta območja Mavčiče—Moše

Fig. 1. Location map of the Mavčiče—Moše area

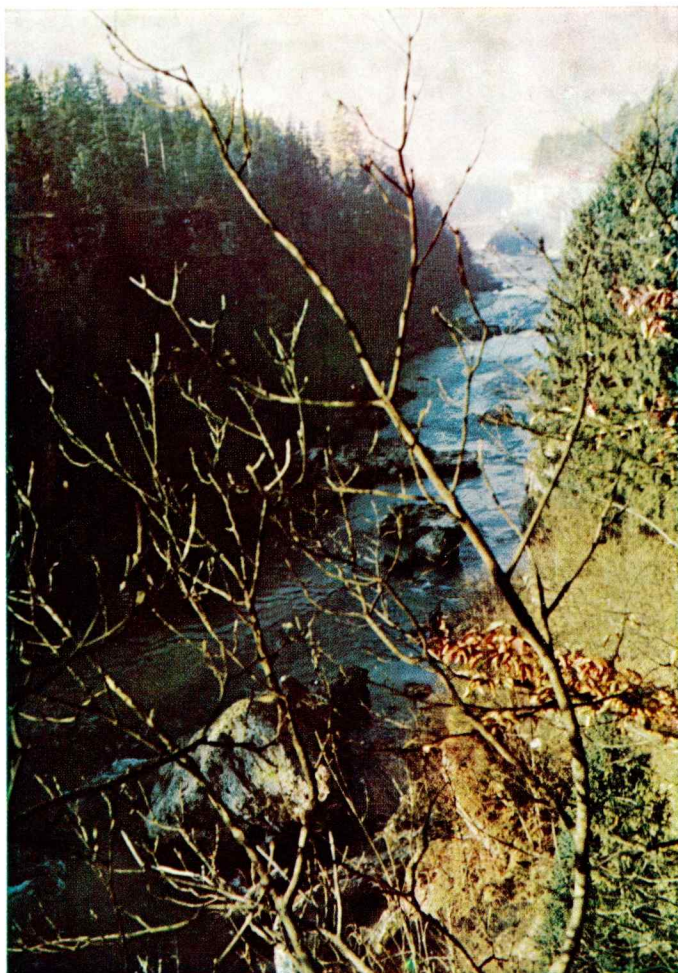
je postal konglomerat, katerega prvotna medzrnska poroznost se je zaradi cementacije zmanjšala, zopet močno porozen. Vendar je ta sekundarna poroznost drugačna, prevladujejo namreč velike pore premera nekaj centimetrov, razen tega se poroznost v navpični smeri izredno močno spreminja.

Podlaga pleistocenskega konglomerata in proda sestoji iz terciarne peščene gline in peščenjaka. Terciarna podlaga leži v osrednjem delu Kranjsko-sorškega polja 80 do 120 m globoko pod površjem, na južnem in jugovzhodnem robu Sorškega polja ter severno od Vodic pa se pokaže na površju. V osrednjem delu polja med Drulovko in Voklim je podlaga na višini okrog 260 m. Golice terciarnih plasti so na južnem in jugovzhodnem robu Sorškega polja na višini 313 do 345 m, na Kranjskem polju pa severno od Vodic na višini 350 m. V Mavčičah je terciarna podlaga na višini 297 do 302 m.

Na območju pregrade je bilo izvrtanih 12 vrtin leta 1952 in v letih 1979-80 še 20, od teh sedem v strugi Save. Vrtine in zaseke na obeh bregovih ter v strugi Save kažejo, da sestoji celotno območje iz pleistocenskih plasti zbitega peščenega meljnega proda, trdno in slabo sprijetega konglomerata ter peščenega proda z vložki konglomerata. V strugi Save prekriva te plasti 2,5 do 3,0 m debela plast najmlajšega recentnega peščenega proda.

Podlaga pleistocenskega zaporedja plasti sestoji iz oligocenskega peščenega meljevca. Rahlo valovito površje podlage leži na višini 297,5 do 302,0 m. Po tem sklepamo, da je pleistocensko zaporedje plasti debelo v strugi Save 26 do 27 metrov, na njem pa leži 2,5 do 3,0 metre debela plast recentnega peščenega proda. Na levem bregu je ta serija debela okrog 60 m, na desnem bregu na vmesni terasi pa 48,5 metrov po podatkih vrtine V-1. Plasti proda in konglomerata ne kažejo posebne pravilnosti v prostorski razporeditvi, ampak se le-často izklinjajo in prehajajo ena v drugo. Izjemo predstavlja plast dobro sprijetega konglomerata neposredno na terciarni podlagi, ki so jo našli v vseh vrtinah, razen V-20 na levem bregu, kjer se ta plast razcepi na več tanjših konglomeratnih plasti. V vrtini V-18 pa je bila pod plastjo konglomerata okrog dva metra debela plast peska s prodom. V profilih vrtin je ta plast konglomerata debela 5 do 15 m; v strugi Save nastopa na višini 307 do 313 m, na bregovih pa na višini 305 do 310,7 m.

Bazalna konglomeratna plast je bila odložena približno pred 500 000 leti v günški poledenitveni dobi, ko je Sava prinašala in odlagala velike količine proda iz čelnih moren v Radovljiški kotlini. V günško-mindelski medledeni dobi se je večina proda, prinesenega z Alp, odložila v ledeniških jezerih za čelnimi morenami. Zato ga Sava ni več nanašala, ampak je začela poglobljati strugo in je na koncu medledene dobe prerezala vse svoje naplavine. Vzporodno s tem se je vrodu znižala gladina podtalne vode, kar je omogočilo postopno sprijemanje proda v konglomerat. V mindelski ledeni dobi je Sava najprej zasula svojo strugo, vrezano v delno sprijet prod, nato pa ga je prekrila z novo plastjo proda. Gladina podtalne vode se je zaradi močnega dviga gladine Save močno zvišala in preplavila plast delno sprijetega günškega proda in plast nesprjetega mindelskega proda. V plasti günškega sprijetega proda je pretakajoča se podtalna voda začela izpirati in raztapljati drobnejše delce peska ter apnene prodnike in karbonatno vezivo. Nastajale so manjše in večje odprte pore, neenakomerno razporejene v vsej masi delno sprijetega proda.



