

Hidrogeološke razmere na Sorškem polju

Ljubo Žlebnič

Geološki zavod Ljubljana, Parmova 33

Po geološki zgradbi je Sorško polje udorina, izoblikovana v neprepustnih terciarnih glinastih plasteh ter zapolnjena s prepustnim pleistocenskim konglomeratom in prodom. Skozi konglomerat in prod se pretaka podtalna voda, ki se napaja iz Save in iz padavin ter se izliva delno nazaj v Savo, v večji meri pa v izvire na levem bregu Sore. Avtor je izračunal srednjo vrednost koeficienta prepustnosti in efektivne poroznosti vodonosnika. Skozl osrednji del Sorškega polja se pri nizkem vodnem stanju pretaka $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri visokem vodnem stanju se pretok poveča za 15 do 20 %. Za vodno oskrbo prebivalstva bi bilo mogoče izkoristiti $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

1. Dosedanje raziskave

Leta 1952 je prof. Janko Sketelj izdelal v zvezi z izgradnjo HE Medvode hidrološko študijo Sorškega polja, ki ji je priložil tudi karto hidroizohips. Nekoliko kasneje, leta 1959/60, je v zvezi z oskrbo vode tovarne celuloze v Goricanah izdelal Hidrometeorološki zavod SRS kratko hidrološko študijo Sorškega polja.

V letih 1963—1965 je Geološki zavod Ljubljana izdelal hidrogeološko karto v merilu 1 : 25 000, izvrtal 17 vrtin in jih opremil kot piezometre za opazovanje nihanja gladine podtalne vode. Na podlagi hidrogeološkega kartiranja, vrtanja, opazovanja gladin v piezometrijskih vrtinah in meritev izdatnosti izvirov je izdelal približno bilanco podtalne vode Sorškega polja. Hidrometeorološki zavod SRS je kasneje v izvrtanih piezometrijskih vrtinah in obstoječih vodnjakih simultano opazoval gladino podtalne vode, meril izdatnost izvirov, izdelal karto hidroizohips pri različnih stanjih vode ter bilanco podtalne vode. Po vseh zbranih podatkih je Projekt-nizke zgradbe ocenil količino in kakovost podtalnice na Sorškem polju.

V letih 1973 in 1974 je Geotehnika Zagreb izvrtala na kraju predvidene vodarne na Sorškem polju 4 piezometrijske vrtine. V letih 1974 in 1975 pa je Geološki zavod Ljubljana po naročilu Mestnega vodovoda Ljubljana podrobneje

hidrogeološko raziskal profil Godešič—Mavčiče, tj. v trasi predvidene vrste vodnjakov. V okviru raziskav so bile izvrtane 3 črpalne vrtine, SOV-51, SOV-53 in SOV-54 ter piezometra SOP-50 in SOP-52. Da bi določili najvažnejše hidrogeološke parametre vodonosnih plasti, je izvedel poskusno črpanje.

2. Kratek morfološki opis

Meja podtalne vode Sorškega polja poteka po Savi od Kranja do Medvod, nato od Medvod po Sori navzgor do Suhe pri Škofji Loki in od tod približno vzporedno s cesto Škofja Loka—Kranj do Kranja.

Točen potek razvodnice na zahodu med podtalno vodo Sorškega polja in podtalno vodo, ki se pretaka proti potoku Suhi, ni znan. Na tem območju sestoje pleistocenske plasti v glavnem iz gline in vmesnih vodonosnih prodnih plasti. Nekatere vodonosne prodne plasti so verjetno nagnjene proti Suhi in se podtalna voda, ki se napaja iz padavin, preceja proti Suhi. Na to kažejo številni mali izviri na stikih prodnih in glinastih plasti na levem bregu potoka. Večji del podtalne vode pa se s tega zahodnega roba polja preceja proti sredini Sorškega polja.

Tudi med Kranjem in Bregom ni mogoče potegniti jasne razvodnice. Površinska razvodnica je vsekakor Sava, ki po novejših opazovanjih intenzivno napaja podtalno vodo Sorškega polja, posebno ob visokih vodah. Toda razen iz Save se na tem območju pretaka podtalna voda iz Kranjskega na Sorško polje pod savsko strugo. Podtalna voda se pretaka skozi porozne prodne in konglomeratne plasti, ki se menjavajo z manj prepustnimi, dobro sprijetimi konglomeratnimi plastmi.

V morfološkem pogledu je Sorško polje ravnica, ki položno pada od Kranja proti Godešiču in Medvodam. Površje ravnice, ki je pravzaprav mlajšepleistocenski vršaj Save, je nagnjeno povprečno za 0,4 ‰ proti jugu. Na Laborah pri Kranju je površje ravnice na višini 390 m, pri Sp. Senici na robu strme ježe proti Sori pa na višini 332 m.

Iz ravnice se dvigajo starejše pleistocenske terase, Velika Dobrava med Godešičem in Retečami, Zejski hrib nad Japrcem, terasa med Zejami in Svetjem ter terasa med Mavčičami, Podrečo in Zbiljami. Površje teh teras je valovito in ponekod tudi zakraselo. Posebno Zejski hrib in Velika Dobrava sta dokaj zakrasela; posebno številne so vrtače.

Jugozahodni in južni rob polja se znižuje v več terasah s strmimi ježami proti globoko zarežani dolini Sore. Zahodni rob polja predstavlja rahlo valovito in delno zamočvirjen svet vzdolž ceste Škofja Loka—Kranj, ki loči Sorško polje od povodja potoka Suhe. Tod teče tudi edini površinski tok na Sorškem polju, Bitenjski potok ali Žabnica. Ta izvira v hribovju zahodno od Stražišča pri Kranju in teče skozi Bitnje, Žabnico, Trato, mimo Lipice in se pod Godešičem spoji s studenčnico, v katero se izlivajo številni izviri iz Sorškega polja. V sušnem obdobju teče Žabnica le do vasi Žabnica, kjer ponikne. Severovzhodni in vzhodni rob polja poteka ob 25 do 45 m globokem kanjonu Save, ki je vrezan v pleistocenske konglomeratne plasti.

3. Geološki opis

Sorško polje obsega okrog 35 km² površine. Prekrivo je povečini z mlajšepleistocenskim prodom, s tako imenovanim mlajšim zasipom. Iz prodne ravnine se dvigajo starejše pleistocenske nizke valovite terase, ki so prekrivane z debelo plastjo gline s prodniki: Velika Dabrava severno od Reteč in Godešiča, Zejski hrib med Jeprco in Podrečo, terasa med Zbiljami in Svetjem ter terasa med Mavčičami in Podrečo.

Pod prodom, ki prekriva ravne dele polja, leži konglomerat, ki prihaja na površje v soteski Save. Iz konglomerata sestojijo tudi zgoraj omenjene terase; le njihova površinska plast je iz glinaste preperine, debele več metrov. Debelina prodne odeje je povečini tenka, do 10 m, le v ozkem pasu med Drulovko, Jeprco in Senico, kjer poteka stara, s prodom zasuta savska struga, je prodni zasip debel 35 do 45 m. Dno stare struge po dosedanjih podatkih ni globlje od dna današnjega kanjona. Med Jeprco, Gorenjo vasjo, Senico, Ladjo, Svetjem in Žejami je savska erozija odnesla ves konglomerat, nastalo široko strugo pa je zasula z mlajšepleistocenskim prodom približno 35 m na debelo.

Po podatkih geološkega kartiranja in vrtnja poteka s prodom zasuta stara savska struga v začetnem delu od Drulovke proti jugovzhodu vzporedno s sedanjem strugo. Od nje je oddaljena približno 500 m. Potek stare struge med Bregom in Mavčičami ni zanesljivo ugotovljen, vsekakor pa poteka med vrtnama S-15 in S-16. Od tod dalje poteka naravnost proti jugu, zahodno od Jeprce in proti Senici ter Svetju. Ob vtoku pri Drulovki je zasuta savska struga široka okrog 300 m, medtem ko se med Jeprco in Gorenjo vasjo razširi na 1200 m. Med Drulovko in Jeprco njena širina ni točno določena.

Podlaga pleistocenskega proda in konglomerata sestoji iz terciarne peščene gline, peščenjaka in kompaktnega konglomerata. Terciarne plasti leže v osrednjem delu polja 65 do 120 m globoko pod površjem, na južnem in jugovzhodnem robu polja pa prihajajo na površje. Izdanki terciarnih plasti so na levem bregu Sore med Retečami in Zgornjo Senico, pri jezu tovarne celuloze v Goričanah, pod mlinom v Ladji in na levem bregu Sore pod Svetjem. Izdanki terciarnih plasti so tudi pod gostilno Bohinje v Medvodah, na levem in desnem bregu akumulacijskega bazena HE Medvode do mostu v Smljedniku in v jezi terase pri Žejah.

Zgornje površje terciarnih plasti na izdankih je pod Gorenjo vasjo na koti 345 m, pod Retečami na 335 m, pod Svetjem na 335 m, pod Ladjo na 313 m, pod gostilno Bohinje na 330 m, v Zbiljah na 330 m, v Žejah pa se dvigne na koto 355 m.

Terciarna podlaga predstavlja na Sorškem polju globoko kotanjo, zapolnjeno s pleistocenskim konglomeratom in prodom. Najgloblji del udorine, kjer so pleistocenske plasti debele 90 do 120 m, je med Prašami, Bitnjami in Laborami. V tem delu leži terciarna podlaga na višini 256,8 do 279,5 m. Na jugovzhodnem robu najglobljega dela kotanje, kjer so bile v letošnjem letu izvrtane črpalne vrtine SOV-51, SOV-53 in SOV-54, leži terciarna podlaga na višini 274,0 do 291,4 m.

4. Hidrogeološki opis

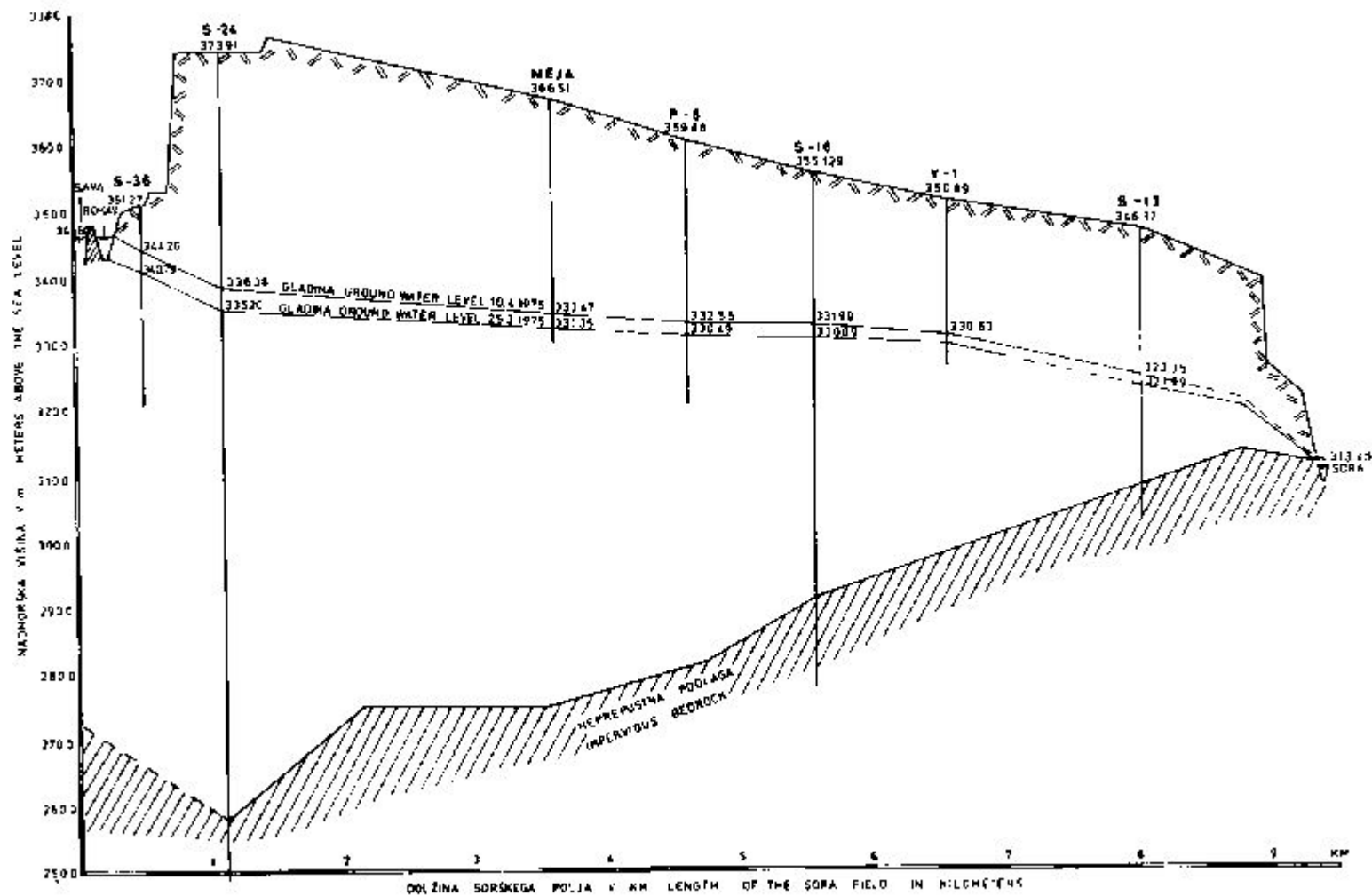
4.1. Gladina podtalne vode

Iz geološkega opisa vidimo, da je Sorško polje po svoji zgradbi udorina, ki je na debelo zapolnjena s poroznim konglomeratom in delno s prodrom. Podlago udorine sestavljajo neprepustne terciarne glinaste plasti. V konglomeratu in prodru so akumulirane velike količine podtalne vode. Seveda so zapolnjene z vodo le tiste porozne plasti, ki leže pod gladino podtalne vode. Karta hidroizohips (tabla 1) in vzdolžni profil (sl. 1) kažeta, da gladina podtalne vode na skrajnem severnem robu polja pri Drulovki strmo pada od Save proti jugu. Pri Drulovki je pri nizkem vodostaju na višini 342 m, pri Bregu in pri cestnem nadvozu nad železniško progo pa na višini 335 m. Strmec gladine podtalne vode je na tem območju 9,3 ‰. Gladina leži 39 do 43 m globoko pod površjem polja. Od tod proti jugu nekako do železniške postaje v Žabnici in do Praš ima gladina podtalne vode znatno položnejši strmec, ki doseže le 2 ‰. Gladina je okrog 43 m globoko pod površjem polja. Na osrednjem delu polja južno od železniške postaje Žabnica in Praš pa vse do Godešiča, Reteč in Jecrce je strmec gladine podtalne vode izredno majhen. Pri Meji je npr. le 0,59 ‰. Gladina podtalne vode je v osrednjem delu polja pri nizkem stanju vode 35 do 25,5 m globoko pod površjem. Iz karte hidroizohips vidimo, da se na tem delu polja razdeli tok podtalne vode v več smeri. Del toka je usmerjen naravnost proti jugu, proti izvirov pod Godešičem in Retečami, drugi del proti izvirov pod Senico in Ladjo, del toka pa se usmeri nazaj proti Savi, proti Mavčičam in Podreči. Na skrajnem južnem robu Sorškega polja nad izviri pod Godešičem, Retečami, Senico, Ladjo in Goričanami se strmec gladine podtalne vode zopet izredno povzeta. Tako je na območju tovarne celuloze v Goričanah 5,5 ‰, gladina pa je okrog 8 m pod površjem. Pri Jecrci je gladina pri nizkem stanju vode 24,6 m globoko.

