

RAČUN DOTOKA IZ PODTALNICE V GLOBOKO GRADBENO JAMO STROJNICE HIDROELEKTRARNE SREDNJA DRAVA I

Marko Breznik

S 3 slikami med tekstem in z 11 slikami v prilogi

1. Uvod

Hidroelektrarna Srednja Drava I izkorišča v strojnici Zlatoličje 32 m padca Drave. Dovodni kanal je dolg 17 km in je pri strojnici z nasipi dvignjen 15 m nad rahlo nagnjeno Dravsko polje. Odvodni kanal je dolg 6 km in je vkopan 23 m globoko. Površje na lokaciji strojnice je na koti 238 m, gladina podtalnice v produ pa je bila pred izkopom na koti 230,5 m. Temelji strojnice so na koti 201 m in so 37 m pod površjem terena, od tega 29,5 m globoko v vodonosnem produ. Izkop velike gradbene jame (nad 500 000 m³ prostornine, s ploščino 170 m × 170 m na površju in 30 m × 40 m na dnu), tako globoko vkopane v vodonosni prod, je predstavljal za projektante in izvajalce izredno težak problem.

Geološke raziskave so pokazale, da je pod pleistocenskim prodom, ki sega do kote 212 m, mnogo manj prepusten pliocenski prod. Glavni problem je bil izkop v vodonosnem pleistocenskem produ med kotama 320 m in 212 m.

Tesnitev pleistocenskega proda z jekleno zagatno steno je odpadla zaradi težav pri uvozu zagatnic, tesnitev z vertikalno injekcijsko zaveso pa zaradi težav pri injiciranju, predvsem pa zato, ker bi izvedba takšne zaves predolgo trajala; ob pomanjkanju električne energije pa je bil čas gradnje pomemben činitelj. V takšni situaciji so se Dravske elektrarne v Mariboru kot investitor odločile za izkop gradbene jame ob direktnem črpanju vode iz jame v pleistocenskem produ (sl. 1—5). Med poglobljanjem jame v pliocenskem produ (sl. 6—8) pa naj bi podtalnico črpali iz zbiralnega kanala, ki naj bi ga izgradili na meji pleistocenskih in pliocenskih plasti. Za oceno možnosti takšnega načina izkopa je investitor naročil posebno študijo kot dopolnilo k projektu.

Prva naloga študije je bila, izračunati dotok podtalnice v gradbeno jamo strojnice v raznih fazah gradnje. Pri tem je bil na eni strani poudarek na maksimalnih dotokih podtalnice, da bi ugotovili potrebno zmogljivost črpal, in na drugi strani na stalnih dotokih podtalnice, ki bi pri predvideni triletni gradnji odločilno vplivali na stroške črpanja.

Druga naloga študije pa je bila, izračunati, za koliko se bo znižala podtalnica zahodno od gradbene jame, predvsem v vaseh Prepolje in Starše; ugotoviti je bilo treba, ali bo za preskrbo teh vasi s pitno vodo

zadostovalo poglobljanje obstoječih izkopanih vodnjakov ali pa bo treba zgraditi nov vodovod.

Dravskim elektrarnam v Mariboru se zahvaljujem za fotografsko dokumentacijo ter za podatke o dotoku vode in o gladinah podtalnice med gradnjo. Hidrološke meritve so delo Vlada Kovačiča, dipl. geod. inženirja.

2. Geološke in hidrološke razmere

Po podatkih Geološkega zavoda (1963) sega pleistocenski prod od površja terena na koti 238 m približno do kote 212 m. Ponekod je močno pomešan s peskom. Pod njim sledi gost pliocenski prod, ki je bolj drobnozrnat in ima mnogo peščenih ter nekaj meljastih primesi.

Pleistocenski prod ima po podatkih Žlebnika (1966) do 6 % melja in 35 % do 57 % peska, pliocenski prod je drobnejši in ima 11 % do 35 % melja ter 20 % do 62 % peska. Tudi po petrografski sestavi prodnikov se pleistocenski prod močno razlikuje od pliocenskega. Pleistocenski prod vsebuje poleg kremenovih prodnikov tudi prodnike amfibolita, tonalita, gnajsa in redko apnenca. Pliocenski prod pa sestavljajo pretežno dobro zaobljeni kremenovi prodniki.

V zgornji plasti proda so našli med izkopom kosti mamuta, kar dokazuje njegovo pleistocensko starost.

Prostorninska teža naravno vlažnega pleistocenskega proda je največ 2,04 t/m³, pliocenski prod pa je bolj gost in ima pri naravni vlagi prostorninsko težo 2,06 do 2,3 t/m³.

Na lokaciji strojnice sta bila izkopana 2 vodnjaka Benoto, globoka 30 m. Na podlagi podatkov črpalnih poskusov v teh vodnjakih so v Laboratoriju za mehaniko tal Univerze v Ljubljani izračunali naslednji koeficient prepustnosti pleistocenskega proda:

$$k = 3,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm/sek.}$$

V istem laboratoriju so določili tudi koeficient prepustnosti pliocenskega proda:

$$k = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ do } 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sek.}$$

Po geoloških podatkih smo izračunali, da vpada mejna ploskev med pleistocenskimi in pliocenskimi plastmi 2 % proti vzhodu.

Podtalnico na Dravskem polju napajajo poleg padavin njegovega območja tudi vode z vzhodnega dela Pohorja. Prazni pa se podtalnica v izvire Studenčnice ob robu nizke dravske terase.

Strmec gladine podtalnice smo povzeli po hidrološki karti Dravskega polja z minimalnim vodnim stanjem na dan 31. marca 1964, ki jo je izdelal investitor.

Sl. 1. Izkop v pleistocenskemrodu. Površje terena 238 m, podtalnica 230,5 m, dne 17. novembra 1964

Fig. 1. Excavations in the Pleistocene gravel. Ground surface 238 meters, ground water tabel 230,5 meters, November 11, 1964



Sl. 2. Odtok vode iz gradbene jame po prebitju odvodnega kanala. Podtalnica
na koti 227,7 m, dne 26. februarja 1965

Fig. 2. Outflow of water from the building pit immediately after tailrace
breaking. Ground water table 227,7 meters, February 26, 1965