Sl. 2. Soteska Save, vrezana v Kranjsko-sorško polje
 Fig. 2. View of the Sava canyon cut in the Kranj—Sora field



Sl. 3. Jedro poroznega konglomerata iz vrtine V-1
 Fig. 3. Core sample of porous conglomerate from the borehole V-1

V mindelsko-riški medleden dobi sta se ponovno sprijemala oba zasipa, ker se je znižala gladina Save in z njo vred podtalna voda. V riški poledenitveni dobi pa so se izpirali in raztapljali prodniki, pesek in karbonatno vezivo v dokaj dobro sprijetem gūnškem konglomeratu, delno sprijetem mindelskemrodu in v najmlajšem, riškem nesprijetemrodu.

Oba procesa, sprijemanje in raztapljanje, sta se nadaljevala v riško-würmski medleden dobi in v würmski ledeni dobi. V medleden dobi je Sava prerezala le debelo plast riškega roda in se nekoliko vrezala v delno sprijet mindelski prod. Vzporodno s tem se je znižala gladina podtalne vode le do višine stika mindelskega in riškega roda, gūnški konglomerat pa je bil ves preplavljen. Zato se je sprijel le riški prod in delno mindelski konglomerat, medtem ko je bil gūnški konglomerat podvržen izpiranju. V würmski ledeni dobi na območju Mavčič Sava ni odložila roda, ker je takrat tekla po osrednjem delu Sorškega polja. Na debelo pa ga je odložila v svoji globoko vrezani stari strugi in drugod na Sorškem polju. Ker se je dvignila gladina podtalne vode, se je nadaljevalo izpiranje in raztapljanje apnenega veziva in prodnikov v konglomeratu. V holocenu si je Sava zarezala globoko strugo v riški konglomeratni zasip v sedanjih soteski. Najbolj in najdlje je bil torej izpiranju in raztapljanju izpostavljen gūnški konglomerat in delno mindelski, ki imata zato tudi največji odstotek velikih por, oziroma manjših cevi. Po pregledu zbruskov se odstotek večjih por in cevi v konglomeratu, velikih do 2 cm, ceni na 5 do 10 % (sl. 3).

Poleg večjih por in cevi obstajajo tudi manjše s premerom nekaj mm; zato je skupna poroznost znatno večja. V holocenski dobi, tj. v zadnjih 10 000 letih, si je Sava vrezala svojo strugo do 30 m globoko. Zato se je znižala gladina podtalne vode in nadaljevalo se je sprijemanje delno sprijetega riškega roda, ki sestavlja oba bregova Save v Mavčičah. Sprijemanje je napredovalo od površja proti notranjosti. Zato smo našli konglomerat v obeh razkopih na bregovih, v vrtinah, nekoliko odmaknjenih od bregov pa le zbit prod z vložki konglomerata.

Poroznost konglomeratnih plasti se v navpični smeri močno spreminja; v posameznih plasteh je znatno večja od 10 %, v drugih pa celo manjša od 5 %. Iz tega sledi, da se v navpični smeri menjavajo plasti dobro sprijetega konglomerata z majhno poroznostjo in plasti zelo poroznega konglomerata. Na spremembe poroznosti v navpični smeri kaže tudi prostorninska teža konglomerata, ki ima vrednost 2,0 za zelo porozen konglomerat do 2,6 za zelo dobro vezani konglomerat. Peščenoprodni vložki v konglomeratu so močno zbiti. Na to kažejo poskusi standardne penetracije. Najmanjše število udarcev, potrebnih za zabijanje konice 30 cm globoko v dno vrtine, je bilo 32, povečini pa 48 do 174. Poskusi v slabo vezanem konglomeratu niso uspeli. Terciarni meljevec v podlagi je izredno močno zbit, zato ni uspel niti eden od poskusov standardne penetracije. Napredek penetracijske konice po 60 udarcih je bil najmanj 2 in največ 13 cm.

Po projektu bodo pretočna polja v savski strugi temeljena na koti 317 m, strojnica na desnem bregu pa na koti 310,5 m. Po podatkih vrtin sodeč bo strojnica temeljena na trdo sprijetem konglomeratu. Temelji pretočnih polj bodo na heterogenih tleh, sestavljenih iz zbitega peščenega roda z vložki konglomerata, ter trdno in rahlo sprijetega konglomerata.

Akumulacijsko jezero. Dolina Save se med Žerjavko in Prebačevim ter Hrastjem in Drulovko zoži v kanjon, širok 30 do 50 m z navpičnimi in previsnimi konglomeratnimi stenami, visokimi 30 m. Le pri Trbojah, na Prebačevem in nad Drulovko se dolina razširi na 300 do 400 m. Tod sta razviti pod visokima terasama Kranjsko-sorškega polja še ena do dve nižji prodni terasi.

Navpične in previsne konglomeratne stene sestavljajo ponekod le zgornji del bregov; v kanjonskih delih doline pa segajo povečini prav do reke. Tam, kjer tvorijo konglomeratne stene le zgornji del bregov, prekrivajo nižje dele bregov grušč z rjavim peščenim meljem in bloki odlomljenega konglomerata. Plast grušča ni posebno debela, doseže največ nekaj metrov. V kanjonskih delih doline, tj. pod vasema Jama in Hrastje, segajo navpične in previsne konglomeratne stene povečini do reke. Ponekod pa stene ne dosežejo same reke, ampak je njihovo vznožje prekrito z debelim gruščem in bloki konglomerata. Previsi in spodmoli v konglomeratu so v različnih višinah nad Savo, povečini 2 do 15 m nad gladino Save. Nastali so zaradi neenakomerno sprijetega konglomerata. Sava je namreč pri zarezovanju svoje struge v holocenu, tj. v zadnjih 10 000 letih, ob visokih vodah odnašala manj sprijet konglomerat in prod, medtem ko je trdno sprijet konglomerat ostal. Nastali so spodmoli, ki so globoki nekaj metrov do 10 m.