Vzdolžni profil kaže, da gladina podtalne vode močno niha v odvisnosti od gladine Save in padavin. Na profilu je zarisano zelo nizko stanje vode dne 25. 3. 1975 in izredno visoko stanje vode dne 10. 4. 1975 po izrednem porastu gladine Save in istočasnih močnih padavinah. V tem sorazmerno kratkem razdobju je na območju med Savo, Drulovko in Bregom gladina podtalne vode narasla za 3,2 do 3,6 m. Če pa upoštevamo skrajno sušno stanje vode dne 15. 3. 1975 je razlika gladin še večja, od 4,0 do 4,4 m. V osrednjem delu polja so bila nihanja gladine manjša. Razlika gladin je po podatkih dne 25. 3. in 10. 4. 1975 1,9 do 2,1 m. Če pa upoštevamo izredno nizko stanje dne 15. 3. 1975, je razlika gladin 2,5 do 3 m. Opazna so izjemno velika nihanja gladin na zahodnem obrobju polja vzdolž železniške proge Škofja Loka—Kranj. Tu so znašale razlike gladin 3,7 do 4,0 m. Če pa upoštevamo podatke zelo nizkega stanja vode dne 10. 3. 1975, tedaj je znašala v vrtini S-20 severno od Trate razlika gladin celo 6 m. Ta velika nihanja je pripisati dotoku visoko ležeče podtalnice

Sl. 1. Vzdolžni profil Sorškega polja z vrisano gladino podtalnice pri nizkem in visokem stanju vode dne 25. 3. in 10. 4. 1975

Fig. 1. Longitudinal section of the Sora Field showing the groundwater level at low waters of March 25, 1975, and at high waters of April 10, 1975



iz zahodnega roba polja po močnejših padavinah ter infiltraciji potoka Zabnice, ki se često razlije iz svoje struge in poplavi bližnje ozemlje. Ob visokem stanju vode se zaradi tega gladina podtalnice na zahodnem obrobju polja močno dvigne, tok podtalne vode pa se preusmeri iz prejšnje smeri sever—jug v smer severo-zahod—jugovzhod.

Pripominjamo, da pri opisu podtalne vode Sorškega polja nismo upoštevali obrobne visoko ležeče podtalnice na zahodnem robu polja, ki se izliva v globoko ležečo podtalnico Sorškega polja. Količine te vode so namreč zelo majhne, pa tudi izdatnost vodonosnih plasti na tem območju je izredno majhna. V poglavljenem vodnjaku pri šoli v Zabnici prevladuje do globine 35 m pod površjem zaglinjen prod z vložki peščenega proda, globlje pa leži terciarna glina. Izdatnost vodnjaka je bila malenkostna, le okrog 0,3 l/s pri znižanju gladine za 17 m. Iz tega smo približno ocenili koeficient prepustnosti k na $3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Na južnem robu polja je nihanje gladine podtalne vode manjše kot v osrednjem delu polja, okrog 1,35 m. Izjemno smo izmerili večje nihanje v vodnjaku 92 v Retečah (2 m), kar pa je pripisati dotoku z območja visoko ležeče podtalnice pri Gorenji vasi.

4.2. Debelina vodonosne plasti

Debelina vodonosne plasti je neposredno odvisna od gladine podtalne vode in globine neprepustne podlage. Z nihanjem gladine podtalne vode se spreminja tudi debelina vodonosne plasti.

Po podatkih vrtanja sestoji vodonosna plast na Sorškem polju večidel iz poroznega konglomerata in zbitega peščenega proda. Na južnem robu polja, južno od Jeprce, sestoji vodonosna plast le iz peščenega proda.

Vzdolžni profil kaže, da leži neprepustna podlaga najgloblje na severu polja pri Drulovki, kjer je na višini 258,8 m. Proti jugu se podlaga dviga in je na južnem robu polja na več krajih razkrita na površju na višini 313 do 345 m. Iz vzdolžnega profila in karte hidroizohips vidimo, da je gladina podtalne vode nagnjena proti jugu, neprepustna podlaga pa se v tej smeri dviga, zaradi česar se debelina vodonosne plasti proti jugu postopno močno zmanjša. Pri nizkem stanju vode je pri Drulovki vodonosna plast debela okoli 77 m, na Meji 57 m, v vrtini S-16 38,5 m, v vrtini S-13 pri Jeprci 15 m, v vodnjaku C-5 v tovarni celuloze v Goricanah pa le še 4,2 m. Pri visokem stanju vode se zveča debelina vodonosne plasti za okrog 4,4 m pri Drulovki, za okrog 3 m pri Meji, pri Jeprci za 1,3 m, v bližini izvirov v Goricanah pa le še za nekaj cm.

4.3. Sestava vodonosnih plasti

Vrtine iz let 1963—1965, posebno pa novejši podatki črpalnih vrtin in vodnjakov, ki so bili izvrtani v letih 1974 in 1975 na Sorškem polju ter njegovem obrobju, kažejo, da sestoji vodonosne plasti v glavnem iz poroznega konglomerata z vložki zbitega peščenega proda. Le na južnem robu polja južno od Jeprce vsebuje vodonosna plast le peščeni prod.

Konglomerat je delno dobro sprijet in malo prepusten, delno pa je porozen in močno prepusten. Peščeni prod, ki sestavlja debelejšje in tanjše plasti ter leče med konglomeratom, je dobro prepusten. Posebno dobro je prepusten peščeni prod vodonosne plasti na južnem robu polja, južno od Jeprce. Dobro

sprijet in slabo prepusten konglomerat ne sestavlja zveznih plasti, ampak po večini le večje ali manjše leče.

Iz zgoraj navedenih podatkov razberemo, da so vodonosne plasti precej heterogene in anizotropne tako v navpični kot tudi v vodoravni smeri. Črpalni poskusi v vrtinah SOV-51, SOV-53, SOV-54 in v vodnjaku Iskre pod vasjo Orehek so dali zaradi tega le podatke o povprečnih vrednostih koeficienta prepustnosti k in efektivne poroznosti S za celo vodonosno plast, ki pa je zelo heterogena. Torej so te vrednosti le navidezne, ki pa jih lahko uporabimo pri izračunih izdatnosti vodonosne plasti ter pri oceni statičnih in dinamičnih zalog podtalne vode na Sorškem polju. Prave vrednosti koeficientov k in S močno prepustnih poroznih konglomeratnih in prodnih plasti so precej večje od izračunanih, medtem ko so plasti dobro sprijetega konglomerata slabo porozne in skoraj neprepustne. Zaradi letastega razvoja dobro sprijetega konglomerata ne moremo niti približno oceniti, kolikšen procent celotne debeline kvartarnih plasti pod vodno gladino odpade na skoraž neprepustni dobro sprijeti konglomerat, in kolikšen procent na porozni, močno prepustni konglomerat in peščeni prod. Iz tega pa sledi, da ne moremo točneje oceniti prave vrednosti koeficientov prepustnosti k in efektivne poroznosti S močno poroznih in prepustnih konglomeratnih ter prodnopeščenih plasti.

4.4. Najvažnejše hidrogeološke karakteristike vodonosnih plasti

Koeficient prepustnosti k in efektivno poroznost S smo določili na Sorškem polju po podatkih črpalnih poskusov v vodnjaku Iskre pod Orehkom, v črpalnih vrtinah SOV-51, SOV-53 in SOV-54 ter v vodnjaku C-5 v tovarni celuloze v Goričanah. Poleg tega smo izračunali efektivno poroznost tudi po opazovanih gladin Save in piezometrov S-30, S-24 in S-35 v Drulovki in na Bregu med poplavnim valom Save v času od 4. 4. do 20. 4. 1975.

V vodnjaku Iskre pod vasjo Orehek smo poskusno črpali v začetku februarja 1974. Vodnjak ima premer 0,6 m in globino 26,2 m, je torej nepopoln. Neprepustna podlaga je po razpoložljivih podatkih bližnjih vrtin okrog 80 m pod površjem zemlja. Debelina vodonosne plasti znaša približno 70 m. Po podatkih črpanja smo izračunali koeficient prevodnosti T in iz tega koeficient prepustnosti k . Pri računu smo uporabili podatke znižanja v piezometru P-1, ko se je iz vodnjaka črpalo 39,5 l/s vode. Piezometer je oddaljen od vodnjaka 10,4 m. Računali smo po Hantushovi korekcijski metodi za nepopolni vodnjak v vodonosniku s svobodno gladino

$$T = \frac{2,3 \times Q}{4 \pi \times A (s - s^2/2d)}$$

T ... koeficient prevodnosti (m^2/s)

$1 (s - s^2/2d)$ = korigirano znižanje v času enega logaritmičnega cikla časa

d = dolžina filtra vodnjaka pod vodno gladino (m)

po tej enačbi je

$$T = \frac{2,3 \times 0,0395}{4 \pi \times 0,038} = 0,19 \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz tega izračunamo koeficient prepustnosti k po enačbi

$$k = \frac{T}{H} = \frac{0,19}{70} = 2,72 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

H = povprečna debelina vodonosnika.

V osrednjem delu Sorškega polja smo v marcu in aprilu leta 1975 črpali iz vrtin SOV-51, SOV-53 in SOV-54. Med poizkusnim črpanjem iz vrtine SOV-51 ni bilo znatnejših naravnih nihanj gladine podtalne vode, medtem ko je poizkusno črpanje v črpalnih vrtinah SOV-53 in SOV-54 motilo močno dviganje in kasneje padanje gladine podtalne vode.

V črpalni vrtini SOV-51, ki ima premer 0,2 m in je globoka 70 m, smo dne 18. 3. 1975 najprej črpali 4 ure povprečno 11,8 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,22 m, v 6,73 m oddaljenem piezometru SOP-50 za 0,038 m, medtem ko v 317 m oddaljenem piezometru S-18 ni bilo opaziti padca gladine. Naslednjega dne, 19. 3. 1975, smo 6 ur črpali povprečno 22 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,566 m, v piezometru SOP-50 za 0,054 m, medtem ko v piezometru S-18 ni bilo opaziti padca vodne gladine. V zadnjih 3 urah črpanja se je gladina v črpalni vrtini in bližnjem piezometru ustalila. V naslednjih dneh smo od 20. 3. do 22. 3. 1975 48 ur in 30 minut neprekinjeno črpali povprečno 31,4 l/s vode; pri tem je padla gladina v črpalni vrtini za 0,90 m, v piezometru SOP-50 pa za 0,071 m. Med poizkusnim črpanjem je začela dne 20. 3. ob 13. uri močno naraščati gladina podtalne vode, zato smo pri računu koeficienta prevodnosti T in efektivne poroznosti S uporabili le podatke znižanja v piezometru SOP-50 v času od 9. do 13. ure dne 20. 3. 1975. Prav tako smo lahko uporabili za račun koeficienta T podatke dviganja po končanem črpanju dne 22. 3. 1975 v črpalni vrtini in bližnjem piezometru, ko se je gladina podtalnice na celotnem polju skoraj povsem umirila. Pri računu koeficienta T iz znižanja gladine v piezometru SOP-50 v določenem času T smo uporabili Jacobovo enačbo za popoln vodnjak in vodonosnik s svobodno gladino.

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \pi \cdot \Delta s} = \frac{2,3 \cdot 0,0314}{4 \pi \cdot 0,02} = 0,2873 \text{ m}^2/\text{s}$$

Q = količina črpane vode v m³/s

Δs = znižanje gladine v SOP-50 v času enega log cikla časa t (m)

t = čas od začetka črpanja.

Iz tega smo izračunali vrednost koeficienta prepustnosti k po enačbi

$$k = \frac{T}{H} = \frac{0,2873}{39,825} = 7,21 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

H = debelina vodnosne plasti.

Vrednost efektivne poroznosti smo izračunali po enačbi Jacoba

$$S = \frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 0,2873 \cdot 0,3}{6,73^2} = 0,132 = 13,2 \%$$

t_0 = čas pri znižanju gladine = 0.

Za kontrolo zgornjega računa smo izračunali vrednost koeficienta T tudi po podatkih dviganja gladine v črpalni vrtini in bližnjem piezometru po kon-

čanem črpanju dne 22. 3. 1975. Računali smo po Theisovi enačbi s predpostavko, da se je vodna gladina med črpanjem povsem ustalila

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \pi \cdot \Delta s'}$$

$\Delta s'$ = preostala depresija v log ciklu t/t'

t = čas od začetka do konca črpanja

t' = čas od konca črpanja naprej.

Po tej enačbi je vrednost koeficienta prevodnosti T po podatkih dviganja v črpalni vrtini in bližnjem piezometru enaka

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0314}{4 \pi \cdot 0,026} = 0,221 \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz tega izračunamo vrednost koeficienta prepustnosti k

$$k = \frac{T}{H} = \frac{0,221}{39,825} = 5,55 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Izračunana vrednost koeficienta k je nekoliko manjša od tiste, ki smo jo izračunali po podatkih upadanja vodne gladine med črpanjem, vendar razlika ni velika. Nastala je zaradi omejene možnosti točnega merjenja gladin in morda neopazno majhnega naravnega nihanja gladine podtalnice, ki ga seveda nismo mogli upoštevati.

Podatkov upadanja gladine v črpalni vrtini med črpanjem nismo mogli uporabiti, ker nismo vedeli, za koliko je dodatno padla gladina zaradi uporov pri pretakanju podtalne vode skozi filter vrtine in turbulentnega pretakanja podtalnice v neposredni bližini vrtine. Zaradi anizotropne sestave vodonosne plasti, ki sestoji iz plasti oziroma leč malo prepustnega kompaktnega konglomerata ter močno prepustnega poroznega konglomerata in peščenega proda, sklepamo, da preide med črpanjem v bližini vrtine laminarno pretakanje podtalnice v turbulentno.