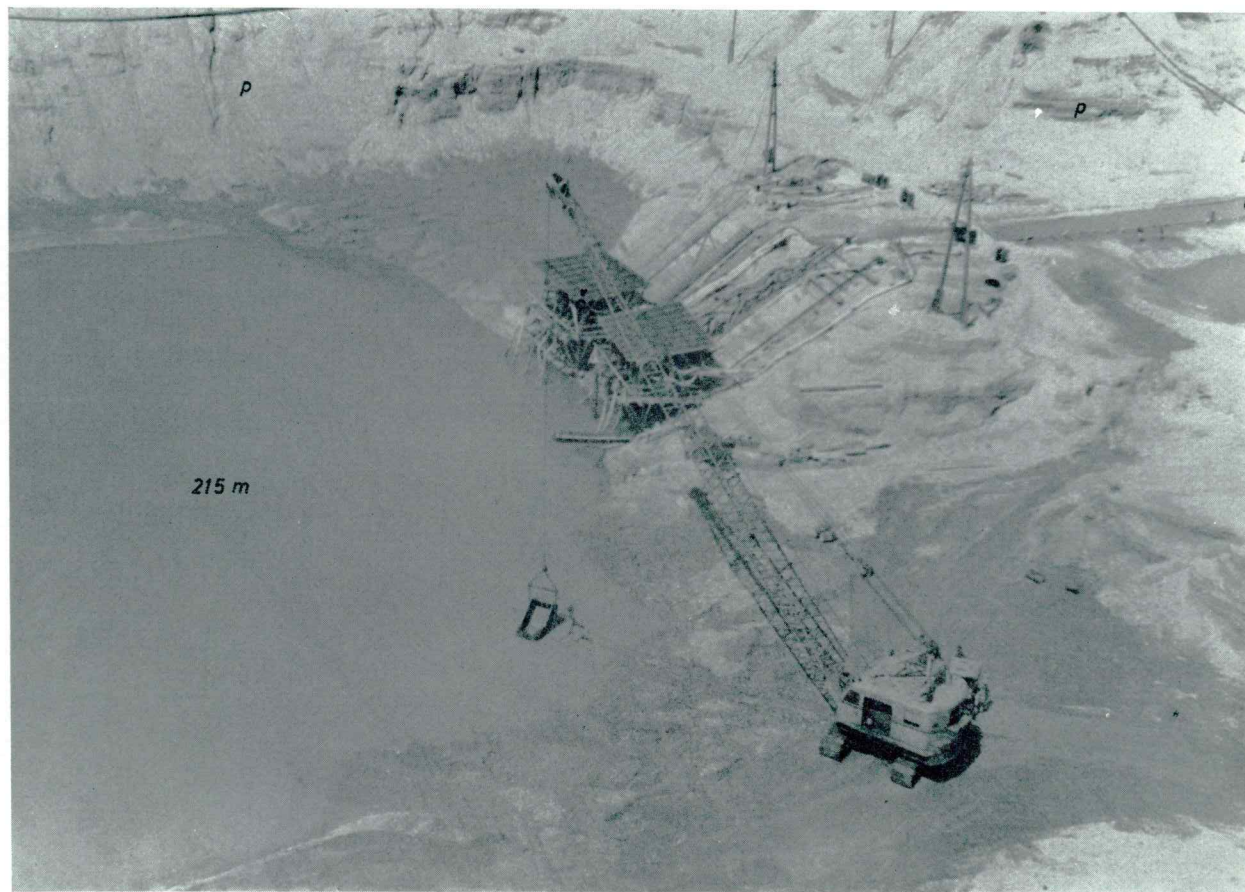
Sl. 3. Podtalnica odteka po odvodnem kanalu o. Podtalnica 226,0 m
dne 31. marca 1965

Fig. 3. Ground water flow through the tailrace canal. Ground water table
226,00 meters, March 31, 1965



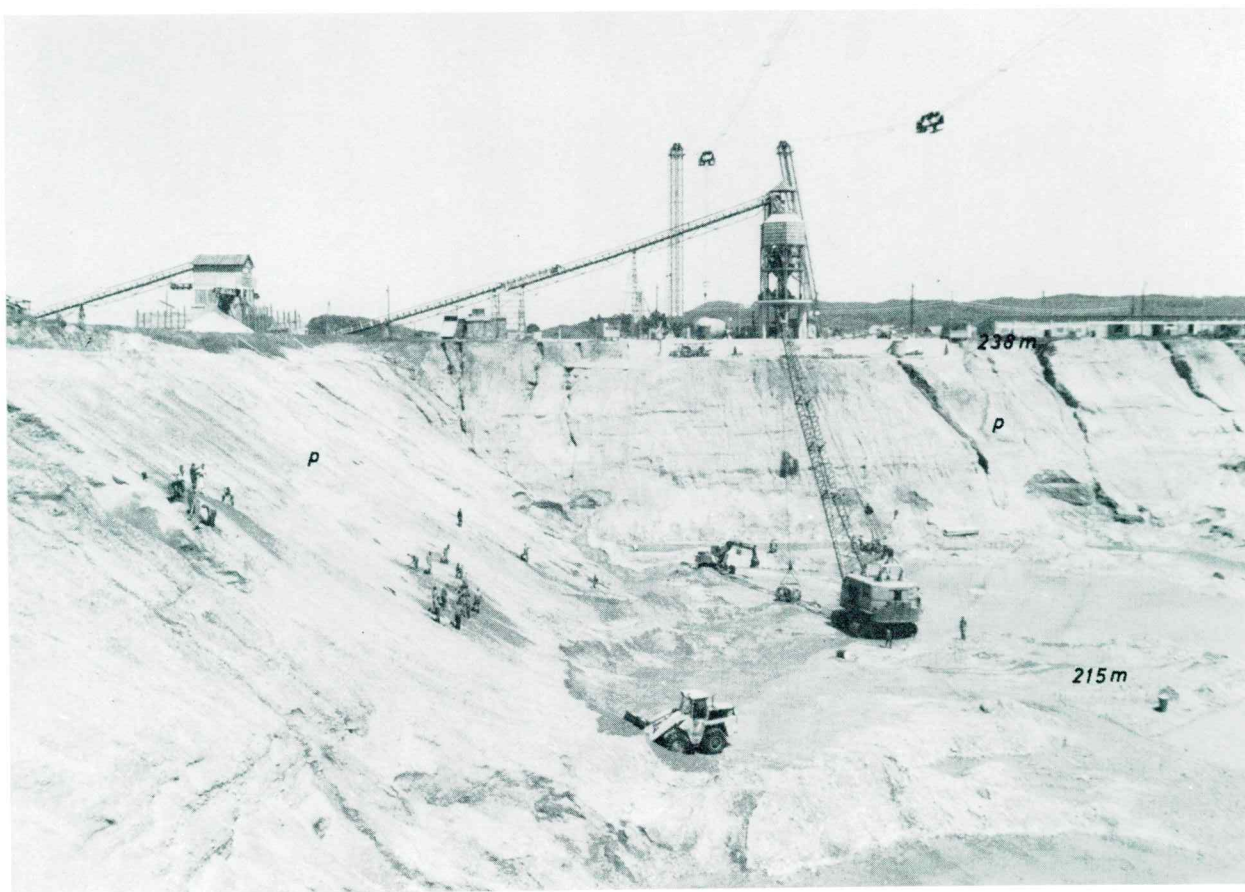
Sl. 4. Izkop je dosegel bližino pliocena. Podtalnica izvira iz pleistocenskega
proda okoli gradbene jame (temnejše). Gladina vode v jami na koti 215 m,
junij 1965