Hkrati z nastajanjem spodmolov so se podirali deli konglomeratnih sten, ki so postali nestabilni. Zato so se v kanjonu odlomili bloki konglomerata, veliki celo nekaj 100 m³. Verjetno so se previsne stene rušile predvsem ob močnejših potresih in ko je Sava tako hitro zarezovala svojo strugo, da na vznožju sten niso mogla nastati položnejša pobočja, prekrita z gruščem, ki bi varovala navpične stene pred erozijo. Obdobja intenzivnega vrezovanja se časovno ujemajo z močnejšim neotektonskim dviganjem in s pogostnejšimi močnejšimi potresi. V normalnih pogojih konglomeratne stene tudi nad spodmoli niso razpokane. Sele pri močnih premikih tal, ki nastanejo ob potresih, take stene razpokajo in se nato odlučijo, podobno kot betonske konzolne zgradbe. Enak učinek ima verjetno tudi izredno globoko zarezovanje reke v previsne konglomeratne stene, ko teža konzolnega konglomeratnega bloka preseže njegovo strižno odpornost. Na podlagi geološkega kartiranja sklepamo, da v zadnjih desetletjih ni bilo večjih svežih odlomov konglomerata. V tem času ni bilo močnejših potresov in poleg tega Sava počasneje vrezuje svojo strugo zaradi zaježitve v Medvodah.

Nekateri previsni deli konglomeratnih bregov so na meji stabilnosti in lahko vsak umeten poseg povzroči njihovo rušenje. Pri terenskem pregledu smo opazili, da so razpokane vse starejše hiše v Mošah, postavljene na rob konglomeratne stene. Prav tako so razpokane starejše hiše na robu konglomeratnih sten v Trbojah ter na desnem bregu v Prašah in na Jami. Kaj je vzrok razpokanosti, se ne dá ugotoviti brez podrobnega pregleda vsake zgradbe posebej. Možni vzroki so bodisi neustrezni in slabi temelji, premiki bregov, ali pa so razpoke povzročili potresi v preteklosti. Za registriranje eventualnih premikov bregov smo postavili reperne točke in jih geodetsko umerili, in sicer tri v Mošah, dve v Trbojah, eno v Prebačevem ter na desnem bregu po eno v Prašah in na Jami na mestih, kjer se cesta povsem približa previsnemu konglomeratnemu robu.

Po zaježitvi Save in dvigu gladine v strugi bodo ogroženi predvsem tisti deli bregov, kjer bo segla gladina v spodmole in previsne dele konglomeratnih sten. Nihanje vodne gladine v višini spodmolov bo lahko povzročilo izpiranje slabo sprijetega konglomerata in poglabljanje spodmolov. To pa bo ogrozilo stabilnost konglomeratnih sten nad njimi in povzročilo njihovo rušenje. Za pravilno oceno ogroženosti posameznih zgradb in delov ceste Mavčiče—Drulovka bo treba na najbolj ogroženih mestih dovolj na gsto geodetsko posneti profile in označiti višino zaježitve. Slediti bi moralo ponovno geološko in geomehansko kartiranje, da bi na tej podlagi določili nevarna mesta in ustrezno ukrepali za zavarovanje bregov.

Ogroženi bodo tudi deli previsnih konglomeratnih bregov v kanjonskem delu savske doline na Jami in v Hrastju. Ti bregovi so povečini nenaseljeni in zgradbe ne bodo neposredno ogrožene. Pač pa potekata stezi na obeh bregovih tik ob robu kanjona. Koliko sta tod ogrožena bregova, po geološkem kartiranju ni mogoče zanesljivo presoditi iz enakih vzrokov kot za ogrožene zgradbe. Na karti namreč ni mogoče razbrati, če se previsi in spodmoli nahajajo na predvideni višini nihanja vodne gladine akumulacijskega jezera, ali pa so nad njo. Klasično geodetsko snemanje profilov tod skoraj ne bo možno; zato bo treba z modernejšimi geodetskimi metodami določiti, na kateri višini se nahajajo spodmoli. Na ta način bo možno označiti vsa nevarna mesta in ustrezno ukrepati za zavarovanje. Najbolj primerno bi bilo, na takih mestih postaviti ograjo in s tem preprečiti dostop na bregova. Upoštevati je treba tudi možnost, da se predvsem v kanjonskem delu doline odlomijo konglomeratni bloki večje razsežnosti, ki bi lahko povzročili vodni val v jezeru in prelivanje vode prek pregrade. Ta možnost je sicer zelo majhna, ni pa izključena v primeru močnega potresa. Po geološki karti sklepamo, da se v takem primeru lahko odlomijo konglomeratne stene na dolžini največ 150 m in v globino 5 m. Višina odlomljene konglomeratne stene bi bila največ 20 m. Prostornina odlomljenih blokov bi bila torej okrog 7500 m³, kar je premalo, da bi povzročilo prelitje prek pregrade.

Hidrogeološki opis območja hidroelektrarne

Akumulacijsko jezero hidroelektrarne Mavčiče leži na Kranjsko-sorškem polju v soteski Save, ki deli polje na dva dela, na Kranjsko in Sorško polje. Po geološki zgradbi je polje enotna udorina, zapolnjena do 100 m na debelo s pleistocenskim prodom in konglomeratom. V njih nahajamo podtalno vodo, katere gladina se na Sorškem polju približno ujema z gladino Save. Podtalna voda se namreč v precejšnji meri napaja iz Save. Na Kranjskem polju se gladina podtalne vode dviga od levega brega Save proti severu, kar kaže da se napaja iz padavin, iz Kokre in dotoka z obrobja Savinjskih Alp.