Naslednji črpalni poizkus smo izvedli v črpalni vrtini SOV-53 v času od 24. 3. do 28. 3. 1975 na Meji. Vrtina ima premer 0,2 m in je globoka 82 m. Črpalni poizkus je nekoliko motilo dviganje podtalne vode, ki pa je bilo zelo počasno. Najprej smo dne 25. 3. 1975 5 ur 45 min črpali povprečno 21 l/s vode; pri tem je padla gladina v črpalni vrtini za 0,094 m, v 6,23 m oddaljenem piezometru SOP-52 pa za 0,016 m. Gladina se je v poslednjih 2 urah povsem ustalila. V piezometru PIN, oddaljenem 140 m, ni bilo opaziti padca gladine. V naslednjih dneh smo v času od 26. 3. do 28. 3. 1975 48 ur in 15 minut neprekinjeno črpali povprečno 35,5 l/s vode; pri tem je padla vodna gladina v črpalni vrtini za 0,194 m, v piezometru SOP-52 za 0,024 m in v piezometru PIN za 0,007 m. Izmerjeni padec gladine smo popravili za 3 cm, za kolikor se je v času črpanja naravno dvignila gladina podtalnice v osrednjem delu polja. Za račun koeficienta prevodnosti T smo uporabili podatke naraščanja gladine v črpalni vrtini in piezometru SOP-52 po končanem črpanju dne 28. 3. 1975. Podatkov upadanja gladine med črpanjem v piezometru SOP-52 nismo mogli uporabiti zaradi tega, ker se je gladina že v zelo kratkem času skoraj povsem ustalila, nato pa je zaradi naravnega dviganja gladine podtalnice začela celo naraščati. Razen tega je bilo znižanje gladine zelo majhno in v skrajnih mejah točnosti meritev gla-

din, zaradi česar so verjetno nastale tudi manjše napake meritev (v mejah 1 do 4 mm).

Pri računu koeficienta prevodnosti T po podatkih dviganja gladine v črpalni vrtini in piezometru SOP-52 smo uporabili *Thiemov* enačbo s predpostavko, da se je vodna gladina med črpanjem povsem ustalila. Iz podatkov dviganja gladine v črpalni vrtini SOV-53 dobimo :

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \pi \cdot \Delta s'} = \frac{2,3 \cdot 0,0355}{4 \pi \cdot 0,0054} = 1,203 \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz tega izračunamo vrednost koeficienta prepustnosti

$$k = \frac{T}{H} = \frac{1,203}{53,12} = 2,265 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Če upoštevamo podatke dviganja gladine v piezometru SOP-52, dobimo

$$T = \frac{2,3 \cdot 0,0355}{4 \pi \cdot 0,0108} = 0,601 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{0,601}{53,12} = 1,132 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Za kontrolo smo izračunali vrednost koeficienta prevodnosti T tudi po *Thiemovi* enačbi za ustaljeno gladino med črpanjem po podatkih znižanja gladin v piezometrih SOP-52 in PIN.

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{2 \pi \cdot \Delta s_m} = \frac{2,3 \cdot 0,0355}{2 \pi \cdot 0,123} = 1,085 \text{ m}^2/\text{s}$$

Δs_m = maksimalno znižanje na en logaritmični cikel vzdalje r .

Iz tega izračunamo vrednost koeficienta prepustnosti k

$$k = \frac{T}{H} = \frac{1,085}{53,12} = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Izračunane vrednosti koeficienta prepustnosti k se dokaj ujemajo med seboj. Večja razlika je le v računu vrednosti koeficienta k po podatkih naraščanja gladine v SOP-52, kar pa je verjetno pripisati manjšim napakam pri meritvah gladine (v mejah 1 do 4 mm).

Črpalni poizkus v vrtini SOV-54 smo izvedli v času od 19. 4. 1975 do 22. 4. 1975. Vrtina ima premer 0,2 m in je globoka 70 m. Črpali smo s črpalko maksimalne zmogljivosti 20 l/s; večje črpalke ni bilo mogoče vgraditi v vrtino. Najprej smo v dneh 19. 4. do 21. 4. 1975 48 ur neprekinjeno črpali 20,8 l/s vode; pri tem je padla gladina v črpalni vrtini za 0,19 m, v 6,2 m oddaljenem piezometru S-15 pa za 0,006 m. Gladina se ni dokončno ustalila, ampak se je po začetnem večjem padcu že po 30 minutah ustalila, nato pa je začela padati približno enako kot je naravno upadala gladina podtalnice v celotnem osrednjem delu polja. Naslednjega dne, 22. 4. 1975, smo 6 ur črpali 11,9 l/s vode, pri čemer je padla gladina v črpalni vrtini za 0,086 m, v bližnjem piezometru pa za 0,003 m. Ti padci so že popravljene za 0,9 cm, za kolikor je naravno padla gladina v tem času.

Zgornji podatki kažejo, da je bilo upadanje gladine v piezometru S-15 izredno majhno in že zunaj meja točnosti meritev. Zato nismo mogli izračunati vrednosti koeficienta prevodnosti T niti iz podatkov zniževanja gladine med

črpanjem niti iz podatkov dviganja po končanem črpanju. Po primerjavi znižanj v vrtinah SOV-53 in SOV-54 pri črpanju 20 l/s vode pa sklepamo, da je koeficient prepustnosti k na območju vrtine SOV-54 približno še enkrat manjši kot na območju vrtine SOV-53. V vrtini SOV-53 je namreč pri črpanju 20 l/s padla gladina le za 0,094 m.

Iz diagramov odvisnosti znižanja vodne gladine v črpalnih vrtinah od količine črpanja sklepamo, da bi iz vrtine SOV-51 lahko teoretično črpali okrog 50 l/s vode pri znižanju gladine za 2,2 m, iz vrtine SOV-53 okrog 65 l/s pri znižanju gladine za 0,55 m in iz vrtine SOV-54 okrog 35 l/s pri znižanju gladine za 0,5 m. Praktično iz omenjenih vrtin ni mogoče črpali tolikih količin, ker v nobeno od vrtin ni mogoče vgraditi zaradi majhnega premera (0,2 m) tako močnih črpalk.

Vplivni polmer črpalnih vrtin smo lahko določili le pri črpalnem poizkusu v vrtini SOV-53. Pri črpanju 35,5 l/s vode iz te vrtine je segel vpliv vrtine 500 m daleč, kar je pokazal diagram, na katerega smo nanесли maksimalna znižanja gladin v piezometrih SOP-52 in PIN. Razdalje med piezometri in črpalno vrtino so nanesene v logaritmičnem merilu. Seveda pa je znižanje že na razdalji 200 m od črpalne vrtine povsem neznatno, le okoli 5 mm.

Med poizkusnimi črpanji v črpalnih vrtinah smo vsak dan merili gladino podtalne vode v celotni mreži piezometrov na Sorškem polju. Na ta način smo dobili jasno sliko o naravnih nihanjih podtalne vode v odvisnosti od padavin in stanja vode v Savi. Podatke o nihanju gladine Save in gladine podtalnice v nekaterih piezometrih, ki so opremljeni z limnigrafi, je dala Hidrološka služba zveze vodnih skupnosti Slovenije. Nihanja gladine Save in podtalne vode v vzdolžnem profilu od Save pri Drulovki do Jeprce kaže tabla 2.

S poizkusnimi črpanji smo pričeli sredi marca 1975 pri izredno nizkem stanju podtalne vode. Takoj po pričetku poizkusnega črpanja so se začele močne padavine, ki so s prekinitvami trajale do 8. 4. 1975. Vmes je 4. 4. 1975 še močno narasla Sava, kar vse je povzročilo močan porast gladine podtalne vode na celotnem Sorškem polju. Po 10. 4. 1975 se je začela gladina podtalne vode postopoma zniževati.

Podatki nihanj gladine podtalne vode v piezometrih na Sorškem polju so nam rabili za korekcijo znižanja gladin med poizkusnim črpanjem. Razen tega smo po podatkih nihanj gladine Save in obrežnih piezometrov kontrolirali račun efektivne poroznosti po enačbi ruskih avtorjev A. V. Lebedeva in N. N. B i n d e m a n a s pogojem, da ni infiltracije iz padavin.

$$R(\lambda) = \frac{\Delta H}{\Delta H_0}$$

ΔH_0 = porast ali padec gladine v reki ali najbližjem piezometru v času t od pričetka naraščanja ali upadanja gladine

ΔH = porast ali padec gladine v drugem piezometru v času t

$R(\lambda)$ je funkcija enaka $4i^2 \operatorname{erfc} \lambda$.

Vrednost λ se odčita iz tabele na strani 75 knjige »Bilans podzemnih voda« avtorja A. V. L e b e d e v a.

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}. \text{ Iz te enačbe je mogoče izračunati koeficient gladinske prevodnosti,}$$

$$a = \frac{x^2}{4 \lambda^2 t}$$

$$a = \text{koeficient gladinske prevodnosti} \quad \frac{k \cdot H}{S}$$

x = razdalja med piezometrom in bregom reke, ali pa med dvema piezometroma, ki sta postavljena v smeri toka podtalne vode pravokotno na breg reke.

t = čas od pričetka naraščanja ali upadanja gladine reke ali piezometra v bližini reke.

Pri računu smo uporabili podatke upadanja gladine v piezometrih S-38 in S-24 v Drulovki v času 10. 4. do 20. 4. 1975 po visokem valu Save (tabla 2), ko ni bilo bistvenih padavin.

$$R(\lambda) = \frac{\Delta H_{S-24}}{\Delta H_{S-30}} = \frac{-0,58}{-0,85} = 0,682$$

$$R(\lambda) = 4 i^2 \operatorname{erfc} \lambda = 0,682.$$

Iz tabele dobimo za λ vrednost 0,16. Iz znane vrednosti za λ izračunamo vrednost koeficienta

$$a = \frac{x^2}{4 \lambda^2 t} = \frac{360\,000}{4 \cdot 0,0256 \cdot 864\,000} = 4,069 \text{ m}^2/\text{s}$$

x = razdalja med piezometrom S-36 in S-24 = 600 m.

Koeficient gladinske prevodnosti a je enak:

$$a = \frac{k \cdot H}{S}$$

Iz tega dobimo vrednost za efektivno poroznost S

$$S = \frac{k \cdot H}{a}$$

Srednja vrednost koeficienta prepustnosti k na Sorškem polju je $k_{sr} = 1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s. Predstavlja aritmetično sredino vseh vrednosti koeficienta k , izračunanih iz podatkov poizkusnega črpanja v vrtinah SOV-51, SOV-53 in v vodnjaku Iskre (tabela 1).

Tabela 1. Srednja vrednost koeficienta prepustnosti na Sorškem polju

Vodnjak, vrtina	Koeficient prepustnosti k			
	po Jacobu	po Theisu iz dviga	po Thiemu	po Hantushu
Iskra				$2,72 \cdot 10^{-2}$
SOV-51	$7,21 \cdot 10^{-2}$	$5,55 \cdot 10^{-2}$		
SOV-53		$1,132 \cdot 10^{-2}$ $2,265 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	

Koeficient $k_{sr} = 1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s.

Debelina vodonosne plasti H je na območju med vrtinama S-36 in S-24 77 m. Iz znanih vrednosti za k in H dobimo vrednost za efektivno poroznost S

$$S = \frac{k \cdot H}{a} = \frac{0,0119,77}{4,069} = 0,225 = 22,5 \%$$

Če pa privzamemo za koeficient k vrednost, izračunano po podatkih upadanja gladine pri črpalnem poizkusu na vrtini SOV-51 v Godešiču, dobimo za efektivno poroznost vrednost

$$S = \frac{0,00721,77}{4,069} = 0,136 = 13,6 \%$$

Ta vrednost se zelo dobro ujema z vrednostjo, izračunano po podatkih črpanja na isti vrtini (13,2 %).

Podobno kot pri Drulovki smo izračunali efektivno poroznost S tudi pri Bregu. V ta namen smo dobili podatke o nihanju gladine Save na limnigrafu Prebačevo in v piezometru S-35, ki je oddaljen od savskega brega 200 m. V računu smo upoštevali podatke upadanja gladine v času od 8. 4. do 13. 4. 1975, ko ni bilo bistvenih padavin.

$$R(\lambda) = \frac{\Delta H_{s,1s}}{\Delta H_{Sava}} = \frac{-1,64}{-2,02} = 0,811$$

$$R(\lambda) = 4 \lambda^2 \operatorname{erfc} \lambda = 0,811$$

Po tabeli je vrednost $\lambda = 0,09$

$$a = \frac{r^2}{4 \lambda^2 t} = \frac{40\,000}{4 \cdot 0,0081 \cdot 5,86400} = 2,86 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$a = \frac{k_{ef} \cdot H}{S} \quad S = \frac{k_{ef} \cdot H}{a} = \frac{0,0119,60}{2,86} = 0,249 = 24,9 \%$$

Debelina vodonosne plasti na Bregu je 60 m.

Izračunane vrednosti efektivne poroznosti se dokaj dobro ujemajo s Tovdoviimi (1959) podatki za prod (25 do 30 %). Verjetno pa je na Sorškem polju zaradi številnih vložkov dobro sprjetega konglomerata efektivna poroznost S manjša od efektivne poroznosti proda.

Sorazmerno visoke vrednosti za S smo dobili, kot kaže enačba

$$S = \frac{k \cdot H}{a}$$

bodisi zaradi previsoke vrednosti koeficienta prepustnosti k , ali pa zato, ker se podtalna voda pretaka le skozi zgornji del vodonosne plasti H in je zaradi tega v enačbo vstavljena vrednost za H prevelika. Po Ubellovih (1961) podatkih se namreč v zelo debelem vodonosniku premika podtalna voda le skozi njegov zgornji del, medtem ko se v spodnjem delu skoraj ne premika.

Kot je znano, so pri računih zalog podtalne vode potrebni tako podatki o srednji vrednosti koeficienta prepustnosti k kot tudi efektivne poroznosti S . Zato je povsem umestno, da za vrednost efektivne poroznosti na Sorškem polju vzamemo srednjo vrednost vseh dobljenih podatkov.

$$S_{st} = \frac{0,132 + 0,225 + 0,249}{3} = 0,202 = 20,2 \%$$

Za srednjo vrednost efektivne poroznosti S na Sorškem polju bomo torej privzeli 20,2 %.

Na južnem obrobju polja, južno od Jeprce, kjer sestoji vodonosna plast iz mlajšepleistocenskega peščenega proda, smo poskusno črpali vodo iz vodnjaka C-5 v tovarni celuloze v Goričanah. Izračunali smo tudi koeficient prepustnosti k ; njegova vrednost pa je le približna, kajti na voljo so bili le podatki o znižanju gladine v vodnjaku. Debelina vodonosne plasti na kraju vodnjaka je $H = 4,17$ m. Iz vodnjaka se je 20 ur črpalo 43,5 l/s vode, gladina pa se je znižala za 0,47 m. V zadnjih 4 urah je bila gladina ustaljena.