Fig. 4. Excavation works advanced close to the Pliocene gravel. Ground water
discharge from Pleistocene gravel surrounding the building pit (dark). Water
tabel level in the building pit 215,00 meters. June 1965



Sl. 5. Izkop na koti 215 m, dne 7. julija 1965

Fig. 5. Excavation works on the elevation 215 meters above sea level. July 7, 1965



Sl. 6. Zid zbiralnega kanala, temeljen na pliocenu na koti 213 m. Največji izviri v vogalih i_1 , veliki izviri v sredini i_2 , dne 2. avgusta 1965

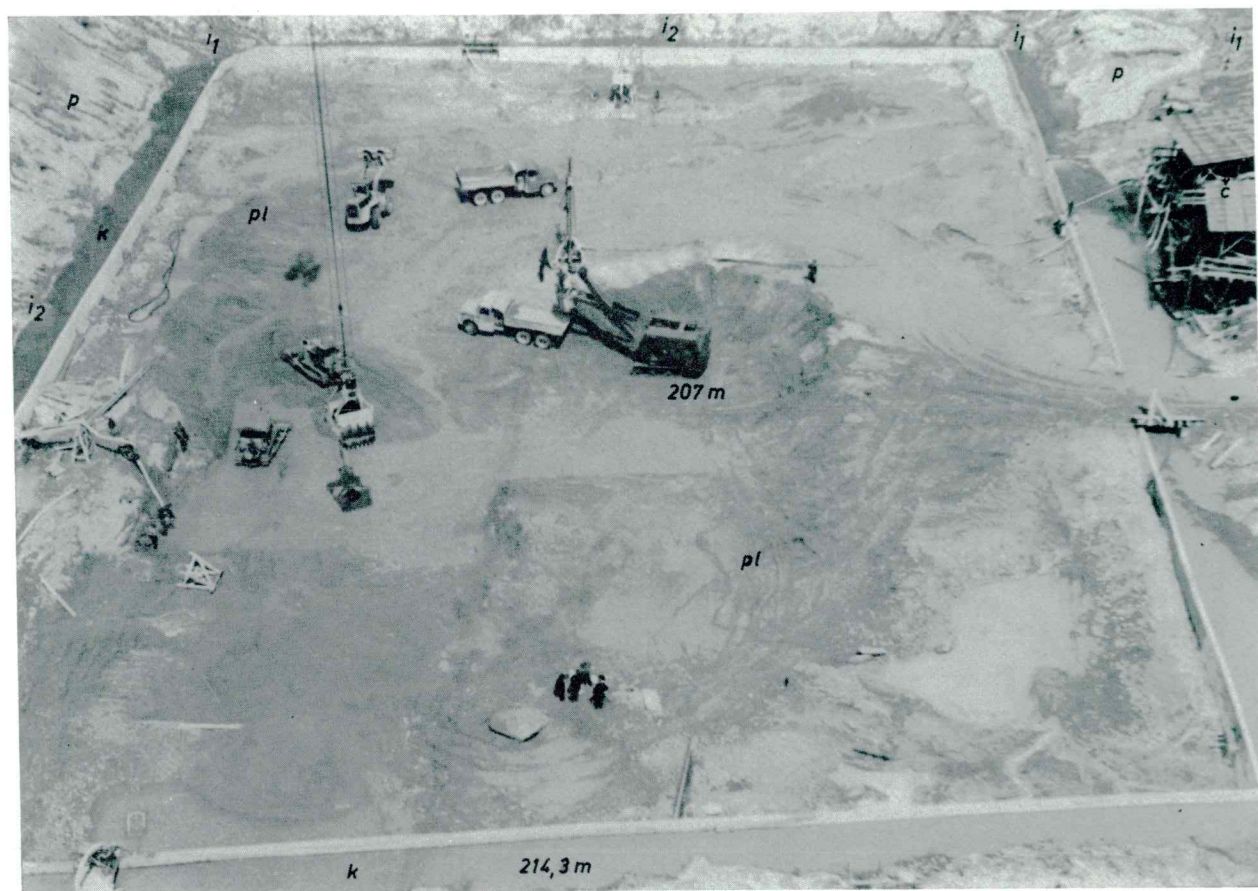
Fig. 6. Construction of the collector ditch founded on the Pliocene gravel on the elevation of 213 meters above sea level. The richest ground water discharges in the corners of the building pit and rather abundant water sources in the middle of the building pit slopes. August 2, 1965



Sl. 7. Zbiralni kanal *k* s koto 214,3 m dovaja podtalnico iz pleistocenskega proda *k* črpališču *č*. V sredini izkop v pliocenu. Najgloblji deli izkopa okrog 207 m. Pleistocenski prod *p*, pliocenski prod *pl*. Zbiralni kanal *k*, črpališče *č*.
September 1965

Fig. 7. Collector ditch *k* on the elevation 214,3 meters above sea level conducting the water from Pleistocene gravel to the pumping station. The deepest excavation works in the Pliocene gravel reached the plus 207 meters above sea level, September 1965

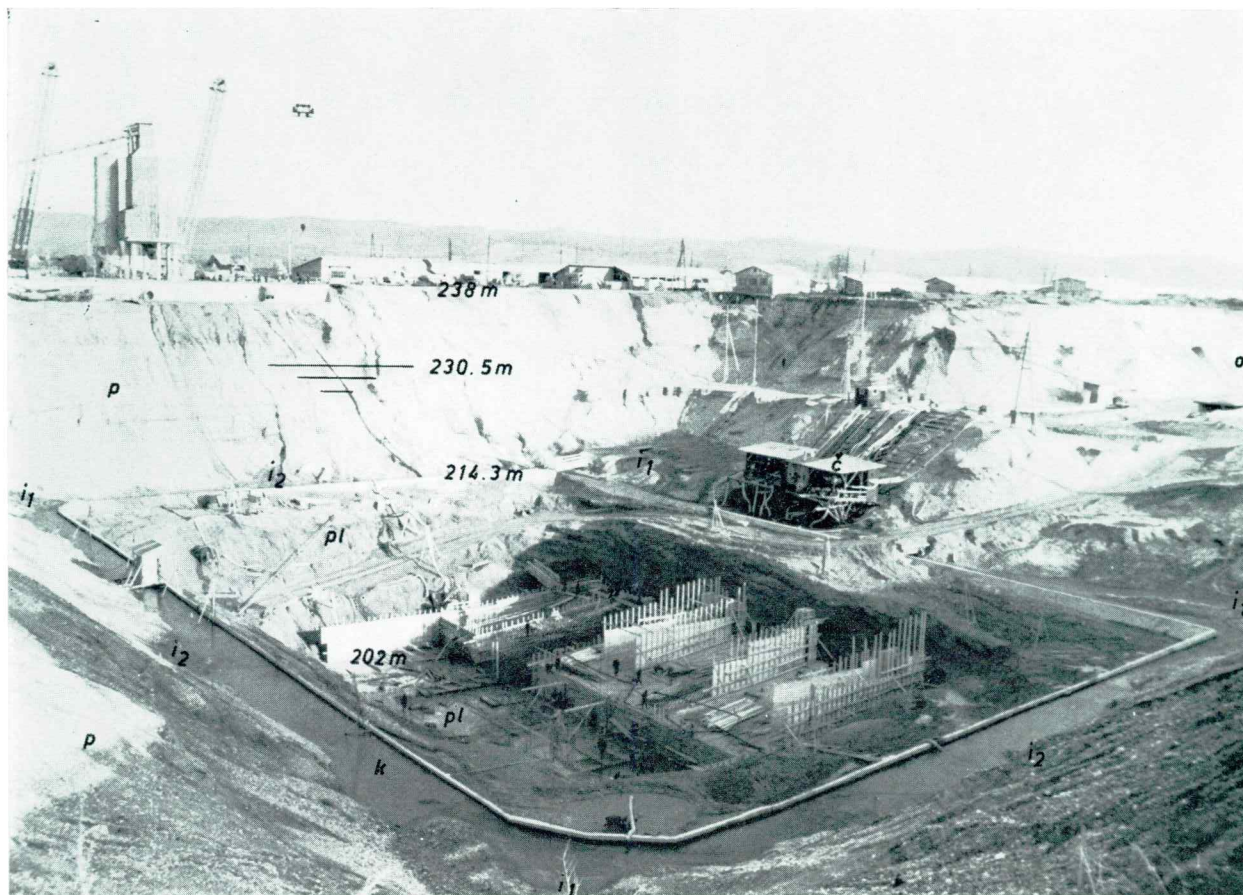
p = Pleistocene gravel, *pl* = Pliocene gravel, *k* = collector ditch, *č* = pumping station