Podatki podrobnih hidrogeoloških raziskav na Sorškem in Kranjskem polju v letih 1963—1978 kažejo, da se podtalna voda s Kranjskega polja izliva v Savo. Po doslej še nepreverjenih podatkih se delno pretaka iz Kranjskega polja na Sorško polje, in sicer med Čirčami in Žerjavko na Kranjskem, oziroma Drulovko in Prašami na Sorškem polju.

Na Sorškem polju se napaja podtalna voda po podatkih novejših raziskav v letu 1975 vsaj 60 % iz Save, oziroma s prelivanjem podtalne vode s Kranjskega na Sorško polje, ostali del pa prispevajo padavine.

Pretakanje podtalne vode s Kranjskega na Sorško polje smo ocenili po Darcyjevi enačbi

$$Q = L \cdot k \cdot i \cdot h = 4000 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 70 = 0,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

L = dolžina odseka, kjer se voda pretaka (4000 m)

i = hidravlični strmec gladine ($2,5 \cdot 10^{-3}$)

k = poprečna vrednost koeficienta prepustnosti v bližini Save ($5 \cdot 10^{-4}$ m/s)

h = debelina vodonosne plasti na bregovih Save (70 m)

Pretakanje vode pod strugo Save je zelo verjetno, vendar doslej še ni dokazano.

Sorško polje je udorina in predstavlja južni podaljšek udorine Kranjskega polja. Podlaga udorine sestoji iz neprepustne terciarne gline, ki leži najgloblje pri Drulovki, in sicer na višini 256,8 m. Proti jugu se podlaga dviga in je na Meji, tj. v osrednjem delu polja, na višini 270 m, v vrtini S-16 na višini 291 m, v Mavčičah na višini 300 m in na Jeprci na višini 310 m. Na južnem robu polja prihaja ob Sori podlaga na več krajih na površje na višini 313 do 345 m.

Udorina je v glavnem zapolnjena s poroznim konglomeratom in delno s prodom. Tok podtalne vode je v konglomeratu in produ usmerjen od severa proti jugu, proti izvirov v Goričanah, Retečah in Gorenji vasi.

Strmec gladine podtalnice je zelo velik na infiltracijskem območju na severnem robu polja med Drulovko in Jamo. Največji je pri Drulovki, in sicer 2,5 ‰ pri nizkem in pri višjem vodostaju. Med Drulovko in Jamo je pri nizkem vodostaju strmec manjši, 1,8 ‰, pri višjem pa poprečno 2 ‰.

V osrednjem delu polja med Mejo, Retečami in Mavčičami je strmec gladine pri nizkem vodostaju podtalnice majhen, poprečno le 0,75 ‰, in pri višjem vodostaju 0,9 ‰. Proti izvirov pod Godešičem in Retečami ter Senico in Ladjo se strmec močno poveča in je skoraj enak pri nizkem in višjem vodostaju; poprečno znaša 7,7 do 8,8 ‰.

Vzrok majhnega strmcu gladine podtalnice v osrednjem delu polja je kotanjasta podlaga polja in zajezev Save v Medvodah. V osrednjem in južnem delu Sorškega polja se je gladina podtalnice dvignila po medvoški zaježitvi za dva do tri metre.

Vodonosna plast sestoji na Sorškem polju večidel iz konglomerata in zbitega peščenega proda. Konglomerat je delno močno porozen, delno pa dobro sprijet; zato je razlika v poroznosti konglomerata v navpični smeri dokaj velika.

Plasti manj prepustnega dobro sprijetega konglomerata in močno prepustnega poroznega konglomerata se v vodoravni smeri lečasto izklinjajo in prehajajo ena v drugo. Leče so razpotegnjene v vodoravni smeri in dosežejo dolžino nekaj 10 m do 100 m in več, medtem ko so debele 0,5 m do nekaj metrov. Poroznost konglomerata se dobro odraža v vrednosti prostorninske teže, ki znaša 2,00 do 2,14 za zelo porozen konglomerat v Mavčičah in 2,3 do 2,6 za kompaktnega. Če privzamemo, da je poroznost konglomerata s prostorninsko težo 2,6 nič ali blizu tega, tedaj je poroznost konglomerata s prostorninsko težo 2,0 približno 23 %.

Zelo prepusten je zbiti peščen prod v debelejših in tanjših plasteh in lečah med konglomeratom. Razsežnost teh plasti in leč je v vodoravni smeri nekaj 10 m do 100 m in več. Posebno dobro je prepusten peščen prod vodonosne plasti na južnem robu polja, južno od Jeprce.

Prepustnost in efektivna poroznost vodonosnih konglomeratnih in prodnih plasti sta bili določeni s poskusnimi črpanji v črpalnih vrtinah in vodnjakih na Sorškem polju v letih 1974-75. Dodatni podatki o prepustnosti teh plasti so bili zbrani z nalivalnimi in črpalnimi poskusi v vrtinah v Mavčičah v letih 1979-80. Črpalni poskus v novem vodnjaku Iskre pod vasjo Orehek pri Kranju je pokazal, da je vrednost koeficienta prepustnosti $k = 2,72 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Na območju vrtine SOV-51 pri Godešiču je vrednost koeficienta prepustnosti $k = 5,55 \cdot 10^{-3}$ do $7,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, na območju vrtine SOV-53 na osrednjem delu Sorškega polja pa $1,1 \cdot 10^{-2}$ do $2,2 \cdot 10^{-2}$ m/s. Efektivna poroznost vodonosne plasti, izračunana iz podatkov poskusnega črpanja, znaša na območju vrtine SOV-51 v Godešiču 13,2 %. Skoraj enako vrednost efektivne poroznosti (13,6 %) smo dobili iz podatkov naraščanja in upadanja gladine Save in obrežnih piezometrov v Drulovki (S-36) in na Bregu (S-35). Nalivalni poskusi v vrtinah V-1, V-2, V-3, V-17, V-18 in V-20 v Mavčičah so dali precej nižje vrednosti koeficienta prepustnosti, od $1,39 \cdot 10^{-3}$ do $5,47 \cdot 10^{-3}$ m/s. Samo v enem primeru je bila v vrtini V-1 določena vrednost $7 \cdot 10^{-2}$ m/s, ki jo pripisujemo veliki poroznosti in kavernozi konglomerata v merjenem odseku. Vrednosti koeficienta prepustnosti k smo računali iz podatkov nalivanja po Lefrancovi enačbi za nalivalni poskus s stalno gladino.