Po podatkih črpanja smo izračunali koeficient prepustnosti k po Dupuitovi enačbi za vodonosnik s svobodno gladino

$$k = \frac{0,732 \cdot Q}{H^2 - h^2} \cdot \log \frac{R}{r} = \frac{0,732 \cdot 4,35 \cdot 10^{-2}}{4,175^2 - 3,705^2} \cdot \log \frac{300}{0,3} = 2,98 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

H = debelina vodonosne plasti pred črpanjem (m),

h = debelina vodonosne plasti med črpanjem ($H - s$),

R = polmer vpliva vodnjaka ~ 300 m,

r = polmer vodnjaka 0,3 m,

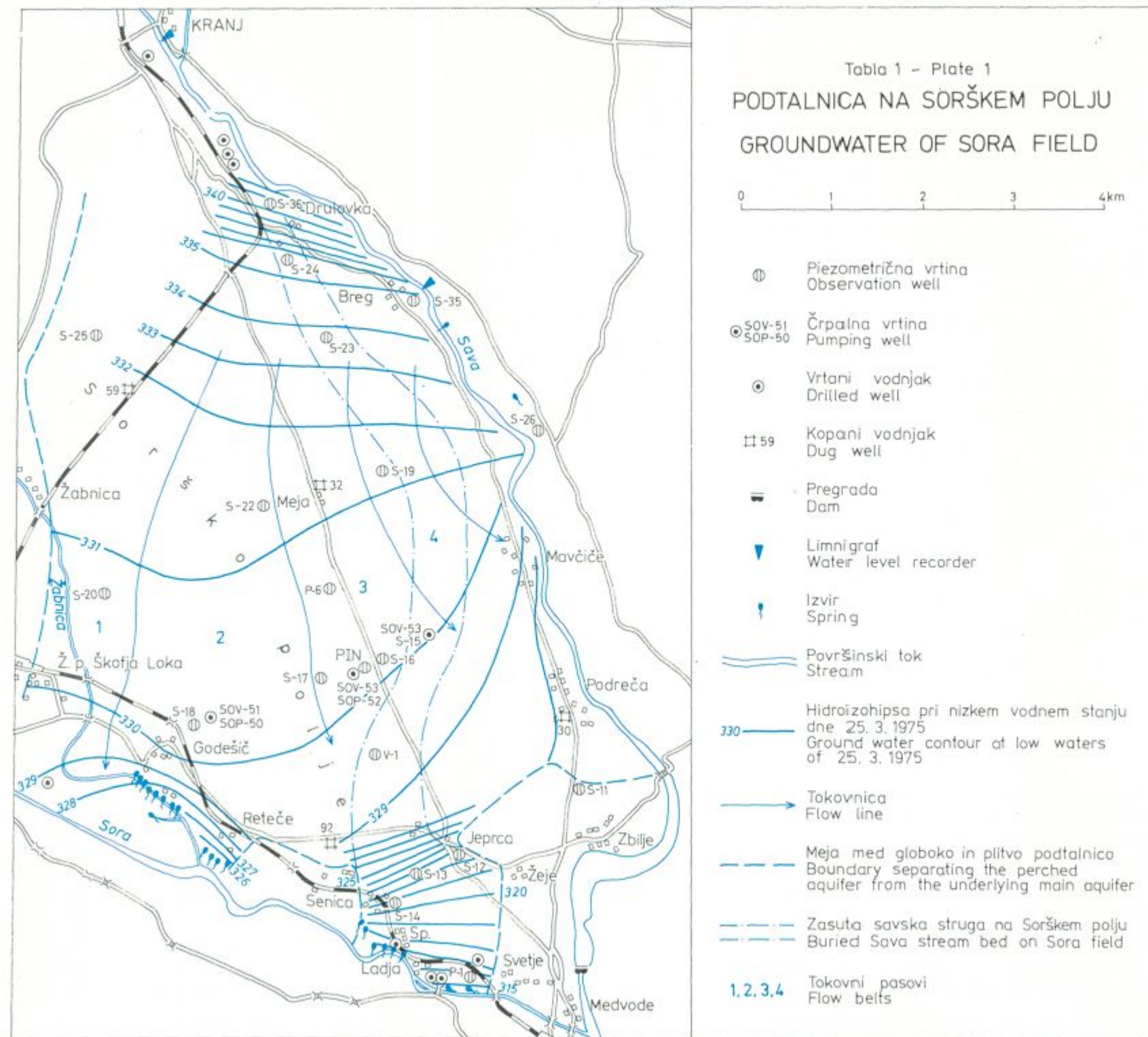
Q = črpana količina vode (m^3/s).

Iz vseh navedenih podatkov lahko povzamemo, da so najmanj prepustne konglomeratne in prodne plasti na severnem obrobju Sorškega polja pri Kranju, kjer je bila v vodnjaku Iskre določena vrednost koeficienta prepustnosti $k = 2,72 \cdot 10^{-2}$ m/s. Nekoliko bolj so prepustne konglomeratne in prodne plasti na jugozahodnem robu polja, kjer je v črpalni vrtni SOV-51 znašala vrednost koeficienta k $5,55 \cdot 10^{-2}$ do $7,21 \cdot 10^{-2}$ m/s. Znatno bolj prepustne so vodonosne plasti v osrednjem delu polja. V črpalni vrtni SOV-52 je bila določena vrednost koeficienta k $1,132 \cdot 10^{-2}$ do $2,265 \cdot 10^{-2}$ m/s. Zelo prepusten je mlajšepleistocenski prod na območju tovarne celuloze v Goričanah, kjer je znašala v vodnjaku C-5 vrednost koeficienta k $2,98 \cdot 10^{-2}$ m/s.

4.5. Zaloge podtalne vode na Sorškem polju

Na Sorškem polju so bile zaloge podtalne vode, predvsem dinamične, že večkrat ocenjene. Leta 1965 je Geološki zavod Ljubljana ocenil pretok podtalne vode po množini padavin in infiltraciji Save na $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Hidrometeorološki zavod SRS je leta 1968 ocenil pretok podtalne vode v osrednjem delu polja v profilu predvidenega črpališča na 1,3 do $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ocena je temeljila na ocenjeni vrednosti koeficienta prepustnosti k in strmcu gladine podtalne vode in se dokaj ujema s podatki meritev izvirov na levem bregu Sore, če upoštevamo porabo podtalne vode v tovarni celuloze v Goričanah. Ocenjeno je bilo, da je vse podtalne vode $1,523 \text{ m}^3/\text{s}$.

V letih 1965 do 1968 še ni bila znana vrednost koeficienta prepustnosti, zato tudi ni bilo mogoče točno izračunati pretočnih količin. V letih 1974 in 1975 so dala poizkusna črpanja v osrednjem delu polja ter na njegovem severnem in južnem robu dokaj zanesljive podatke o koeficientu prepustnosti. Po teh podatkih je srednja vrednost koeficienta prepustnosti na Sorškem polju $k = 1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s. Iz vrednosti k in iz karte hidroizohips za sušno stanje dne 25. 3. 1975, oziroma po podatkih o gladini v piezometrih in vodnjakih za isto