Sl. 8. Dno izkopa v pliocenu 201 m. Največji izviri i_1 v vogalih, veliki izviri i_2 v sredini. Črpališče $\check{c}$, zbiralni kanal k , odvodni kanal o . Pleistocenski prod p , pliocenski prod pl

Fig. 8. Excavation works in Pliocene gravel advanced to the bottom of the building pit. In the corners of the building pit the richest water discharges i_1 are shown.

p = Pleistocene gravel, pl = Pliocene gravel, k = collector ditch, o = tailrace canal, $\check{c}$ = pumping station



3. Supozicije o hidrogeoloških razmerah ter v računu dotoka in depresij

3.1. Neenakomerno gibanje podtalnice

Smer gibanja podtalnice proti gradbeni jami smo ugotovili s konstrukcijo strujne mreže.

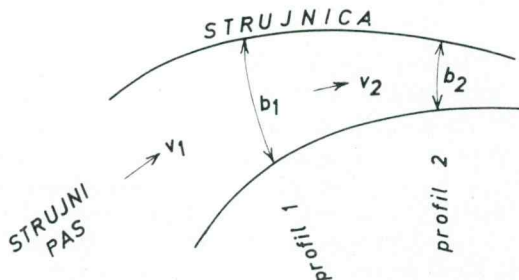
Gibanje podtalnice proti gradbeni jami smo opazovali v posameznih pasovih, omejenih z dvema strujnicama. Tak pas se proti gradbeni jami zožuje (sl. 9). Zato je hitrost vode bliže jami večja kakor bi bila v enakomerno širokem pasu, depresija pa manjša. Vpliv zoženega pasu smo upoštevali v računu z različno hitrostjo gibanja podtalnice med posameznimi profili, ki dele strujne pasove, in s členom širine pasu B po K a m e n s k e m (sl. 9).

$$B = \frac{b_1 - b_2}{\ln b_1 - \ln b_2} \quad \begin{array}{l} b_1 \text{ in } b_2 \text{ sta širini pasu} \\ \text{v profilih 1 in 2.} \end{array}$$

Pretok vode je pri vsaki praznitvi podzemeljske akumulacije neenakomeren. V profilih bliže gradbeni jami je pretok večji kakor v oddaljenih profilih. Z razliko pretoka se prazni akumulacija in depresijski

Sl. 9. Strujni pas med sosednjima strujnicama se zožuje proti gradbeni jami

Fig. 9. Flow belt between two adjacent flow lines narrowing toward the building pit



lijak postaja vedno večji. Teoretično se širi depresija v izotropnem polprostoru v neskončnost, praktično pa je odvisna od robnih pogojev, npr. od reke s stalnim napajanjem podtalnice. V tem primeru se depresija ne pogloblja več in pretok postaja enakomeren.

Neenakomeren pretok podtalnice smo ponazorili tako, da smo s spreminjajočo se širino pasu B toda z enakomernim pretokom v posamičnem odseku izračunali vedno daljše odseke strujnih pasov, in sicer 0—100 m, 0—500 m, 0—1000 m in 0—2000 m. Če si zamislimo istočasno gibanje podtalnice v teh odsekih, dobimo za dele odsekov npr. 0—100 m, 100—500 m, 500—1000 m in 1000—2000 m neenakomeren pretok podtalnice, ki se proti gradbeni jami povečuje:

$$Q_3 > Q_2 > Q_1$$

3.2. Nenadno znižanje gladine

V računu smo sponirali nenadno znižanje gladine v gradbeni jami na kote 222 m, 217 m in 212 m. V resnici je bilo znižanje podtalnice postopno v skladu z izkopom in je trajalo okrog 5 mesecev. Ker smo v računu predpostavljali, da se bo depresijski lijak hitro praznil, smo kot rezultat dobili povečane pretoke takoj po vsaki stopnji znižanja vodne gladine v gradbeni jami. Vpliv povečanja pretokov smo izločili s tem, da nismo upoštevali konic računskih pretokov. Pri merjenju dejanskih dotokov med izkopom so zaradi enakomernega zniževanja gladine dotoki enakomerno naraščali.

3.3. Količnik prepustnosti

Na vsem območju smo računali z enotnim količnikom prepustnosti pleistocenskega proda, edinim, ki je bil takrat na razpolago.

$$k = 3,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm/sek.}$$

Vso debelo plast pleistocenskih sedimentov na Ptujskem polju je naplavila Drava, ki pa je spreminjala lego svoje struge. V glavni strugi je odlagala debelejši prod, v stranskih rokavih prod in pesek, v mrtvih rokavih pa pesek in melj. Zaradi takšnih pogojev nastanka naplavine se mora nujno spreminjati količnik k v horizontalni in vertikalni smeri.

3.4. Strmec vodne gladine

Strmce gladine smo povzeli iz hidrološke karte Dravskega polja z minimalnim vodnim stanjem 31. marca 1964.

Če podrobneje opazujemo hidroizohipse, opazimo, da se v posameznem strujnem pasu strmec spreminja. To je lahko posledica konfiguracije površja pliocenskih plasti in s tem debeline vodonosne plasti, ali spreminjajočega se koeficienta prepustnosti k , ali pa posledica polnjenja in praznjenja podzemeljske akumulacije. V naših računih smo upoštevali enakomeren strmec podtalnice v posameznih pasovih.