V vrtini V-14 v strugi Save je bil med vrtanjem izveden kratek črpalni poskus; voda je sama iztekala iz vrtine, in sicer iz poroznega konglomerata v globini 17,0 do 19,5 m. Z znižanjem gladine od 328,9 m na 328,3 m je iztekalo iz vrtine premera 116 mm 5,5 l/s vode. Vrednost koeficienta prepustnosti k , izračunamo po enostavni enačbi Logana:

$$k = \frac{1,22 \cdot Q}{s \cdot m} = \frac{1,22 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 2,5} = 4,47 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

m = debelina vodonosne plasti (2,5 m)

s = znižanje vodne gladine

Na obeh bokih predvidene pregrade sta bili v Mavčičah in Mošah izvrtani tudi črpalni vrtini premera 250 mm VČ-17 in VČ-20. Najprej smo 22. 2. 1980 v vrtini VČ-17 črpali 6 ur in 30 min 22,6 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,46 m, v 15,45 m oddaljenem piezometru V-17 pa za 0,13 m. Naslednji dan smo črpali 10 ur 40,8 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 1,10 m, v piezometru V-17 pa za 0,155 m. Za račun koeficienta prepustnosti k smo uporabili podatke zniževanja vodne gladine v piezometru V-17 v odvisnosti od časa črpanja. Najprej smo računali koeficient prevodnosti $T = k \cdot H$ (H = debelina vodonosne plasti) po Jacobovi enačbi za popoln vodnjak in vodonosnik s svobodno gladino, iz tega pa koeficient prepustnosti k po enačbi $k = \frac{T}{H}$. V računu nismo upoštevali vpliva Save na črpanje, kajti opazovanja so pokazala, da je gladina podtalne vode v črpalni vrtini

približno en meter višja od gladine Save. Razen tega so med poskusnim črpanjem ostali vsi izviri na desnem bregu Save nespremenjeni, kar kaže, da je v črpalno vrtino dotekala izključno podtalna voda iz Sorškega polja. To kaže tudi primerjava kemičnih analiz vode iz vrtine in Save. Voda iz vrtine ima trdoto 12,7^o nt, Sava pa 9,7^o nt. Sava vpliva s svojo gladino na podtalno vodo le posredno; pri dviganju savske gladine se zaradi zaježitve dviguje tudi gladina podtalne vode, pri padanju savske gladine pa pada tudi gladina podtalne vode.

Jacobova enačba za račun koeficienta prevodnosti T ima obliko

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \pi \cdot \Delta s}$$

Q = količina črpane vode v m³/s

Δs = znižanje gladine v piezometru V-17 v času enega log cikla časa v metrih

t = čas od začetka črpanja v sek

Za prvo črpanje je vrednost koeficienta T

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0226}{4 \pi \cdot 0,14} = 2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{2,95 \cdot 10^{-2}}{31} = 9,53 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Za drugo črpanje je vrednost T

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0408}{4 \pi \cdot 0,074} = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{0,10}{31} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Srednja vrednost k je $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Dne 17. 3. 1980 smo 9 ur črpali iz vrtine VČ-20 v Mošah na levem bregu Save 25,5 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,52 m, v piezometru V-17, oddaljenem 8,69 m, pa za 0,085 m. Naslednji dan smo črpali 10 ur 35,4 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,885 m, v piezometru V-17 pa za 0,11 m. Za račun koeficienta k smo prav tako kot preje uporabili podatke zniževanja vodne gladine v piezometru V-20 v odvisnosti od časa črpanja.

Najprej smo računali koeficient prevodnosti T po Jacobovi enačbi kot v prejšnjem primeru, iz tega pa koeficient prepustnosti k . Tudi na levem bregu namreč Sava nima neposrednega vpliva na podtalnico. Njena gladina je višja od gladine Save (v času črpanja za 0,54 m), pa tudi izviri na bregu Save pod Mošami so bili v času črpanja nespremenjeni. To kaže, da je v času črpanja dotekala v črpalno vrtino le podtalna voda iz Kranjskega polja, ne pa Sava. Dokaz za to je tudi primerjava kemičnih analiz vode iz vrtine in Save. Trdota vode iz vrtine je 15,1^o nt, trdota Save pa 9,7^o nt.

Vrednost koeficienta prevodnosti T po prvem črpanju:

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0255}{4 \pi \cdot 0,064} = 7,29 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{7,29 \cdot 10^{-2}}{29,5} = 2,47 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Vrednost koeficienta prevodnosti T po drugem črpanju:

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0354}{4 \pi \cdot 0,087} = 7,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{7,44 \cdot 10^{-2}}{29,5} = 2,52 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Srednja vrednost koeficienta prepustnosti $k = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Primerjava z vrednostjo k na desnem bregu kaže, da sta obe vrednosti zelo podobni; na desnem bregu je srednja vrednost $k = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, na levem pa $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Srednja vrednost vseh podatkov $k = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Opozoriti pa je treba, da so to srednje vrednosti prepustnosti celotne serije plasti konglomerata in proda pod gladino podtalne vode. V navpični smeri se prepustnost seveda spreminja v odvisnosti od poroznosti konglomerata in proda; v zelo poroznih plasteh je znatno večja od dobljene srednje vrednosti, v manj poroznih plasteh pa znatno manjša. Na to kažejo tudi nalivalni poskusi, izvedeni postopno v 10 m dolgih odsekih, ki so bili ponekod tudi krajši. Izračunane vrednosti k kažejo močno anizotropijo v navpični smeri, ki doseže vrednosti 1 : 3 do 1 : 7, ponekod pa celo več.