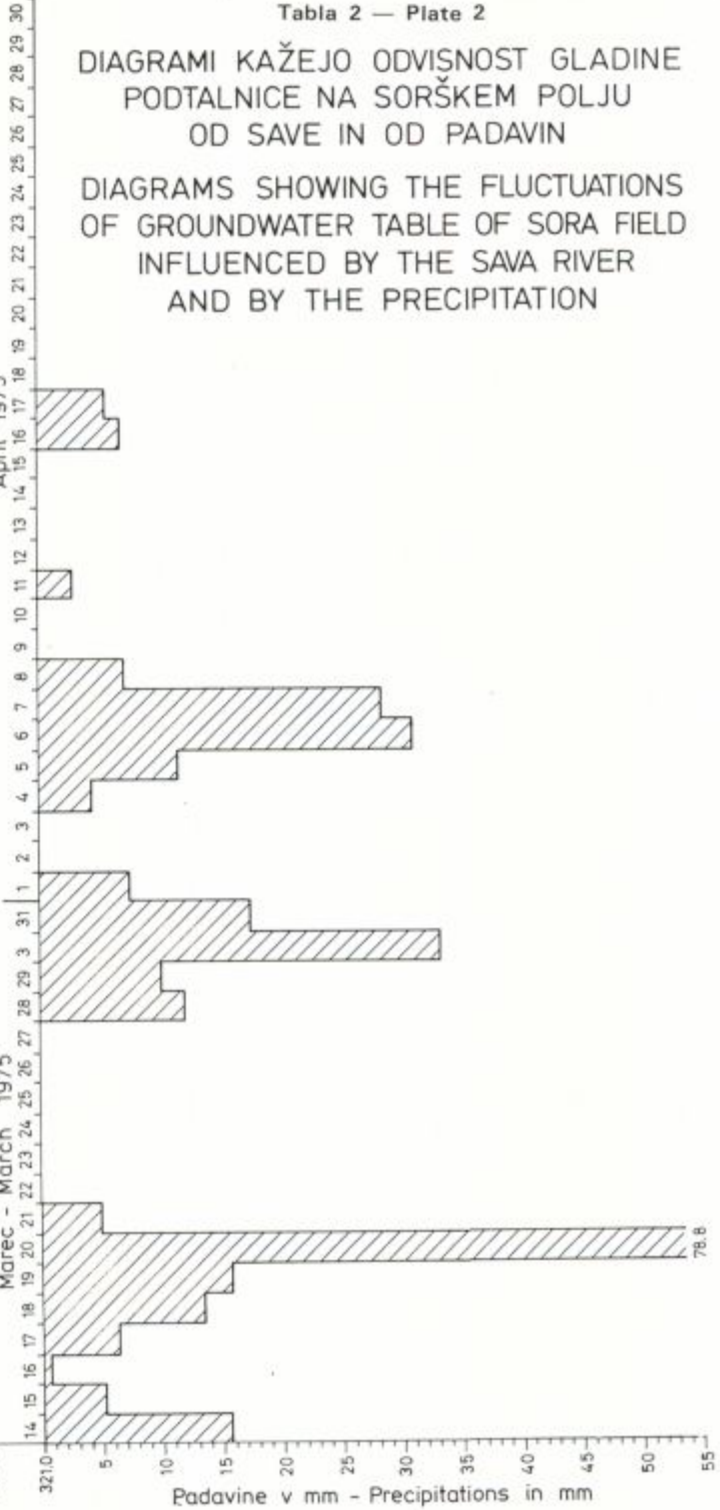
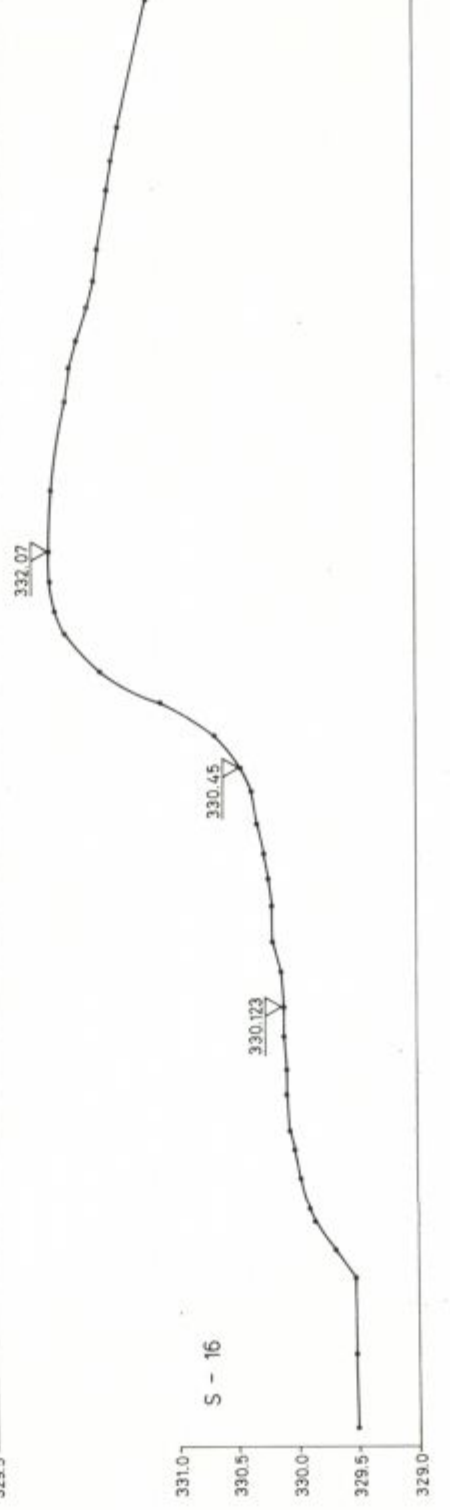
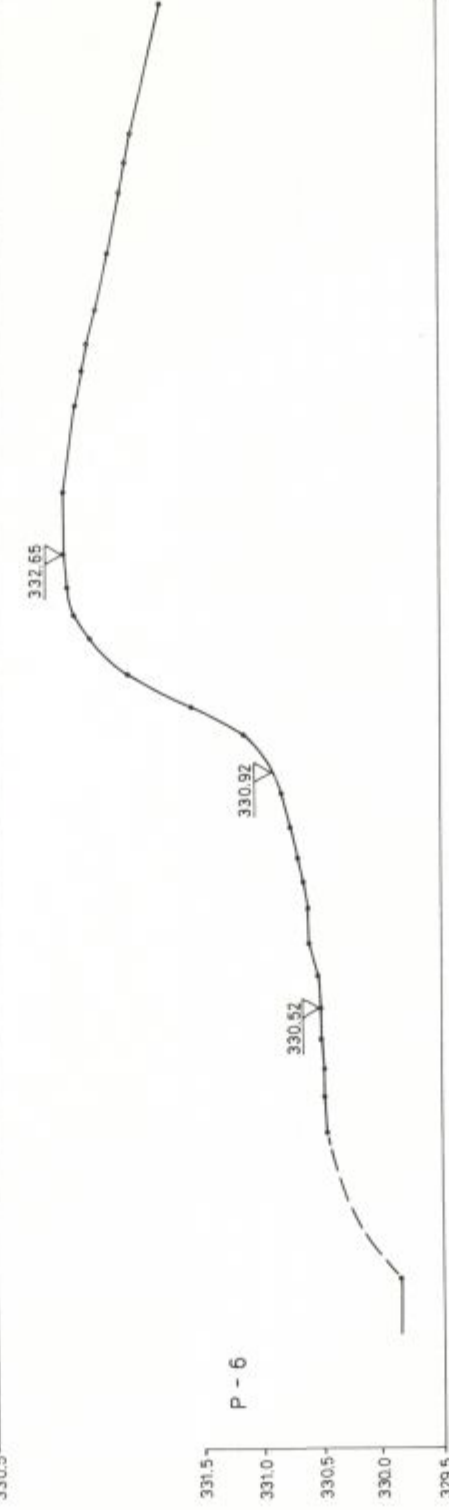
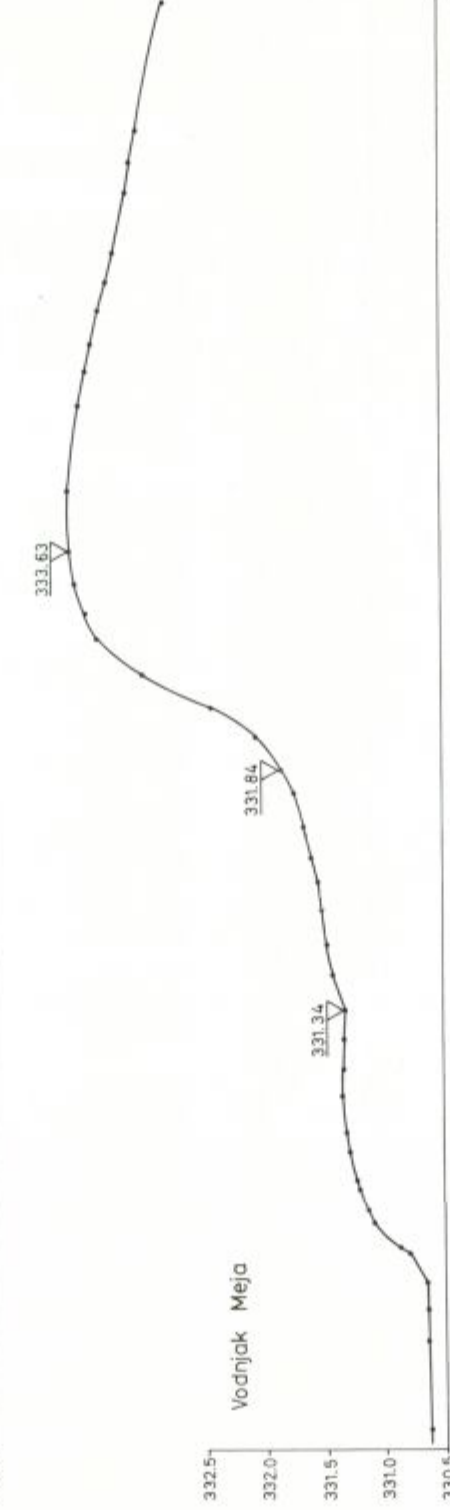
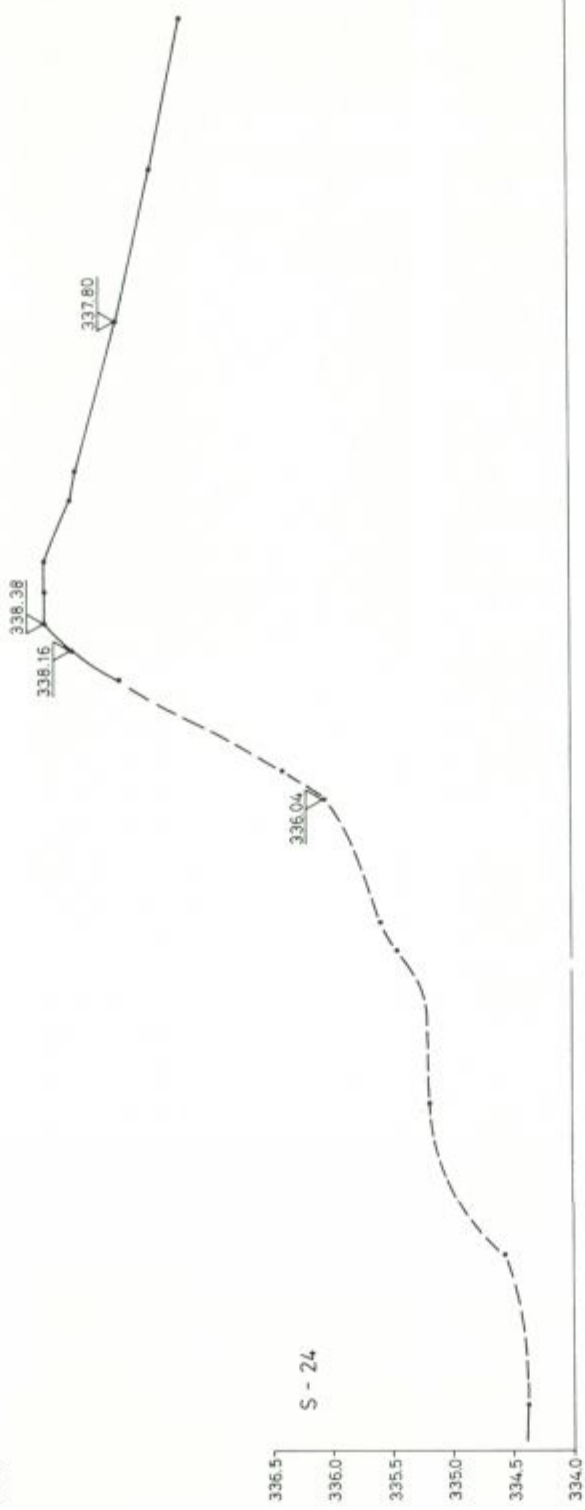
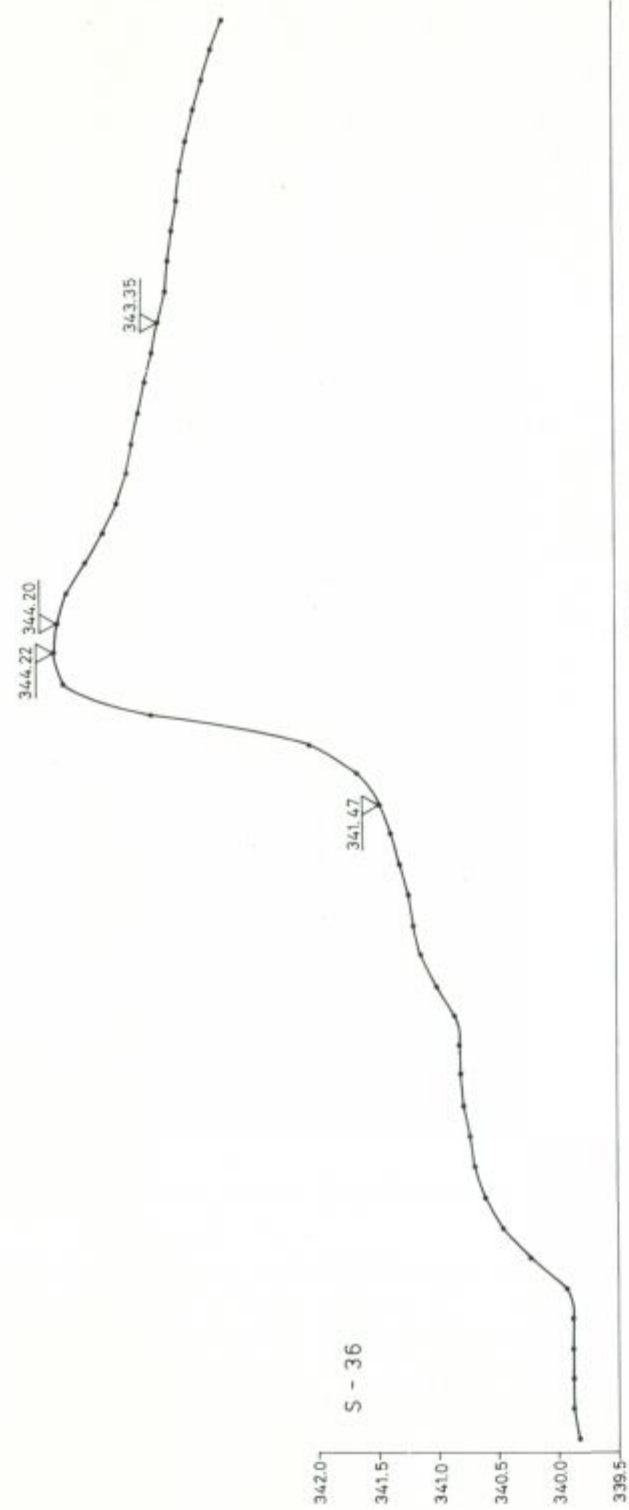
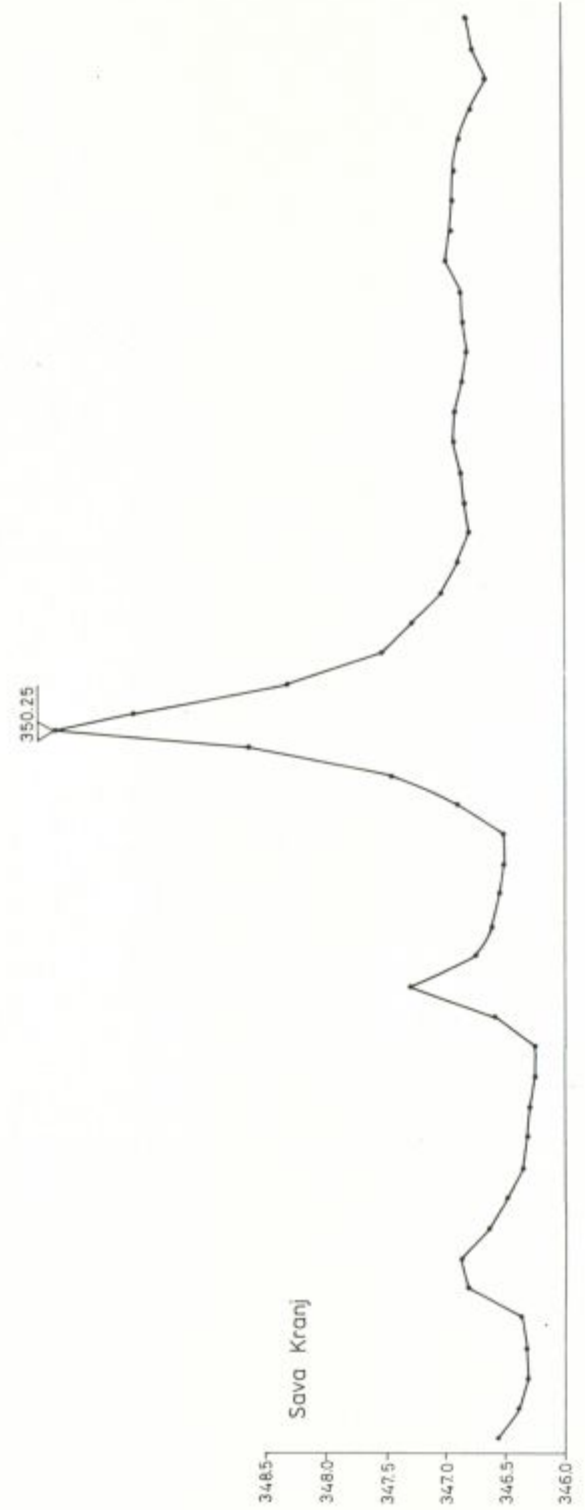


Tabla 2 - Plate 2

DIAGRAMI KAŽEJO ODVISNOST GLADINE
 PODTALNICE NA SORŠKEM POLJU
 OD SAVE IN OD PADAVIN

DIAGRAMS SHOWING THE FLUCTUATIONS
 OF GROUNDWATER TABLE OF SORA FIELD
 INFLUENCED BY THE SAVA RIVER
 AND BY THE PRECIPITATION

Tabela 2. Hidrogeološki podatki za računanje pretokov na Sorškem polju

Tokovni pas	Gladina podtalne vode v zgornjem in spodnjem preseku stanje 25.3.1975	Razdalja med zgornjim in spodnjim presekom	Kota neprepustne podlage v zgornjem in spodnjem preseku	b ₁ , b ₂ Širina tokovnega pasa v zgornjem in spodnjem preseku	h ₁ , h ₂ Debelina vodonosne plastl v zgornjem in spodnjem preseku	k Širinec nepropustne podlage	k Širinec gladine podtalne vode
1. pas	331,0 m	1550 m	290,0 m	1000 m	41	0,01813	0,00065
Zabnica—Trata	330,0 m		315,0 m	1000 m	15		
2. pas	331,0 m	2200 m	275,0 m	1800 m	56	0,01138	0,00045
Dobrava—Godešič	330,0 m		300,0 m	2600 m	30		
3. pas	331,0 m	1700 m	265,0 m	1000 m	68	0,01765	0,00059
Meja—Reteško polje	330,0 m		295,0 m	1700 m	35		
4. pas	331,0 m	1350 m	260,0 m	600 m	71	0,0222	0,00074
Breg—Mavčiče	330,0 m		290,0 m	1050 m	40		

stanje ter o debelini vodonosne plasti smo izračunali pretok podtalne vode skozi osrednji del Sorškega polja. V računu nismo upoštevali pretoka plitvo ležeče podtalne vode na zahodnem obrobju polja, ki pa je v sušnem obdobju neznaten.

Tok podtalne vode smo razdelili na 4 tokovne pasove (tabla 1). Podtalna voda v prvem pasu se pod površjem izliva v Soro. V manjši meri jo izkorišča industrija na Trati, medtem ko črpališče v Lípici z zmogljivostjo 10 l/s vode začasno ne obratuje. Podtalna voda v drugem pasu se izliva v izvire pod Godešičem in Retečami. Podtalna voda v tretjem pasu se izliva v izvire pod Senico in Ladjo. V večji meri jo izkorišča tovarna celuloze v Medvodah (200 l/s) ter črpališči v Senici in na Svetju (okrog 10 l/s). Podtalna voda v četrtem pasu se izliva pod vodno gladino nazaj v Savo na območju med Mavtičami in Podrečo.

Iz tega opisa jasno vidimo, da lahko praktično izmerimo in točno ocenimo le pretok v drugem in tretjem pasu na ta način, da izmerimo izdatnost izvirov in količino črpane vode v črpališčih. Pretok podtalne vode v ostalih dveh pasovih lahko izračunamo le teoretično.

Pretok podtalne vode v posameznih pasovih smo računali po enačbi Pavlovskega za pretok podtalne vode skozi vodonosno plast enakomerne prepustnosti in nagnjeno neprepustno podlago (v našem primeru se podlaga dviga v smeri toka podtalne vode).

$$Q = k \cdot h_0 \cdot i_n \cdot \frac{b_2 - b_1}{\ln b_2 - \ln b_1}$$

k - koeficient prepustnosti (m/s),

i_n = naklon površja neprepustne podlage,

b_2 = širina tokovnega pasu v spodnjem delu (hidroizohipsa 330 m),

b_1 = širina tokovnega pasu v zgornjem delu (hidroizohipsa 331 m),

h_0 = izračunana debelina vodonosne plasti (m).

Vrednost parametra h_0 izračunamo s približevanjem po enačbi

$$i_n \cdot L = h_0 [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)]$$

L = razdalja med zgornjim in spodnjim presekom v posameznih pasovih (hidroizohipsi 331 in 330 m)

$$\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}, \quad \eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$$

h_1 = debelina vodonosne plasti v posameznih pasovih v zgornjem preseku (hidroizohipsa 331),

h_2 = debelina vodonosne plasti v posameznih pasovih v spodnjem preseku (hidroizohipsa 330 m).

Vrednosti funkcij $\varphi(\eta_1)$ in $\varphi(\eta_2)$ dobimo iz tabel avtorja enačbe (Aljiovski, 1973, Hidrogeološki priručnik str. 150—153). Pri izbiranju vrednosti h_0 je treba upoštevati, da je pri nasprotnem naklonu neprepustne podlage

$$h_0 < \frac{h_1 + h_2}{2} i_j$$

i_j = strmec gladine podtalne vode v posameznem pasu.

V računu pretokov podtalne vode v posameznih pasovih smo se oslanjali na doslej zbrane hidrogeološke podatke na območju med hidroizohipsama

331 m in 330 m (tabla 1). Zaradi preglednosti podajamo podatke za račun v tabeli 2.

Pretek podtalne vode v posameznih pasovih smo podali v tabeli 3. Kot smo že omenili, smo ga računali po enačbi Pavlovskega

$$Q = k \cdot i_0 \cdot h_0 \cdot \frac{b_2 - b_1}{\ln b_2 - \ln b_1}$$

Izjemno smo v prvem pasu računali po enostavnejši enačbi, ker je širina pasu enakomerna.

$$Q = k \cdot i_0 \cdot h_0 \cdot B$$

B = širina pasu.