3.5. Meja pliocena

Mejno ploskev med pliocenskimi in pleistocenskimi sedimenti, ki je na območju strojnice na koti okrog 212 m, smo imeli v glavnem za ravnino, le v profilih proti jugozahodu od gradbene jame smo upoštevali, da se tod površje pliocenskih plasti dviga za okrog 2 %.

3.6. Dotok iz pliocenskega proda

Koeficient prepustnosti pleistocenskega proda je okrog 4000-krat večji od koeficienta prepustnosti pliocenskega proda. Zaradi majhnega koeficienta prepustnosti pliocenskega proda je bilo jasno, da bo dotok iz pliocena majhen, zato smo ga lahko v primerjavi z dotokom iz pleistocena povsem zanemarili.

Pliocenski prod smo smatrali kot neprepustno podlago pleistocenskega proda. Dotok podtalnice v gradbeno jamo naj bi se bil formiral v spodnjem delu pleistocenskih plasti na meji s pliocenskimi sedimenti.

4. Metoda računanja dotoka v gradbeno jamo

4.1. Metoda računanja

Oblikovanja nove gladine podtalnice, ki je na eni strani pod drenažnim vplivom gradbene jame in odvodnega kanala, na drugi strani pa pod vplivom napajanja iz podtalnice Dravskega polja in iz Drave, ni možno reševati kot ravninski sistem, ampak prostorsko.

Problem smo reševali postopno in s približevanjem. Najprej smo provizorno sestavili horizontalno strujno mrežo. V pasovih, omejenih z dvema strujnicama, smo nato iskali pretoke in depresijske krivulje pri izbrani depresiji v gradbeni jami za posamezne odseke, ki so se vedno bolj oddaljevali od gradbene jame, sorazmerno s širjenjem depresije. Dokaz, da sta bila pretok in njemu ustrezna depresija pravilno izbrana, je bil v tem, da je morala biti skupna izračunana depresija enaka razliki med gladino podtalnice pred to fazo depresije na začetku pasu in novo depresijo na koncu pasu v gradbeni jami. Iz depresijskih krivulj smo dobili nivojnice, s katerimi smo nato popravili privzeto strujno mrežo in račun ponavljali, dokler nismo prišli do pravilne strujne mreže.

Računali smo po Dupuitovi formuli, predelani po Kameniskem (Bogomolov, Silin-Bekčurin, 1959, str. 35)

$$Q = k \frac{b_1 - b_2}{\ln b_1 - \ln b_2} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$$

kjer je:

- k količnik prepustnosti
- b_1 in b_2 širina pasu v prečnih profilih 1 in 2
- h_1 in h_2 debelina vodonosnega horizonta
- L razdalja med profiloma 1 in 2.

Praktično je bil postopek naslednji:

Pri izbrani strujni mreži je faktor širine pasu

$$\frac{b_1 - b_2}{\ln b_1 - \ln b_2}$$

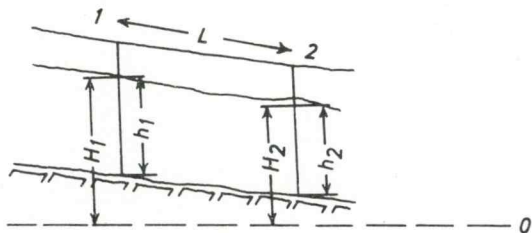
podan in prav tako dolžina L in količnik prepustnosti.

Debelina vodonosne plasti na začetku pasu h_1 je razlika med gladino podtalnice in površjem pliocena.

Z raznimi izbranimi pretoki Q smo iskali takšen h_2 , da je bila depresijska krivulja pravilna. Vsak pas smo razdelili na več odsekov, npr. 0—100 m, 0—500 m, 0—1000 m, itd., posamezne odseke pa na pododseke npr. odsek 0—1000 m smo razdelili na pododseke 0—100 m, 100—500 m in 500—1000 m.

Začeli smo z računom najbližjega odseka in se potem oddaljevali od gradbene jame, analogno kakor se širi depresija, npr. 0—100 m, 0—500 m, 0—1000 m itd. Obratno pa smo v posameznih odsekih pričeli z računom v najoddaljenejšem pododseku.

Debelino h_2 smo začeli računati na najbolj oddaljenem pododseku in smo se nato postopno približevali gradbeni jami. Izračunani h_2 prvega pododseka je bil potem h_1 drugega, v katerem smo iskali nov h_2 ; tako smo se z depresijsko krivuljo postopno približali gradbeni jami. Pogoj za pravilno izbran Q je bil, da je prišla pri gradbeni jami depresijska krivulja na koto depresije v jami. Da smo v tem uspeli, je bilo treba račun ponavljati z različnimi pretoki Q .



Sl. 10. Tok podtalnice po nagnjeni neprepustni podlagi

Fig. 10. Groundwater flow on inclined impermeable basement

Enačba, ki upošteva nagnjeno neprepustno podlago (sl. 10), je naslednja:

$$Q = k \frac{b_1 - b_2}{\ln b_1 - \ln b_2} \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L}$$

V primeru horizontalne podlage je

$$h_1 = H_1 \quad h_2 = H_2$$

in člen, ki upošteva debelino vodonosne plasti in naklon gladine:

$$\frac{1}{2L} \cdot (h_1 + h_2) \cdot (H_1 - H_2)$$

se spremeni takole:

$$\frac{1}{2L} (h_1 + h_2) \cdot (h_1 - h_2) = \frac{1}{2L} \cdot (h_1^2 - h_2^2)$$

Če si mislimo izhodiščno gladino pomaknjeno na koto neprepustne podlage, je

$$h = H - p \cdot l$$

p = nagnjenost neprepustne podlage

l = razdalja od gradbene jame.

V nadaljnjem smo računali namesto s produktom obeh členov v aproksimaciji s kvadratom srednjice.

$$h \cdot H = (H - p \cdot l) \cdot H \approx h_{sv}^2$$

$$h_{sv} = \frac{h + H}{2} = \frac{(H - p \cdot l) + H}{2} = H - \frac{p \cdot l}{2}$$

Da bi dobili depresijsko krivuljo, smo člen $\frac{p \cdot l}{2}$ na koncu zopet pristeli izračunanem h_{sv} :

$$H = h_{sv} + \frac{p \cdot l}{2}$$

Ta korekcija je bila potrebna za profile, oddaljene več kilometrov.

Ker pa je člen $\frac{p \cdot l}{2}$ majhen v primerjavi s H , so napake zaradi gornje

aproksimacije le majhne.

4.2. Robni pogoji

V horizontalnem izotropnem polprostoru se širi depresija teoretično v neskončnost; pri tem se odtok zmanjšuje, ker se zmanjšuje strmec.

V našem računu smo imeli polprostor omejen z različnimi robnimi pogoji. V pasovih, usmerjenih proti Dravi, se širjenje depresijskega lijaka ustavi, ko ta doseže Dravo, ki napaja podtalnico.