V splošnem so vrednosti k , izračunane po podatkih nalivalnih poskusov, dvakrat do dvajsetkrat manjše kot vrednosti k izračunane iz črpalnih poskusov. To je razumljivo, kajti poskusno se nalivajo vrtine, ki niso izprane in očiščene, poleg tega se je za nalivanje uporabljala kalna savska voda. Med nalivanjem se drobni delci iz rečne vode usedajo na stene vrtine in zmanjšajo njeno prepustnost. Zato so črpalni poskusi bolj zanesljivi, vendar dajo le poprečno vrednost prepustnosti plasti pod gladino podtalne vode.

Zaradi zaježitve Save v Mavčičah na koto 346,0 m je pričakovati, da se bo voda izgubljala skozi prepustne konglomeratne in prodne plasti pod pregrado in na njenih bokih. Razen tega je pričakovati, da bo podtalna voda izpirala drobne delce v temeljnih tleh zaradi velikih hidravličnih gradientov in s tem zvezanih hitrosti. Če privzamemo, da so temeljna tla izotropno prepustna, bo pod strojnico hidravlični gradient

$$i = \frac{H}{L} = \frac{17,5}{90} = 0,19 \text{ (19 ‰)}$$

H = razlika gladin

L = dolžina temeljev strojnice v smeri toka Save

Hitrost prenikajoče vode bo

$$v = \frac{k \cdot i}{n} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9 \cdot 10^{-1}}{0,20}$$

$$v = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

n = efektivna poroznost proda in konglomerata (20 ‰)

Za vrednost koeficienta prepustnosti k smo privzeli srednjo vrednost, ki smo jo dobili s črpalnimi poskusi na obeh bokih ($k = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$).

Pod jezovno zgradbo bo hidravlični gradient

$$i = \frac{17,5}{70} = 0,25 \text{ (25 ‰)}$$

Hitrost precejajoče se vode bo

$$v = \frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}{0,20} = 2,87 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Da bi preprečili prevelike izgube in izpiranje drobnih delcev, bo treba temeljna tla pod pregrado tesniti.

Tudi boke pregrade bo treba do določene razdalje zatesniti, da bi preprečili prevelike izgube vode in izpiranje. Tik ob bokih zgradbe bosta hidravlični gradient in hitrost približno enaka kot pod pregrado. Z večanjem razdalje od bokov pregrade se bosta hidravlični gradient in hitrost zvezno zmanjševala, ker bo pot tokovnic vse daljša.

Poskusno zatesnjevanje konglomerata in proda

V sedanji fazi raziskav še nismo točneje izračunali, koliko vode bi se izgubljalo pod pregrado in okoli bokov, če ne bi bila zatesnjena. Pri nadaljnjih raziskavah bomo izdelali matematični model, s katerim bomo ugotovili, kako se bo oblikovala gladina podtalne vode pri različnih dolžinah bočne injekcijske zavese in kolikšne bodo vodne izgube. Poseben matematični model je predviden za podtalno vodo na Sorškem polju. Z njim bomo izračunali dvig gladine po zaježitvi Save v Mavčičah in vodne izgube iz akumulacijskega jezera elektrarne skozi Sorško polje proti izvirom ob Savi.

Po enostavni oceni bi se izgubljalo skozi nezatesnjen konglomerat in prod pod pregrado in strojnico okrog $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ vode.

$$Q = F \cdot n \cdot v_{sr} = 1480 \cdot 0,20 \cdot 2,52 \cdot 10^{-3} = 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$$

F = ploskev prepustnega konglomerata in proda pod temelji pregrade in strojnice

v_{sr} = srednja hitrost precejjanja vode pod pregrado in strojnico

Skozi boke bi se izgubljalo po približni oceni še $1,9$ do $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ vode, kajti ploskev prepustnega konglomerata in proda, skozi katerega se bo precejala voda iz akumulacijskega jezera, je mnogo večja, pa tudi hitrosti precejajoče se vode bi bile dokaj velike. Zato bo treba izdelati injekcijsko zaveso pod pre-

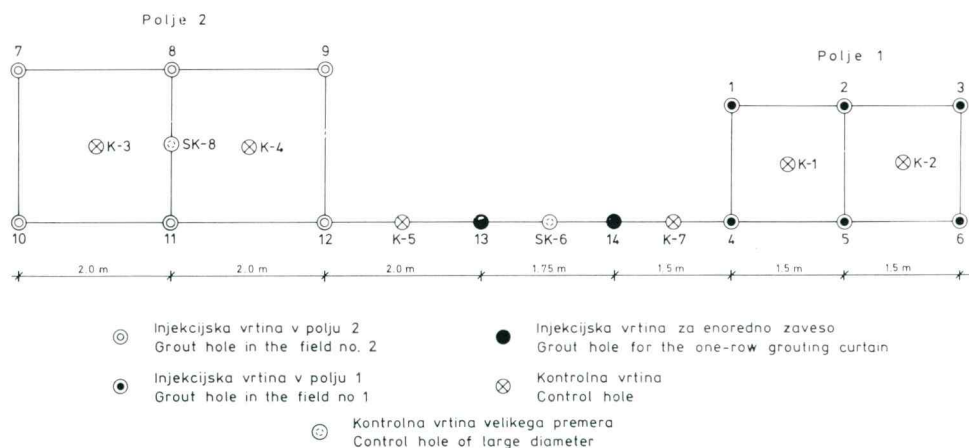
grado in v bokih tudi če ne upoštevamo nevarnosti izpiranja drobnih delcev konglomerata in proda pod pregrado in na bokih. Osnovne parametre za projekt zatesnjevanja temeljnih tal in bokov pregrade je dalo poskusno injekcijsko polje. Isti podatki bodo rabili tudi za projekt zatesnjevanja gradbene jame; že približen račun je namreč pokazal, da bo dotok vode v gradbeno jamo skozi prepusten konglomerat in prod prevelik, da bi ga bilo možno obvladati s črpalkami.