V računu smo za vrednost koeficienta prepustnosti privzeli $1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s, kar je srednja vrednost vseh doslej znanih podatkov na Sorškem polju. V obrobnem prvem pasu smo privzeli manjšo vrednost koeficienta prepustnosti k , ker imajo tu vodonosne plasti znatno več meljne primesi kot v ostalem delu polja. Zaradi tega smo privzeli za vrednost koeficienta k $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, kar je približno enako najnižji vrednosti, dobljeni pri črpalnih poizkusih v vrtinah SOV-51, SOV-53 in SOV-54.

Izračunani pretok v 2. in 3. pasu je mogoče kontrolirati z meritvami izdatnosti izvirov. Podtalna voda se v drugem pasu izliva v izvire pod Godešičem in Retečami, v tretjem pasu pa v izvire pod Senico in Ladjo. Na žalost ni podatkov o izdatnosti izvirov pri nizkem stanju podtalne vode, pač pa imamo podatke za srednje stanje z dne 7. 7. 1975. Podatke meritev smo podali v tabeli 4.

Tabela 4 kaže, da je skupen pretok izvirov pod Godešičem in Retečami, v katere odteka podtalna voda iz 2. pasu, 386 l/s. Skupen pretok izvirov pod Senico in Ladjo, kamor odteka podtalna voda iz 3. pasu, je 454 l/s. Pri tem smo upoštevali tudi podtalno vodo, ki jo črpajo v črpališčih tovarne celuloze v Goricanah, v Senici in na Svetju. Analiza vode v črpališču tovarne celuloze kaže, da je voda zelo trda, saj doseže $13,9^\circ \text{n}$, enako kot voda iz črpališča Svetje ($13,8$ do $14,5^\circ \text{n}$); zato ni dvoma, da prihaja iz Sorškega polja. Sora pri Medvodah ima trdoto $9,1^\circ \text{n}$. Ti podatki govorijo proti mišljenju, da v črpališče tovarne celuloze doteka voda tudi iz Sore.

Primerjava skupne izdatnosti izvirov pod Godešičem in Retečami z izračunanim pretokom v 2. pasu kaže, da je izračunani pretok znatno večji od skupne izdatnosti izvirov, posebno če upoštevamo, da je bila izdatnost izvirov izmerjena pri srednjem stanju vode, pretok v 2. pasu pa je bil izračunan pri nizkem stanju. Iz tega sklepamo, da je na območju 2. pretočnega pasu koeficient prepustnosti k manjši od povprečne vrednosti koeficienta prepustnosti na Sorškem polju ($1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s). Verjetno se približuje vrednosti $7,21 \cdot 10^{-3}$ m/s, ki je bila določena v vrtini SOV-51. Če privzamemo za vrednost koeficienta prepustnosti k $8 \cdot 10^{-3}$ m/s, dobimo za pretok v 2. pasu vrednost

$$Q = 0,008 \cdot 0,1136 \cdot 1,62 \cdot 2162 \cdot 0,316 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ta je sicer manjša od skupne izdatnosti izvirov pod Godešičem in Retečami, vendar moramo upoštevati, da so bili izviri merjeni pri srednjem stanju vode, pretok pa računani pri nizkem stanju.

Izračunani pretok v 3. pasu se ujema z izdatnostjo izvirov, h kateri prištetimo še količino črpane vode v tovarni celuloze. Če upoštevamo, da je pretok

Tabela 3. Pretok vode na Sorškem polju

Pas	k	i_n	h_n	$\frac{b_2 - b_1}{\ln b_2 - \ln b_1}$	Q (m ³ /s)
1. pas	0,005	0,01613	1	$B = 1000$	0,080
2. pas	0,0119	0,01136	1,62	2162	0,473
3. pas	0,0119	0,01765	1,85	1318	0,456
4. pas	0,0119	0,0222	1,67	805	0,355
Skupaj					1,364

Tabela 4. Izdatnost izvirov pod Godeškem, Retečami, Senico in Ladjo z dne 7. 7. 1975

Izvirno območje	Izvir	Pretok l/s
Godešček—Reteče	struga v Retečah pri mostu minus Zabnica	332
	studenčnica pod Retečami	31
	Izvir št. 26	23
Skupaj		386
Senica—Ladja	studenčnica pod Sp. Senico	60
	izviri pod Sp. Senico	35
	izvir pod mostom v Goridanah	90
	izvir pri Jurčiču	54
	manjši izviri nad Soro	5
	črpališče tovarne celuloze	200
	črpališči Svetlje in Senica	10
Skupaj		454

izračunan pri nizkem stanju vode, izdatnost izvirov pa je bila merjena pri srednjem stanju, tedaj je verjetno koeficient prepustnosti k na območju 3. pasu nekoliko večji od srednje vrednosti za Sorško polje ($1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s). Druga možnost pa je, da je bila izdatnost izvirov prenizko ocenjena; voda namreč ponekod izvira pod gladino Sore in tam izvirov ni mogoče točno izmeriti. V tem primeru je koeficient prepustnosti $k = 1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s v tem pasu povsem upravičeno upoštevan v računu pretoka.

Skupen pretok podtalne vode skozi osrednji del Sorškega polja je, upoštevajoč zgornji popravek, 1,209 m³/s. Pretoka skozi prvi pas, ki doseže le 0,080 m³/s, ne bi bilo vredno izkoristiti za vodopreskrbo, ker je količina vode sorazmerno

majhna, poleg tega pa ga v precejšnji meri že izkorišča industrija na Trati. Tudi kvaliteta podtalne vode na območju tega pasu verjetno ne ustreza zaradi pronicanja onesnažene vode iz potoka Žabnica. Skupen pretok skozi ostale tri pasove je 1,129 m³/s in ga bo mogoče v celoti izkoristiti za vodopreskrbo.

4.6. Bilanca podtalne vode na Sorškem polju

Ze leta 1968 je bil v poročilu o geoloških in hidrogeoloških razmerah na Kranjsko-sorškem polju, ki ga je izdelal Geološki zavod Ljubljana, podan približen račun, po katerem naj bi od skupnega pretoka 1,2 m³/s podtalne vode na Sorškem polju približno 1 m³/s odpadlo na infiltracijo padavin, 0,2 m³/s pa na infiltracijo Save. Račun temelji na oceni evapotranspiracije po enačbi L. Turca,

$$E_r = \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}}$$

E_r = evapotranspiracija v mm,

P = povprečna letna višina padavin v mm (v Kranju 1537 mm),

$L = 300 + 25t + 0,05t^2$,

t = povprečna letna temperatura (v Kranju 10,3°C).

Po tej enačbi je evapotranspiracija na Sorškem polju 537 mm na leto, medtem ko naj bi v podtalno vodo odtoklo ostalih 964 mm od celotne letne višine padavin 1537 mm. Površinskega odtoka namreč na Sorškem polju ni, razen v skrajnem zahodnem obrobju.

Novejša opazovanja nihanja gladine Save in podtalne vode na Sorškem polju pa so pokazala veliko odvisnost gladine podtalne vode od gladine Save, kar kaže na močno pronicanje rečne vode v podtalnico (tabla 2 in sl. 2). Zato smo ponovno ocenili pronicanje padavinske vode v podtalnico po opazovanjih nihanja gladine v treh piezometrih na osrednjem delu Sorškega polja po enačbi G. N. Kamenskoga:

$$W = 1000 \cdot S \frac{\Delta H}{\Delta t} \frac{1000 \cdot k}{l_{n-1,n} + l_{n,n+1}} \left[\frac{(h_{n-1,s+1} + h_{n,s+1})(H_{n-1,s+1} - H_{n,s+1})}{l_{n-1,n}} - \frac{(h_{n,s+1} + h_{n+1,s+1})(H_{n,s+1} - H_{n+1,s+1})}{l_{n,n+1}} \right]$$

W = intenziteta pronicanja padavinske vode v določenem obdobju v mm/dan,

S = efektivna poroznost,

ΔH = sprememba gladine v srednjem piezometru (P-6) v določenem časovnem obdobju Δt ; H je izražen v metrih, Δt pa v dnevih,

k = koeficient prepustnosti v m/dan,

$l_{n-1,n}$ = razdalja v metrih med zgornjim in srednjim piezometrom (vodnjak Meja — P-6),

$l_{n,n+1}$ = razdalja v metrih med srednjim in spodnjim piezometrom (P-6 — S-16),

$h_{n-1,s+1}, h_{n,s+1}, h_{n+1,s+1}$ = debelina vodonosne plasti v presekih $n-1, n$ in $n+1$ v trenutku $s+1$ (dne 5. 4. 1975, sredina opazovalnega obdobja),

$H_{n-1,s+1}, H_{n,s+1}, H_{n+1,s+1}$ = kota gladine vode v presekih $n-1, n, n+1$ v trenutku $s+1$ (dne 5. 4. 1975).

Za račun smo uporabili podatke o močnem dviganju gladine podtalne vode v piezometrih: vodnjak na Meji, P-6 in S-16 v času od 28. 3. 1975 do 12. 4. 1975 (tabla 2). V vodnjaku na Meji je postavljen limnigraf, gladine v piezometrih P-6 in S-16 pa smo merili ročno vsak dan. Za srednjo gladino omenjenega časovnega razdobja smo privzeli podatke meritev z dne 5. 4. 1975. V enačbo smo vstavili za posamezne parametre naslednje vrednosti:

$$S = 0,225 \text{ (določena pri Drulovki),}$$

$$\Delta H = 2,13,$$

$$\Delta t = 15,$$

$$k = 0,0119 \text{ m/s} = 1028,16 \text{ m/dan (srednja vrednost za Sorško polje),}$$

$$l_{n-1,n} = 1000 \text{ m,}$$

$$l_{n,n+1} = 950 \text{ m,}$$

$$h_{n-1,s+1} = 56,84 \text{ m,}$$

$$h_{n,s+1} = 50,87 \text{ m,}$$

$$h_{n+1,s+1} = 38,95 \text{ m,}$$

$$H_{n-1,s-1} = 331,84,$$

$$H_{n,s-1} = 330,92,$$

$$H_{n+1,s-1} = 330,45.$$

Napajanje podtalne vode iz padavin W je po teh vrednostih na območju med vodnjakom na Meji ter piezometroma P-6 in S-16:

$$W = 1000 \cdot 0,225 \cdot \frac{2,13}{15} - \frac{1000 \cdot 1028,16}{1950} \left[\frac{(56,84 + 50,87) \cdot (331,84 - 330,92)}{1000} - \frac{(50,87 + 38,95) \cdot (330,92 - 330,45)}{950} \right] = 3,06 \text{ mm/dan}$$

V celotnem opazovalnem obdobju od 28. 3. do 12. 4. 1975 pa je prispevalo k porastu podtalne vode $W \cdot \Delta t$ padavinske vode, tj. 45,9 mm. V istem časovnem razdobju je porasla podtalna voda v celoti za vrednost:

$$1000 \cdot S \cdot \Delta H = 1000 \cdot 0,225 \cdot 2,13 = 479,35 \text{ mm}$$

Iz tega sledi, da je razlika med podzemljskim dotokom in odtokom na opazovanem območju enaka

$$Q_1 - Q_2 = 1000 \cdot S \cdot \Delta H - W \cdot \Delta t = 479,35 - 45,9 = 433,45 \text{ mm}$$

Positivna razlika med podzemljskim dotokom in odtokom, ki je v glavnem prispevala k porastu podtalne vode v opazovalnem razdobju, je nastala z močnim podzemljskim dotokom s severa (opazovani piezometri Meja — P-6 — S-16 leže približno v smeri sever—jug), torej iz Save. Delež padavin pri porastu zalog v opazovalnem razdobju je le 8,2 %, ostalo tj. 90,8 % je pripisati dotoku iz močno narasle Save.

Račun ni povsem verjeten, kajti v opazovalnem obdobju je padlo 163,7 mm padavin, od katerih naj bi izhlapelo $163,7 - 45,9 = 117,8$ mm padavin. Tolikšna evapotranspiracija v tem razdobju ni možna, kajti tedaj so prevladovale nizke temperature, rastlinje pa sploh še ni ozelenelo. Iz tega lahko sklepamo, da bilančna enačba Kamenskega ni uporabna na osrednjem delu Sorškega polja, ker tokovnice niso vzporedne (tabla 1), bodisi zato, ker neprepustna

podlaga ni vodoravna, ampak se izrazito dviga v smeri toka podtalne vode. Možno je tudi, da se podtalna voda premika zaradi velike debeline vodonosnika samo skozi njegov vrhni del in se zato vsi hidrogeološki parametri močno razlikujejo od izračunanih.

Zaradi nezanesljivosti računa infiltracije padavin po enačbi Kamenškega na osrednjem delu Sorškega polja smo izračunali infiltracijo padavin še za območje pri Drulovki, kjer se podtalna voda intenzivno napaja iz Save. Uporabili smo enačko A. V. Lebedeva za pribrežno območje podtalne vode

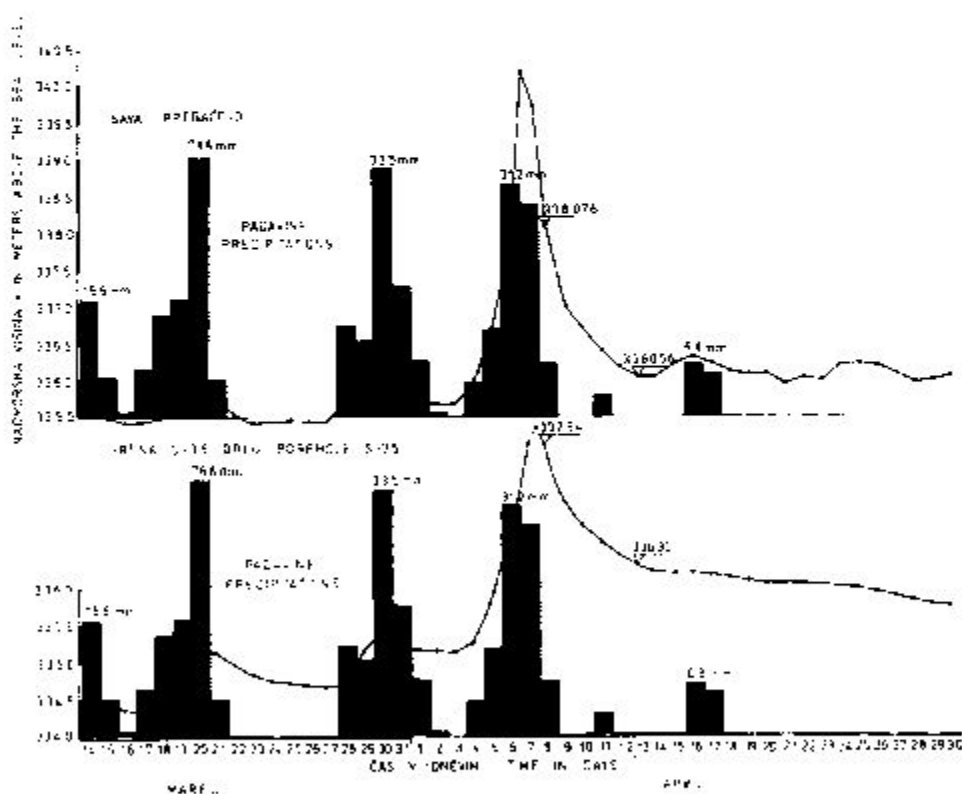
$$W \cdot \Delta t = S \cdot \frac{H - H_0}{1 - R} \cdot R(\Delta t)$$

$W \cdot \Delta t$ = infiltracija padavin v podtalno vodo v razdobju Δt ,

H_0 = porast gladine v piezometru bliže reki v obdobju Δt ,

H = porast gladine v piezometru, ki je bolj oddaljen od reke v obdobju Δt .