V strujnih pasovih, ki se napajajo iz podtalnice, so robni pogoji doseženi in s tem širjenje depresijskega lijaka ustavljeno, ko se naravni dotok v pas izenači z odtokom iz pasu:

$$Q \text{ dotoka} = Q \text{ odtoka}$$

Z oddaljevanjem od gradbene jzame se namreč strujni pas širi in se povečuje ploskev, ki zajema podtalnico ter povečuje dotok. Istočasno pa se zmanjšujeta padec depresijske krivulje in odtok iz pasu. Dovolj daleč se dotok izenači z odtokom in podtalnica se giblje enakomerno.

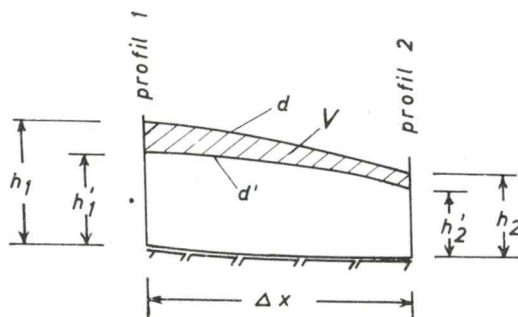
4.3. Časovni potek širjenja depresijskega lijaka

Opazujemo odsek strujnega pasu, ki je omejen v smeri toka s profiloma 1 in 2 (sl. 11).

Depresijski krivulji d ustrezajo Q , h_1 in h_2 , depresijski krivulji d' pa Q' , h_1' in h_2'

$$Q > Q' \quad h_1 > h_1' \quad \text{in} \quad h_2 > h_2'$$

Volumen V med obema depresijskima krivuljama se izprazni v času t z odtokom, enakim razliki odtokov obeh depresij.



Sl. 11. Skica ponazoruje račun časovnega širjenja depresije

Fig. 11. Sketch showing the calculation of depression cone expanding with time

$$t = \frac{V \cdot n}{Q - Q'}$$

$n = 0,3$ privzeti koeficient efektivne poroznosti.

Volumen V smo izračunali približno po enačbi

$$V = \frac{(h_1 - h'_1) \cdot b_1 + (h_2 - h'_2) \cdot b_2}{2}$$

5. Račun pretokov in depresijskih lijakov

5.1. Dotok iz Drave, depresija v gradbeni jami 212 m, stacionarno stanje

Konstruirali smo strujno mrežo samo za suponiran dotok iz Drave. Rezultati računanja pretokov v posameznih pasovih in skupnega dotoka so podani v tabeli 1.

Dotok vode v gradbeno jamo pri suponiranem napajanju podtalnice samo iz Drave

Inflow into the building pit at supposed recharge of ground water from Drava river only

Tabela 1		Table 1	
Pas		Dotok ku.m/sek	
Belt		Inflow cu.m/sec	
I		0,0732	
II		0,0837	
III		0,0942	
IV		0,0910	
V		0,0725	
VI		0,0540	
Skupno			
Total		0,47	

5.2. Kombinirani dotok v gradbeno jamo iz podtalnice Dravskega polja in iz Drave. Gladina v gradbeni jami na koti 222 m

V strujni mreži je dotočno območje razdeljeno na tri pasove. Za srednji pas (II) so rezultati računa pretokov in debeline vodonosne plasti, ki nam dajejo vpogled v oblikovanje depresijske ploskve, podani v tabeli 2.

Pretok vode v odsekih pasu II strujne mreže
Water flow in sections of the flow net belt II

Tabela 2

Table 2

Odsek Section m	Pretok m ³ /sek Water flow cu. m/sec	Debelina h_1 vodne plasti (m) pri oddaljenosti od gradbene jame The thickness h_1 of aquifer in meters at distances from the building pit			
		100 m	500 m	1000 m	2000 m
0—100	0,758	18,70			
0—500	0,292	13,99	19,80		
0—1000	0,232	13,30	18,25	21,20	
0—2000	0,197	12,85	17,26	19,91	23,20

Debelina vodonosne plasti h_1 je merjena od vododržnega pliocenskega proda navzgor. V gradbeni jami smo računali s koto pliocenskega proda 212 m.

Pretoki vseh treh pasov in skupni dotok so za razne vplive depresije podani v tabeli 3.

Dotok vode v gradbeno jamo pri napajanju iz Drave in iz podtalnice Dravskega polja pri vodni gladini v jami na koti 222 m

Inflow into the building pit at recharge from Drava river and from ground water of Dravsko Polje at water table in the building pit on the plus 222 meter level

Tabela 3

Table 3

Pas Belt	Dotok v gradbeno jamo (m ³ /sek) pri vplivu depresije do Inflow into the building pit (cu. m/sec) at the drawdown extent up to		
	500 m	1000 m	2000 m
I	0,170	0,136	0,134
II	0,292	0,232	0,197
III	0,170	0,136	0,134
Skupno Total	0,632	0,504	0,465

Račun časovnega širjenja depresije pa nam je dal rezultate, ki jih kaže tabela 4.

Dolgotrajnejšega vpliva depresije v jami na koti 222 m nismo računali, ker naj bi se bila v tem času gladina vode v jami že znižala.

Časovno širjenje depresijskega lijaka in dotok v jamo

Depression cone expanding with time and corresponding total water inflow

Tabela 4

Table 4

Čas Time	Po 3 dneh After 3 days	Po 30 dneh After 30 days	Po 45 dneh After 45 days
Meja depresijskega lijaka m Depression cone limit in meters	500	950	1300
Skupen dotok m ³ /sek Total inflow cu. m/sec	0,63	0,50	0,49

5.3. Dotok iz Drave in iz podtalnice Dravskega polja pri vodni gladini v jami 217 m (sl. 12)

Iz konstruirane strujne mreže smo izračunali dotoke in časovni razvoj depresije. Rezultate kaže tabela 5.

Časovno širjenje depresijskega lijaka in dotok v jamo pri gladini v gradbeni jami na koti 217 m

Depression cone expanding and inflow into the building pit at the water table in the building pit on the plus 217 meter level

Tabela 5

Table 5

Meja depresijskega lijaka m Depression cone limit in meters	500	1000	2000
Čas dni Time days	7	45	150
Skupen dotok m ³ /sek Total inflow cu. m/sec	0,85	0,78	0,69

5.4. Dotok iz Drave in iz podtalnice Dravskega polja pri vodni gladini v jami 212 do 202 m (sl. 13)

Takšno stanje se je začelo, ko so z izkopom dosegli pliocenski prod, in se je nadaljevalo ves čas gradnje ob dotoku podtalnice iz najglobljega dela pleistocenskega proda. Ker so trajale takšne razmere dolgo, sta bila vpliv depresije in ogroženost vodnjakov največja. Tudi za račun vodnih količin je bilo to stanje najvažnejše, ker so bili dotoki dolgotrajni in so povzročali večji del stroškov črpanja.