Glavni namen poskusnega injekcijskega polja je bil ugotoviti, ali je z injektiranjem možno zatesniti konglomerat in prod. Izbrati je bilo treba najprimernejšo sestavo injekcijske zmesi, določiti največji možni razmik med injekcijskimi vrtinami, da bi bila zavesa še zvezna, porabo injekcijske zmesi in najprimernejši postopek injektiranja. Na podlagi rezultatov, dobljenih s poskusnim poljem, bi se bilo treba odločiti za enovrstno ali večvrstno injekcijsko zaveso.

V projektu poskusnega injekcijskega poskusnega polja je bilo predloženo naj bi bila največja dovoljena prepustnost zatesnjenega konglomerata in proda enaka prepustnosti oligocenskega meljevca v podlagi, ki znaša $1 \cdot 10^{-6}$ do $1 \cdot 10^{-7}$ metrov na sekundo.

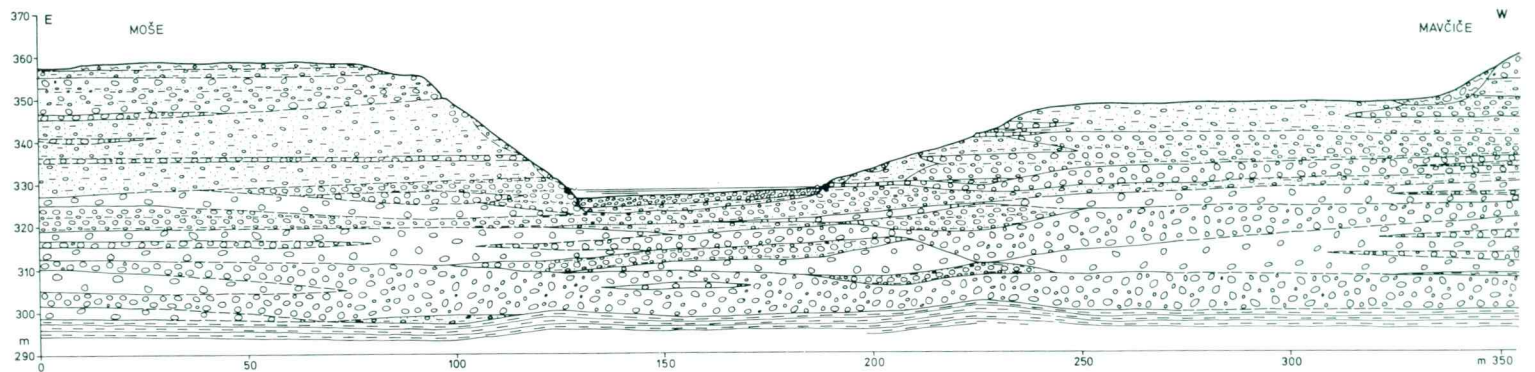
Vse podatke o rezultatih poskusnega injekcijskega polja, ki jih navajamo v nadaljevanju, smo povzeli po poročilu M. Gojkovića. Polje je bilo izdelano na desnem bregu Save na nizki terasi pet metrov nad rečno gladino. Načrt polja kaže sl. 4, sestavo terase pa geološki presek na sl. 5. Injekcijsko polje ima obliko dveh ločenih pravokotnikov (polje 1 in 2), v katerih so injekcijske vrtine med seboj oddaljene 1,5, oziroma 2 m. V vsakem pravokotniku je šest vrtin, vmes sta dve kontrolni vrtini. Med obema pravokotnikoma je še ena vrsta injekcijskih in kontrolnih vrtin. Vrtine v obeh pravokotnikih so razporejene v obliki trivrstne zavesa, povezuje pa ju enovrstna zavesa.

Injekcijske vrtine so bile izvrtane z dleti, kontrolne pa jedrovane z widia in diamantnimi kronami. Injektirali so v petmetrskih odsekih od spodaj na-

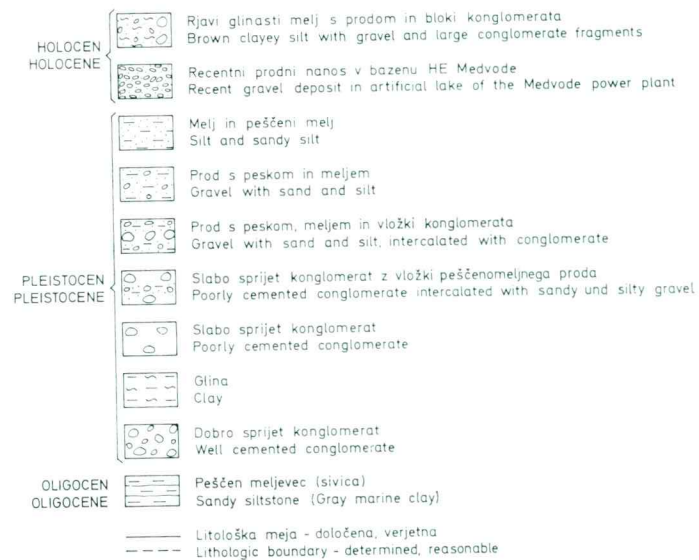


Sl. 4. Poskusno injektiranje za pregrado Mavčiče

Fig. 4. Test grouting of the Mavčiče dam site



Sl. 5. Geološki presek po osi pregrade Mavčiče
Fig. 5. Geologic cross section of the Mavčiče dam site



vzgor, pri čemer je bil vsak odsek na dnu in na vrhu zatesnjen s hidravličnim tesnilom. Tak način je bil izbran zato, ker je bilo treba injekcijske vrtine ceviti z obložnimi cevmi, razen v talninskem trdno sprijetem konglomeratu v globini 20 do 35 m pod površjem in v oligocenskem meljevcu v podlagi. Obložne cevi so izvlekli vzporedno z injektiranjem.

V vsakem pravokotniku (polji 1 in 2)) so najprej injektirali vrtine na krajiščih (npr. najprej vrtini 1 in 3). V njih je bila poraba suhe injekcijske zmesi velika, povprečno 400 kg na en meter vrtine. Za injekcijsko zmes so povečini uporabljali 95 % cementa in 5 % bentonita. V izredno prepustnih odsekih vrtin so dodajali do 25 % elektrofiltrskega pepela in do 25 % drobnega peska.