Ostale oznake so znane še iz prejšnjih izvajanj na straneh 269 in 270.



Sl. 2. Diagram kaže nihanje podtalnice pri Bregu na Sorškem polju v odvisnosti od Save in padavin

Fig. 2. Diagram showing the fluctuations of groundwater at the Breg village in the Sora field influenced by the Sava River and by the precipitation

V enačbo smo vstavili podatke o gladini v piezometrih S-36 in S-24 v Drulovki v razdobju od 4. 4. do 9. 4. 1975, ko je Sava močno narasla, obenem pa je bilo tudi veliko padavin.

$\Delta H_0 = 2,85$ m (porast gladine v piezometru S-36),

$\Delta H = 2,12$ m (porast gladine v piezometru S-24),

$R(\lambda) = 0,682$ (določen po podatkih upadanja gladine v piezometrih S-36 in S-24 po enačbi:

$$R(\lambda) = \frac{\Delta H}{\Delta H_0}$$

$S = 0,225$,

$$W \cdot \Delta t = S \cdot \frac{2,12 - 2,85 \cdot 0,682}{0,318} = 0,226 \text{ m}$$

Iz tega lahko izračunamo razliko med dotokom in odtokom iz opazovanega območja v času Δt , ki je enaka napajanju iz Save, po enačbi

$$Q_1 - Q_2 = S \cdot \frac{\Delta H + \Delta H_0}{2} - W \cdot \Delta t = 0,225 \cdot 2,38 - 0,226 = 0,309 \text{ m}$$

Po tem računu je na območju Drulovke podtalna voda narasla v času od 4. 4. do 9. 4. 1975 povprečno za 0,535 m, od česar odpade na infiltracijo Save 0,309 m ali 57,7% in na padavine 0,219 m ali 42,2%. Pripominjamo, da pri tem porastu ne gre za zvišanje gladine podtalnice, temveč se nanaša ta porast le na tisto količino vode, ki ustreza efektivni poroznosti. Ta račun je verjetno mnogo bližje resnici kot prejšnji za osrednji del Sorškega polja po enačbi Kamenskega. Tod je namreč tok podtalne vode vzporeden, neprepustna podlaga pa je verjetno vodoravna.

Izračunana infiltracija padavin v podtalno vodo (0,226 m) je mnogo večja, kot je bilo padavin v tem obdobju. Nastalo razliko si lahko razložimo s tem, da porabijo padavine za precejanje do podtalne vode skozi vrhnje konglomeratne in prodne plasti precej časa. Če predpostavljamo, da se je v opazovalnem obdobju precedila do podtalne vode padavinska voda iz prejšnjega deževnega obdobja od 14. 3. do 1. 4. 1975, ko je padlo 220 mm padavin, tedaj je izračunana infiltracija padavin 226 mm previsoka; nekaj padavinske vode je namreč prav gotovo izhlapelo. Iz tega pa lahko sklepamo, da je bil delež Save pri napajanju podtalnice na območju Drulovke v obdobju od 4. 4. do 9. 4. 1975 vsekakor večji kot 57,7%.

Zgornji podatki kažejo, da ni zanesljiv račun bilance niti po enačbi Kamenskega niti po Lebedevu; zato smo izračunali še srednji porast podtalne vode na Sorškem polju severno od črte Godešič—Mavčiče v deževnem obdobju od 14. 3. 1975 do 12. 4. 1975, ko se je deževje končalo. V tem času je padlo 0,303 m padavin. Od izračunanega porasta podtalne vode smo odšteli vse padavine v tem obdobju in na ta način dobili delež Save pri porastu podtalne vode. Privzeli smo, da se je celotna količina padavin precedila v podtalno vodo.

Srednji porast podtalne vode v tem obdobju je

$$S \cdot \Delta H_0 = 0,225 \cdot 3,28 = 0,738 \text{ m}$$

ΔH_{sr} – srednji porast gladine.

Če od tega odštejemo padavine v tem času, dobimo delež Save pri porastu podtalne vode

$$0,738 - 0,303 = 0,435 \text{ m ali } 58,9\%$$

Delež padavin pri porastu podtalne vode je 0,303 m ali 41,1 %.

Ta podatek se verjetno povsem naključno ujema z računom na območju pri Drulovki. Sodimo, da tudi ta zadnja ocena ni povsem zanesljiva. Del padavin, čeprav verjetno ne prav velik, ker rastlinje še ni ozelenelo in so prevladovala nizke temperature, je prav gotovo izhlapel. Iz tega pa sledi, da je bil delež Save pri porastu zalog podtalne vode na Sorškem polju v obdobju od 14. 3. do 11. 4. 1975 večji od 58,9 %. Verjetno bi k razjasnitvi tega problema prispevala daljša opazovanja nihanja gladine podtalne vode in Save.

Za nazornejšo predstavbo, kolikšen je bil porast zalog podtalne vode na Sorškem polju v času od 14. 3. do 12. 4. 1975 severno od črte Godešič—Mavčiče, bomo izračunali prostornino vode, ki jo vsebuje vodonosna plast med nizko in visoko gladino podtalnice po enačbi:

$$\Delta V = \Delta H_{sr} \cdot S \cdot F = 3,28 \cdot 0,225 \cdot 22\,000\,000 = 16\,236\,000 \text{ m}^3,$$

ΔH_{sr} — srednji porast gladine na obravnavanem območju (3,28 m) v času od 14. 3. do 12. 4. 1975,

$$S = 0,225,$$

$$F = 22\,000\,000 \text{ m}^2 \text{ (površina obravnavanega območja)}.$$

Ta količina bi zadostovala za 188 dni neprekinjenega obratovanja predvidene vodarne na Sorškem polju, če bi črpali povprečno 1 m³/s. Tolikšen porast zalog v sorazmerno kratkem obdobju 29 dni je pripisati v večji meri napajanju iz Save, v manjši meri pa deževju. Razmerje napajanja iz Save in napajanja iz padavin je pri intenzivnem naraščanju gladine Save vsaj 60:40, medtem ko je pri počasnejšem naraščanju to razmerje verjetno nekoliko drugačno. Točnejše podatke o tem bi dala nadaljnja opazovanja gladine na celotnem Sorškem polju, seveda z istočasnimi opazovanji gladine Save.

Raziskave so torej pokazale, da k znatnejšim občasnim naraščanjem gladine podtalnice na Sorškem polju in s tem k naraščanju zalog podtalne vode prispeva v veliki meri Sava, ki pri višjih vodah intenzivno napaja podtalnico med Kranjem in Bregom. Visokovodni valovi Save se z veliko hitrostjo prenašajo vse do črte Godešič—Mavčiče, medtem ko so pri Jeprci visokovodni valovi Save že zabrisani zaradi vpliva padavin in velike retenzijske sposobnosti osrednjega dela polja (tabla 2). Neprepustna podlaga polja ima namreč obliko sklede, katere južni rob je visoko dvignjen nad njeno dno. Zato je odtok podtalne vode iz osrednjega dela polja otežen in ne zmaga velikega dotoka iz narasle Save. V zvezi s tem začne gladina podtalne vode skoraj istočasno naraščati na večjem delu polja, podobno kot pri umetnih zajezitvenih jezerih na rekah.

Ko narašča gladina podtalne vode, se povečujejo tudi njeni strmei, debelina vodonosne plasti in pretok podtalne vode. Pri nizkem stanju vode dne 25. 3. 1975 je bil strmec gladine med Mejo in vrtino 5-16 približno 0,00066, medtem ko je bil pri visokem stanju dne 10. 4. 1975 približno 0,00077, tj. za 16,6 % večji. Če upoštevamo še povečanje debeline vodonosne plasti, potem se je povečal pretok na enoto širine toka podtalne vode v skladu z osnovno Darcyjevo enačbo

$$q = h \cdot k \cdot i$$

za več kot 16,6 %.

Iz tega lahko sklepamo, da bi v predvidenem črpališču na Sorškem polju lahko nemoteno črpali ves nizkovodni pretok podtalne vode, tj. $1,129 \text{ m}^3/\text{s}$, ne da bi se pri tem posušili izviri na levem bregu Sore. Občasne visoke vode Save, posebno pa zelo visoke vode, kakršna je bila npr. od 4. 4. do 6. 4. 1975, skupaj s padavinami v toliki meri povečajo zaloge podtalne vode in tudi pretok, da bi ga v črpališču ne mogli izkoristiti in bi višek odtekal proti izvirov. V dalj časa trajajočem sušnem obdobju, kot je bilo npr. od novembra 1974 do sredine marca 1975, pa bi se izdatnost izvirov vzporedno z zmanjševanjem pretoka skozi Sorško polje enakomerno zmanjševala, dokler ne bi na koncu po izredno dolgem sušnem obdobju presahnil. Tega seveda ne bi smeli dopustiti, ker stoje na južnem robu polja črpališča v tovarni celuloze, na Svetju in v Senici s skupaj 210 l/s vode, ki bi v tem primeru ostala brez vode. Iz tega sledi, da bi morali v izredni suši črpanje vode v črpališču zmanjšati na 900 do 800 l/s . Z vodnogospodarskega gledišča pa bi bilo vsekakor umestno, da bi glavni potrošnik podtalnice Sorškega polja, tovarna celuloze v Goričanah, črpal industrijsko vodo iz Sore. V tem primeru pa je predvidenemu črpališču na Sorškem polju zagotovljeno $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ vode tudi v zelo dolgotrajnem sušnem obdobju.

4.7. Kvaliteta podtalne vode

Med črpalnimi poskusi so bili v vseh treh črpalnih vrtinah vzeti vzorci vode za kemično in bakteriološko analizo. Kemična analiza kaže, da so si vsi vzorci vode med seboj zelo podobni; vsi pripadajo tipu kalcijevo hidrokarbonatnih vod. V vzorcih vode iz vrtin SOV-51 in SOV-53 je suhega ostanka 210 do 230 mg/l , trdota pa je $11,6$ do $12,0^\circ \text{ n}$. Voda iz vrtine SOV-54 vsebuje nekoliko več suhega ostanka, 251 do 254 mg/l , pa tudi trdota je večja, saj doseže $13,3^\circ \text{ n}$. Po kemični sestavi so vsi analizirani vzorci vode primerni za pitno vodo. Razen v enem primeru so vzorci tudi bakteriološko neoporečni.

5. Predlog za lokacijo črpališča

5.1. Kot smo že omenili, se skozi Sorško polje pri zelo nizkem stanju podtalne vode pretaka okrog $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ podtalne vode, medtem ko je njen pretok pri visokem stanju približno 15 do 20% večji. Od tega pretoka bi mogli izkoristiti približno $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ vode, ki bi jo bilo najprimerneje zajeti na južnem robu osrednje globoke kotanje Sorškega polja vzdolž črte Godešič–Mavčiče (tabla 1). Predložena lokacija črpališča je ugodna iz več razlogov. Z vrsto vodnjakov vzdolž približno 4200 m dolge črte med Godešičem in Mavčičami bi bilo mogoče zajeti vso podtalno vodo, ki odteka proti izvirov ob Sori in proti Savi. Debelna vodonosnih plasti na tem območju je po do sedaj znanih podatkih 40 do 53 m , prepustnost pa $5,5 \cdot 10^{-4}$ do $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. Na podlagi teh hidrogeoloških parametrov je mogoče pričakovati povprečno izdatnost vodnjakov okrog 50 l/s . S to količino bi bilo mogoče v črpališču zajeti ves sušni pretok podtalne vode $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ z 22 vodnjaki, ki bi bili razporejeni vzdolž črte Godešič–Mavčiče v medsebojni razdalji 200 m . Črpališče bi bilo tudi dovolj oddaljeno od vseh možnih onesnaževalcev podtalne vode.

5.2. Črpanje podtalne vode bo seveda povzročilo znižanje njene gladine na celotnem Sorškem polju. Kolikšno bo to znižanje, je seveda težko napovedati, ker je pretok podtalne vode skozi Sorško polje nestacionaren, kar pomeni da se

neprestano spreminja v odvisnosti od intenzivnosti napajanja iz Save in pašavin. Poleg tega je pričakovati tudi znatnejše spremembe v smereh pretakanja podtalne vode; pri tem bi predstavljala določeno nevarnost delna preusmeritev onesnažene podtalne vode iz I. pasu proti vodnjakom v Godešću. Točnejšo prognozo bi lahko izdelali le s pomočjo analognega električnega ali matematičnega modela in z obdelavo podatkov na računalniku. Verjetno pa bi za izdelavo modela potrebovali gostejšo mrežo piezometrov ter seveda podatke večletnih opazovanj gladine podtalne vode na celotnem Sorškem polju in gladine Save.

Zajezitev Save pri Mavčičah bi v znatni meri vplivala na zaloge podtalne vode na Sorškem polju. Povečala bi se debelina vodonosne plasti, znatno bi se povečal tudi pretok podtalne vode, kolikor se ne bi bregovi akumulacijskega jezera močno zablitali. V tem primeru bi se seveda pretok podtalne vode zmanjšal; različni računi bilance so namreč pokazali, da odpade več kot polovica napajanja podtalne vode na pronicanje Save. Za točnejšo oceno tega pojava bi nam lahko rabili podatki opazovanj na črpališču mariborskega vodovoda v Kamnici.

5.3. Po ustaljenem mnenju večine strokovnjakov, ki se ukvarjajo z zajetji podtalne vode, mora segati ožji zaščitni pas tako daleč navzgor po toku, da porabi podtalna voda za pot od roba zaščitnega pasu do vodnjakov 6 mesecev. Hitrost pretakanja podtalne vode je po Darcy jevi enačbi

$$v = k \cdot i$$

V osrednjem delu Sorškega polja je hitrost pretakanja podtalne vode pri povprečnem strmcu $i = 0,0006$

$$v = 1,19 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 7,14 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} = 0,61 \text{ m/d.}$$

Pri tej hitrosti napravi podtalna voda v 180 dneh 111 m poti.