Za posamezne pasove strujne mreže so podani v tabeli 6 za različno oddaljene profile naravni pretoki podtalnice pred izkopom gradbene jame in dotoki v gradbeno jamo. Naravni pretoki so v bolj oddaljenih profilih pasu večji zaradi večje širine pasu. Računski dotoki pa se z oddaljevanjem manjšajo, ker se zmanjšuje padeč. Vpliv depresije sega do tja, kjer se dotoki izenačijo. Ravnotežje je doseženo tam, kjer je

$$Q \text{ dotoka} = Q \text{ odtoka}$$

Meje depresijskega lijaka za posamezne pasove strujne mreže pri vodni gladini v gradbeni jami na koti 212 m do 202 m

Depression cone limits in individual flow net belt at water table in the building pit on the plus 212 meter to 202 meter levels

Tabela 6

Table 6

Pas Belt m	Oddaljenost profila Distance of the section m	Pretok podtalnice pred izkopom m ³ /sek Discharge of ground water before excavation cu. m/sec	Izračunan dotok v grad- beno jamo m ³ /sek Calculated inflow into the building pit cu. m/sec	Meja depresijskega lijaka m Limit of depression cone m
I	2500		0,090	Drava
II	4000	0,188	0,139	2500
	3000	0,169	0,143	
	2000	0,134	0,150	
III	5000	0,195	0,198	5000
	4000	0,195	0,220	
	3000	0,195	0,252	
IV	5000	0,165	0,155	4500
	4000	0,151	0,164	
	3000	0,136	0,181	
V	5000	0,143	0,102	4000
	4000	0,113	0,109	
	3000	0,076	0,120	

kar pomeni, da je tam meja depresije.

Rezultati časovnega razvoja dotoka v gradbeno jamo so podani v tabeli 7.

Upadanje dotoka v gradbeno jamo, odvisno od časa

Water inflow decreasing with time

Tabela 7

Table 7

Čas Time	Skupen dotok v gradbeno jamo m ³ /sek Total inflow into the building pit cu. m/sec	Opomba Note
Po 1 mesecu After 1 month	0,93	Stacionarno stanje Steady flow
Po 5 mesecih After 5 months	0,85	
Po 1 letu After 1 year	0,81	
Po 2 letih After 2 years	0,77	
Po 5 letih After 5 years	0,70	

6. Meritve in opazovanja

Med izkopom gradbene jame smo merili dotoke vanjo in gladino podtalnice v številnih piezometrih. Metoda meritev vodnih dotokov je bila različna in je vplivala na točnost rezultatov. V prvi fazi, ko je voda odtekala še po kineti (sl. 3), so bile vodne količine merjene s hidrometričnimi krili, pozneje s porabljeno energijo električnih črpalk (sl. 4) in končno, najbolj točno, s Thompsonovim prelivom.

Primerjava izmerjenih in izračunanih dotokov v jamo

Comparison of calculated and measured inflows

Tabela 8

Table 8

Merjeno — Measured			Računano — Calculated		
Dne Date	Kota gladine v gradbeni jami Water table level in the building pit m	Dotok m ³ /sek Inflow cu. m/sec	Kota gladine v gradbeni jami Water table level in the building pit m	Dotok po našem računu m ³ /sek Inflow according to our calculations cu. m/sec	Dotok, računan po Šestakovu m ³ /sek Inflow calculated after Šestakov cu. m/sec
19. 2. 65	230,20	0,000			
23. 2.	228,46				
24. 2.	228,24	0,360			
26. 2.	227,62				
8. 3.	226,76	0,289			
15. 3.	226,75				
22. 3.	226,92	0,247			
29. 3.	226,85				
9. 4.	226,00				
19. 4.	224,64				
28. 4.	223,92				
11. 5.	223,23				
19. 5.	222,71				
25. 5.	222,76	} ca. 0,597	222	0,63—0,50	
28. 5.	219,61				
31. 5.	218,53				
4. 6.	218,33	ca.			
7. 6.	217,46	0,696	217	0,78—0,69	
1. 7.	214,30	0,731			
1. 8.	214,30	0,756	212	0,85	0,327
1. 9.	214,30	0,781			
1. 10.	214,30	0,753			
1. 11.	214,30	0,748			
1. 12.	214,30	0,749			
1. 1. 66	214,30	0,755			0,135
1. 2.	214,30	0,729			
20. 5. 67	214,30	0,636	212 Po 1 letu	0,81	
			212 Po 2 letih	0,77	0,066
			212 Po 5 letih	0,70	

V tabeli 8 je podana primerjava merjenih in računskih dotokov. Pri računskih dotokih smo upoštevali račun s postopnim približevanjem in prvotni račun linearnega dotoka skozi tri stene gradbene jame po Šestakovu (Vidmar, 1964).

Pri izkopu se je pokazalo, da je meja med pliocenskim in pleistocenskim prodrom na koti okrog 213,5 m, torej višje, kot smo računali. Za dovod vode do črpališča je bil zgrajen zbiralni kanal z gladino vode na koti 214,3 m (sl. 6, 7, 8). Gladina podtalnice, ki je dotekala v zbiralni kanal, je bila 0,1 do 0,5 m višja kakor gladina vode v kanalu. Posebno značilno je bilo, da so bili izviri najmočnejši v vogalih gradbene jame, precej močni pa v sredini stranic gradbene jame, kar vidimo na slikah 6, 7 in 8.

Ta pojav lahko enostavno razložimo. Slika 13 kaže, da so bile hidroizohipse okoli gradbene jame krožne črte. Ker pa je bila gradbena jama pravokotna, so se njeni vogali zajedli najdlje v krožno oblikovano podtalnico. Strmec podtalnice je bil zato proti vogalom največji, in zato so bili tam izviri najmočnejši. Za preostalo podtalnico, ki je niso pritegnili vogali, pa je bil največji strmec proti sredini stranic jame, kjer so bili izviri drugi po jakosti.

V vsem širšem zaledju gradbene jame stalno merijo nivo podtalnice v številnih piezometrih, zato je bilo možno konstruirati geohidrološke karte in oceniti drenažni vpliv izkopa.

Tabela 9 kaže primerjavo prvotnih in sedanjih vodnih gladin z gladinami, ugotovljenimi računsko. Iz tabele vidimo, da je izhodiščna merjena gladina vode v gradbeni jami (214,3 m) višja kakor je bilo računano (212 m), in sicer zaradi višje lege pliocenskega proda (213,0 do 213,5 m) in zaradi spremenjene konstrukcije zbiralnega kanala. Tudi v zaledju je gladina podtalnice nekoliko višja kot po računu, kar je delno posledica višje izhodiščne gladine delno pa hitrejšega zmanjševanja vpliva depresije, kar nam predvsem kaže strmi padec gladine v bližini gradbene jame.

Vpliv depresije je še jasno viden v 1,7 km oddaljenem Prepolju, v bolj oddaljenih krajih pa ga zakriva naravno nihanje podtalnice velikosti 0,5 do 0,9 m, kar je več kot znaša depresija.