Pri injektiranju so se pokazale zelo velike razlike v porabi injekcijske zmesi v odvisnosti od poroznosti in prepustnosti konglomerata in proda. V posameznih odsekih je bilo porabljeno celo 800 kg suhe injekcijske zmesi na en meter vrtine, najmanjša poraba pa je bila 150 kg na en meter vrtine. V zelo poroznem konglomeratu in produ je bilo treba injektiranje tolikokrat ponoviti, da je znašala poraba injekcijske zmesi manj od 100 litrov v zadnjih 15 minutah v injektiranem odesku in pod določenim pritiskom, ki so ga izračunali za vsak odsek po enačbi A. Mysliweca:

$$P = \frac{c}{10} \cdot h \cdot G \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

P = pritisk injektiranja v kp/cm^2

c = kohezija v t/m^2 (od 1,5 do 2,0)

h = debelina krovninske plasti nad injektiranim odsekom v m

G = prostorninska teža krovninske plasti ($2,65 \text{ t/m}^3$)

Pri injektiranju vmesne vrtine št. 2 v sredini med vrtinama 1 in 3 je bila poraba injekcijske zmesi znatno manjša kot v vrtinah 1 in 3 na ogliščih; znašala je od 250 do 350 kg suhe snovi na en meter vrtine. Ta razlika je verjetno nastala zato, ker je injekcijska zmes iz vrtin 1 in 3 prodirala v vmesni prostor.

Za injektiranje vrtin št. 4 in 6 v polju 1 so porabili skoraj polovico manj injekcijske zmesi kot v vrtinah št. 1 in 3, po vsej verjetnosti zaradi prodiranja injekcijske zmesi iz prvih injekcijskih vrtin v celotni prostor polja 1. V vmesni vrtini št. 5 je bilo porabljeno le okrog 100 kg suhe injekcijske snovi na en meter vrtine, kar kaže na vpliv ostalih injektiranih vrtin.

V kontrolnih vrtinah K-1 in K-2 so najprej izmerili vodoprepustnost po Lugeonovi metodi v petmetrskih odsekih od zgoraj navzdol. V večini odsekov je bila vodoprepustnost majhna, 5 do 25 lugeonov. V redkih odsekih je presegla 30 lugeonov in samo v enem je dosegla 90 lugeonov. Kontrolne vrtine so nato injektirali in pri tem porabili povprečno 57 kg injekcijske zmesi na en meter vrtine.

Na podoben način so injektirali tudi polje 2 in enovrstno zaveso med obema poljema. Rezultati so skoraj povsem enaki kot v polju 1. Porabili so povprečno 330 kg suhe zmesi na en meter injekcijske vrtine in 35 kg suhe zmesi na en meter kontrolne vrtine. V enovrstni zavesi je bila povprečna poraba 300 kg suhe zmesi na en meter injekcijske vrtine in 110 kg na en meter kontrolne

vrtime. Nekoliko manjša poraba zmesi v injekcijskih vrtinah je posledica prodiranja injekcijske mase iz polj 1 in 2 v vmesni prostor.

V sredini polja 2 in v sredini enovrstne zavesa sta bili izvrtani dodatni kontrolni vrtini večjega premera SK-6 in SK-8; v obeh vrtinah smo izvedli nalivalne poskuse v desetmetrskih odsekih od zgoraj navzdol. Vrednosti koeficienta prepustnosti k so znašale $4,6 \cdot 10^{-7}$ do $4,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Po končanih nalivalnih poskusih so vrtini povrtali na večji premer, nato pa v obeh vrtinah poskusno črpali s potopno črpalko 1 do 3 l/s vode; pri tem se je znižala gladina v vrtinah za 13 do 18 m. Po podatkih črpalnih poskusov niha vrednost koeficienta prepustnosti k od $1 \cdot 10^{-6}$ do $4,2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Iz podatkov nalivalnih in črpalnih poskusov izhaja, da se je prepustnost konglomerata in proda v obeh poljih in tudi v enovrstni zavesi zmanjšala najmanj stokrat, povečini pa več kot tisočkrat. Prvotna povprečna prepustnost je bila namreč $2,1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Obenem je bila izpolnjena zahteva, postavljena v projektu, da naj se prepustnost injektiranega konglomerata in proda izenači s prepustnostjo oligocenske podlage ($1 \cdot 10^{-6}$ do $1 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Geodetska opazovanja injekcijskih polj med injektiranjem so pokazala, da se je površje dvignilo le za 2,3 mm.

Na podlagi poskusnega injektiranja se je projektant odločil za injektiranje oboda gradbene jame z enovrstno zaveso, kajti v gradbeni jami se ni mogoče izogniti črpanju padavinske vode ob nalivih. Zato povsem neprepustna zavesa ni nujna, ker bodo črpalke manjših zmogljivosti iz gradbene jame črpale poleg padavinske vode tudi vodo, ki bo pronicala skozi zaveso. Na podlagi dotoka vode med izkopom gradbene jame bo projektant izbral vrsto injekcijske zavesa pod pregrado in okoli bokov.

Literatura

- Aljto vski, M. E. 1973, Hidrogeološki priručnik. Građevinska knjiga, Beograd.
- Castany, G. 1963, *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris.
- Johnson, E. E. 1966, *Ground water and wells*, Saint Paul, Minnesota.
- Jugoslovanski komitet za mednarodnu hidrološku deceniju, 1967, Seminar o bilansu podzemnih voda, Beograd.
- Kruseman, G. P. & De Ridder, N. A. 1970, *Analysis and evaluation of pumping test data*, Wageningen, The Netherlands.
- Žlebnik, L. 1971, Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja. *Geologija* 14, Ljubljana.
- Žlebnik, L. 1975, Hidrogeološke razmere na Sorškem polju. *Geologija* 18, Ljubljana.