Iz tega sklepamo, da bi zadostoval navzgor od črpališča 110 m širok zaščitni pas, medtem ko bi bil lahko navzdol nekoliko ožji. Z izgradnjo črpališča in s pričetkom črpanja podtalne vode se bo seveda na ožjem območju črpališča gladina podtalne vode znižala vsaj za 1 m ali pa več, s tem pa se bo seveda strmec gladine močno povečal. Povečani strmec je pričakovati na celotnem območju depresijskega lijaka, ki sega po opazovanih med poizkusnim črpanjem na vrtni SOV-53 teoretično 500 m daleč, praktično pa še več. Če privzamemo, da bo segal depresijski lijak od piezometra S-16 do piezometra P-6, tj. 950 m daleč in da se bo znižala gladina zaradi črpanja na območju piezometra S-16 za 1,5 m, se bo povečal povprečni strmec na $2 \cdot 10^{-3}$. Pri tem strmcu bi se povečala hitrost pretakanja podtalne vode po enačbi $v = 1,19 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 2,07 \text{ m/dan}$ in bi podtalna voda napravila v 180 dneh 370 m poti.

Če bo znižanje gladine na ožjem območju še večje, česar pa brez izdelave modela ni mogoče predvideti, bo seveda strmec večji in hitrost večja, v zvezi s tem pa bo potreben širši varstveni pas. Po do sedaj znanih podatkih je najprimerneje, da bi segal varstveni pas navzgor od črpališča vsaj 500 m daleč. Navzdol naj bi bil varstveni pas širok vsaj 150 m. Poleg zaščite predvidenega črpališča z ožjim varstvenim pasom bi bilo treba urediti potok Zabnico. Preprečiti bi bilo treba izlivanje neprečiščenih odplak industrije na Trati v ta potok, ki v precejšnji meri napaja podtalnico v zahodnem delu Sorškega polja.

6. Sklep in predlog za nadaljnje raziskave

6.1. Po podatkih poizkusnih črpanj in opazovanj nihanja gladine podtalne vode v odvisnosti od nihanja gladine Save in padavin je srednja vrednost koeficienta prepustnosti k na Sorškem polju $1,19 \cdot 10^{-2}$ m/s, vrednost efektivne poroznosti pa 0,225 v osrednjem delu, v zahodnem pa 0,132. Tudi vrednost koeficienta prepustnosti k je v zahodnem delu polja nižja od srednje vrednosti in doseže le $8 \cdot 10^{-3}$ m/s. Strmec gladine podtalne vode je v osrednjem delu polja izredno majhen in niha od 0,00045 do 0,00074. Debelina vodonosne plasti se spreminja na črti med Godešičem in Mavčičami od 40 do 53 m.

Po navedenih hidrogeoloških parametrih znaša pretok podtalne vode skozi osrednji del Sorškega polja pri nizkem stanju vode $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri visoki vodi se pretok zaradi povečanega strmca in večje debeline vodonosne plasti poveča za več kot 16%. Račun pretoka se ujema tudi z meritvami izdatnosti izvirov na levem bregu Sore. Od celotnega pretoka $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ bi bilo mogoče izkoristiti v predvidenem črpališču na črti Godešič—Mavčiče $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Računi bilance po raznih enačbah, ki pa niso povsem zanesljivi, kažejo, da se podtalna voda napaja vsaj 60% iz Save, ostali del pa prispevajo padavine na polju. Črpanje $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ vode bi znižalo gladino podtalne vode na celotnem Sorškem polju in močno zmanjšalo izdatnost izvirov na levem bregu Sore. V skrajno sušnem razdobju bi se ti izviri lahko celo posušili, v črpališču tovarne celuloze v Goričanah pa bi zmanjkalo vode. Iz vodnogospodarskega stališča bi bilo najprimerneje, da bi tovarna celuloze črpala industrijsko vodo iz Sore.

Najprimernejši kraj za izgradnjo črpališča je vzdolž črte Godešič—Mavčiče. Na tej črti bi izkoristili ves pretok podtalne vode skozi Sorško polje z vrsto 22 vodnjakov povprečne izdatnosti 50 l/s. Točne prognoze vpliva črpanja na gladino podtalne vode na polju ter razsežnost depresijskega lijaka za sedaj ni mogoče podati. V ta namen bi bilo treba izdelati analogni električni ali matematični model.

Po podatkih kemičnih in bakterioloških analiz je voda primerna za pitje.

Po doslej znanih podatkih naj bi seglo ožje zaščitno območje vsaj 500 m navzgor od vrste vodnjakov ter 150 m navzdol. Točen obseg zaščitnega območja bo mogoče podati šele na podlagi podatkov modela. Preprečiti bi bilo treba tudi spuščanje neprečiščenih odplak v potok Žabnico.

6.2. Med nadaljnjimi raziskavami na Sorškem polju bi bilo najprej treba ponovno izmeriti izdatnost izvirov na levem bregu Sore pri nizkem stanju podtalnice in nato še pri različno visokih stanjih.

Za točnejšo oceno optimalne izdatnosti vodnjakov v predvidenem črpališču bi bilo treba izdelati poizkusni vodnjak premera vsaj 0,6 m in vanj vgraditi črpalko izdatnosti vsaj 70 l/s. Primeren kraj za vodnjak je v bližini črpalne vrtine SOV-53 ali SOV-54. Uporabne podatke bo dal vodnjak, ki ga namcravajo izdelati za preskrbo Trate z vodo v bližini Godešiča.

Nadaljevati bi bilo treba stalno opazovanje gladin v vseh obstoječih piezometrih in vodnjakih na Sorškem polju; podatki bi rabili pri izdelavi modela.

Preučiti bi bilo treba vpliv morebitne izgradnje HE Mavčiče na napajanje podtalne vode ter možnosti popolnega zablajenja bregov akumulacijskega jezera.

Hydrogeologic Features of the Sora Field

Ljubo Zlebnik

Geološki zavod Ljubljana, Parmova 33

The Sora Field (Sorško Polje) extends along the right bank of the river Sava, between the towns Kranj, Škofja Loka and Medvode. It is a flat country, representing the Pleistocene fan of the Sava. The water-bearing Pleistocene conglomerate and gravel occupy a basin-shaped hollow depression. The bottom of the basin, made up of Tertiary impervious marine clay, is 120 meters deep in the central part of the field, while along its southern and southwestern border Tertiary beds crop out. Consequently, the geologic conditions are suitable to derive the water-supply from the underground water storage of the Sorško Polje. The groundwater table is maintained by the Sava and by the rainfall in a ratio of 60% by 40% at high water levels of the Sava. The depth of the groundwater table is 40 meters in the north, 25 to 30 meters in the central part of the field, and 8 meters in its southern part. A multiple well system of 22 pumping stations is designed for construction. The yield of such a system is calculated to be 1,1 cubic meters per second; it would represent a significant source for the increasing demand for water-supply of Ljubljana.

The Sora Field lies in Upper Carniola (Gorenjsko) along the right bank of the Sava River, between the towns Kranj, Škofja Loka and Medvode. It covers an area of about 35 square kilometers. It is a flat plain, dipping slightly from Kranj towards Godešič and Medvode. The surface of the plain, that consists of younger Pleistocene fluvial fill of the Sava River, is dipping for about 0,4% in southern direction. At Labore near Kranj its elevation is 390 m, near Spodnja Senica the Sava terrace edge is in an altitude of 332 m. Several older Pleistocene terraces emerge from the plain. Their surfaces are undulated, in places karstified; karst sinks are numerous.

The southwestern and southern border of the field sinks in a flight of terraces with steep slopes towards the deeply cut escarpment of the Sora valley. The western border of the field is a slightly undulating and partly swampy land along the road Škofja Loka—Kranj, that divides the Sora Field from the water system of the Suha River. Here flows the only surface river of the Sora Field, Zabnica.

The Sora Field is a basin-shaped hollow depression, filled with permeable Pleistocene conglomerate and gravel. The water-bearing Pleistocene beds are underlain by Tertiary marine clay, that lies in the central part of the field in depths, varying from 65 to 120 meters below the surface; along the southern and southwestern border of the field it is cropping out. These Tertiary outcrops are found along the left bank of the Sora River between Reteče and Zgornja Senica, near the dam of the cellulose factory in Goričane, below the mill at Ladja, and at the left bank of the Sora River near Svetje, as well as near the inn Bohinjc at Medvode, and on both banks of the Zbilje Lake.

Through the pervious conglomerate and gravel beds in the Sora Field flows underground water, that is maintained by the Sava River and by

rainfall; it discharges partly back into the Sava River, but mainly into springs at the left bank of the Sora River.

The underground water table at the northernmost border of the field near Drulovka and Breg dips rather steeply from the Sava River southwards; the dip amounts to 0.93 ‰. The water table lies between 39 through 43 m below the surface of the field. In southern direction, between Zabrnica and Praše, the dip of the water table is much gentler, and amounts to 0.2 ‰ only; its depth below the surface being about 43 m. In the middle part of the field up to Godešič, Reteče and Jeprca the dip of the water table is extremely gentle, about 0.06 ‰; the depth varyin from 35 to 25.5 m. In the southernmost part of the Sora Field, above the springs near Godešič, Reteče, Senica, Ladja and Goričane the dip of the water table increases considerably. Near Goričane it amounts to 0.55 ‰, the depth of the water table is about 8 m below the surface.

The groundwater level oscillates considerably, depending on the water level of the Sava River and on rainfall. The difference of high and low groundwater level amounts to 4 through 4.4 m at the northern border of the field, in the central part from 2.5 to 3 m, and at the southern border only somewhat more than one meter.

The thickness of the water-bearing bed, that consists of pervious conglomerate and sandy gravel, is greatest at the northern border of the field near Drulovka; measured at low waters, it amounted to 77 m. Near Meja the water-bearing layer has a thickness of 57 m, in the bore S-16 38.5 m, near Jeprca 15 m, and near Goričane only 4.2 m.

The conglomerate and sandy gravel of the Sora Field are very pervious. According to pumping tests, carried out in the new well of "ISKRA" in Kranj, and in the exploitation drilled wells SOV-51, SOV-53 and SOV-54 in the middle part of the field, the permeability coefficient changes from $k = 2.7 \cdot 10^{-2}$ m/s at the northern and western borders of the field to $2.2 \cdot 10^{-2}$ m/s in its central part. According to data from pumping tests carried out in the drilled well SOV-51 the effective porosity S calculated, that amounted to 13.2%. At the northern border of the field near Drulovka and Breg the effective porosity was calculated from oscillations of the level of the Sava River and in corresponding observation wells near the river banks. The results varied between 22.5% and 24.9%. The average value of the permeability coefficient in the Sora Field amounts to $k = 1.19 \cdot 10^{-2}$ m/s; the average value of the effective porosity is $S = 20.2$ %.

From pumping test curves, that show the water level depressions at different pumped water quantities, the theoretical yield of the well SOV-51 would be 50 l/s at a depression of 2.2 m; well SOV-53 would yield about 65 l/s at a depression of 0.55 m, and well SOV-54 about 35 l/s at a depression of 0.5 m. In practice, however, none of these bores can yield the indicated quantities, as their diameters are too small (0.2 m), and the installation of adequately strong pumps is impossible.

The dynamic water reserves of the Sora Field have been repeatedly assessed at 1.2 to 1.5 m³/s. In 1975 the underground waterflow through the central part of the Sora Field at low water levels was calculated again, in such a way, that the total flow was divided into four flow belts. The flow

belts were constructed on the basis of groundwater contour lines for the date 25. 3. 1975. In the first flow belt the permeability coefficient was assumed as $k = 5 \cdot 10^{-2}$ m/s, in the second one $k = 8 \cdot 10^{-2}$ m/s, and in the third and fourth flow belt: $k = 1.19 \cdot 10^{-2}$ m/s. According to our calculation the flow in the first belt amounts to 80 l/s, in the second 318 l/s, in the third 456 l/s and in the fourth 355 l/s. The total flow through the central part of the Sora Field at low water levels amounts to 1.209 m³/s; out of this quantity 1.1 m³/s could be exploited. The calculated flow through the second and third belt approximates roughly the measured yield of the springs at the southern border of the field between Godešič and Ladja, into which the water of both flow belts discharges.

According to the first calculation (1968), from the total flow of 1.2 m³/s of underground water in the Sora Field about 1 m³/s should supposedly originate from rainfall infiltration, and only 0.2 m³/s from the infiltration of the Sava River. Recent observations of the oscillations of the Sava level and of the underground water table however indicated a strong dependency of the underground water table on the river level. This indicates strong infiltration of the river water into the underground water. Calculations of rainfall infiltration according to various equations based on the oscillations of the underground water table have shown, that the groundwater table is maintained at least 60 % by the Sava River, and not more than 40 % by rainfall. This ratio is valid for every higher rise of the water table in the Sora Field. For more accurate calculations observations of longer duration would be necessary.

Observations of the underground water table have shown, that at high levels of the Sava River the river waves travel very fast up to the Godešič—Mavčiče area, similarly as in artificial lakes on rivers. As the discharge of the large underground water accumulation in the Sora Field is limited to two, rather narrow, spring areas, it cannot follow the large influx from the increased Sava water level. Therefore the water table of the main part of the field starts increasing with a small retardation.

Chemical and bacteriological analyses of the water samples taken during pumping tests, have shown that the water is fit for human consumption.

As already mentioned before, about 1.1 m³/s of water could be exploited from the Sora Field. This water could be most suitably captured at the southern border of the deep central basin of the Sora Field along the line Godešič—Mavčiče. The total water flow could be captured by 22 wells with an average yield of 50 l/s each. The pumping area is sufficiently far away from all possible sources of contamination.

Pumping of the groundwater would cause a depression of the water table over the total Sora Field. It is difficult to assess the amount of the depression, as the water flow through the Sora Field is unsteady. A more exact prognosis could be given only by an analogous electrical or mathematical model.

In a longer dry period, continuous pumping of 1.1 m³/s would cause constant decrease of the water level, especially downstream of the pumping stations at Jepca, Goričane and Reteče. Simultaneously also the yield of the springs at the southern border of the field would decrease; should the underground flow decrease to 1.1 m³/s, the springs would become dry. This concerns mostly the wells of the cellulose factory near Svetje and Senica, with a total yield of

210 l/s of water, that would become dry. Therefore in extreme drought pumping in the main pumping area should be reduced to 900 or 800 l/s. In any case it is advisable, that the main consumer of the underground water of the Sora Field, the cellulose factory at Goričane, stops using potable water from the field, and converts to pumping industrial water from the river Sora.

A dam through the Sava River near Mavčiče would greatly increase the water reserves of the underground water of the Sora Field, unless the escarpments of the artificial lake would be covered by mud. For better assessment of this possibility the data of the observations at the pumping station Kamnica for the Maribor water supply could be useful.

LITERATURA

- Aljtoški, M. E. 1973, Hidrogeološki priručnik, Građevinska knjiga, Beograd.
- Breznič, M. 1969, Podtalnica Ljubljanskega polja in možnosti njenega povečanega izkoriščanja, Geologija 12, Ljubljana.
- Castany, G. 1963, *Traité pratique des eaux souterraines*, Dunod, Paris.
- Fillpović, B. 1972, Praktikum iz hidrogeologije, Naučna knjiga, Beograd.
- Johnson, E. E. 1966, Ground water and wells, Saint Paul, Minnesota.
- Jugoslovanski komitet za međunarodnu 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.
- Žlebnič, L. 1971, Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja, Geologija 14, Ljubljana.



Tabla 3. Sorško polje s Karavankami v ozadju
Plate 3. The Sora Field adorned by the cloud-capped Karavanke Mountains