Karti hidroizohips z dne 20. decembra 1965 in 23. marca 1967 se ne razlikujeta mnogo, kar kaže na to, da se je podtalnica v glavnem hitro znižala, to je v času okrog pol leta. Zadnja meritev dotokov v gradbeno jamo v maju 1967 je pokazala, da se dotoki še zmanjšujejo. To kaže, da se vpliv depresije še širi in da se podtalnica še znižuje.

7. Povzetek in kritična ocena študije

Zaradi globoke depresije v gradbeni jami se podtalnica v njeni okolici ne napaja več samo iz podtalnice Dravskega polja, temveč tudi iz Drave. Zato je račun gladine podtalnice in dotoka v gradbeno jamo kompliciran. Vpliv napajanja iz dveh smeri smo računsko vrednotili po metodi postopnega približevanja. Dobljene rezultate je investitor uporabil pri presoji možnosti izkopa ob direktnem črpanju vode iz gradbene jame in za oceno potrebne zmogljivosti črpalk ter nadalje pri odločitvi, da za Starše in Prepolje ni potrebna izgradnja vodovoda.

Dotoki, ki smo jih izračunali, so za 10 do 15 % večji od merjenih (tabela 8). Vzrokov za to je več.

Za ves strujni pas smo računali z laminarnim pretokom podtalnice, vendar bi morali v bližini gradbene jame, kjer se strujni pas zoži, vodonosna plast pa stanjša in se s tem poveča hitrost strujanja, računati s turbulentnim tokom in z večjimi izgubami padca.

Za vse območje strojnice smo upoštevali enak koeficient prepustnosti. V prvi fazi praznjenja gradbene jame, ko je bila prebita kineta odvodnega kanala in se je vodna gladina v jami znižala na koto 223 m, pa smo po analizi padcev opazili, da je južno od jame prepustnost manjša. Že takrat smo v analizi prvih rezultatov merjenja predvidevali, da bodo dejanski dotoki za 20 % manjši od izračunanih.

Dotoki so manjši tudi zaradi višjega položaja pliocenskega proda, ki sega do kote 213,0 do 213,5 m in zaradi spremenjene konstrukcije zbiralnega kanala. Sedanja gladina v zbiralnem kanalu je na koti 214,3 m (sl. 7). Do te kote sega depresija v gradbeni jami, medtem ko smo v računu upoštevali depresijo do kote 212 m.

Vpliv depresije je nekoliko manjši, kot smo računali (tabela 9), ker je njena gladina v gradbeni jami za 2 m višja in ker se podtalnica v bližini

Primerjava izmerjenih in izračunanih gladin podtalnice
Comparison of calculated and measured water table levels

Tabela 9

Table 9

Kraj Locality	Kota vodne gladine pred izkopom Water table level before excavation		Kota vodne gladine med deli Water table level during the excavations		Izračunana kota vodne gladine Calculated water table level	
	minim.	max.	20. 11. 65 po 6 mes. after 6 months	29. 3. 67 po 2 letih after 2 years	po 2 letih after 2 years	po 5 letih after 5 years
	31. 3. 64	10. 6. 56				
Starše	230,0	230,7	230,0	230,7	231,0	231,0
Prepolje	234,2	234,4	233,5	233,6	231,5	231,0
Ravno polje	232,5	233,5	232,8	233,0	232,3	231,2
Zlatoličje	228,6	228,6	224,2		225,0	225,0
Dovod. kan. Head water canal						
1000 m	232,8	233,2	231,0		230,0	229,2
500 m	231,6	232,0	228,2		227,4	226,4
250 m	231,0	231,5	225,8		224,4	224,0
Gradbena jama						
Building pit	230,3	230,9	214,3	214,3	212,0	212,0

gradbene jame dviga bolj strmo. To pa je posledica večjih izgub padca zaradi povečane hitrosti pronicanja.

Depresijski lijak (sl. 14) je hitreje sledil zniževanju gladine v gradbeni jami, kakor smo pričakovali po računu. Vzrok je v tem, da smo v računu upoštevali poroznost proda s 30 %, medtem ko cenimo sedaj, da efektivna poroznost komaj presega 10 %. Treba pa je upoštevati še to, da je bil vpliv depresije v celoti manjši.

GROUND WATER INFLOW INTO THE DEEP BUILDING PIT OF THE POWERHOUSE OF THE SREDNJA DRAVA POWER STATION I

1. Problems to be solved

The power station Srednja Drava I exploits the 32 m head of the river Drava between two towns Maribor and Ptuj. The surface of the Powerhouse area is on the plus 238 m above sea level. The footings of the Powerhouse are founded on the plus 201 m level, that is 37 meters deep and 29,5 meters below the groundwater table. The excavation of the building pit, that is a volume of more than 500 000 cubic meters, deep into the water bearing gravel presented an extremely difficult problem for both the designer and the performer. Previous geological research work which included deep boring and pumping tests proved that the highly permeable Pleistocene gravel reaching the plus 212 m level is underlain by less permeable Pliocene gravel. The main problem was to excavate the water bearing Pleistocene gravel between the plus 230,5 m and 212 m levels.

The time for Power Plant completion has been shortly fixed owing to power deficiency. For this reason the investor Dravske elektrarne decided to excavate the Pleistocene gravel without sheet pile curtains and without grouting works, but with immediate pumping from the building pit (Figs 1—5). When excavating the underlying Pliocene gravel, however, the pumping should be carried out from a collector ditch designed on the border of Pleistocene and Pliocene gravels (Figs 6, 7, 8). Such a dewatering had to be proved by calculation of the ground water inflow rates into the building pit in several excavation stages. This was the most important task of the study ordered by the investor. The maximum inflow was decisive for determination of pump capacity. The mean inflow, however, had to be ascertained because of pumping costs evaluation in a time of three years.

The second aim of our study was to establish the drawdown of ground water west of excavation works, where the water supply of Prepolje and Starše villages, depending on water table wells, was in question.

2. Hidrogeologic relations

At the Powerhouse site two wells were dug in order to carry out the permeability tests of the Pleistocene and Pliocene gravels. The permeability coefficient of Pleistocene gravel shown by pumping tests is

$$k = 3,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm/sec}$$

The permeability coefficient of Pliocene gravel, however, ranges from $5.3 \cdot 10^{-5}$ to $1.2 \cdot 10^{-4}$ cm/sec.

The geologic investigations showed that the plane separating the Pleistocene and Pliocene gravels dips slightly northeastward (2 ‰).

3. Idealised relations in water inflow evaluation

To illustrate the groundwater flow toward the building pit the corresponding flow net had to be constructed. In order to examine the groundwater flow we have divided the constructed flow net in several belts bordered by flow lines.

We evaluated the unsteady flow of ground water by calculating a steady flow for longer and longer belt sections, that is 0—100 meters, 0—500 meters, 0—1000 meters, and 0—2000 meters. Supposing the ground water moved simultaneously in these sections, we obtained an unsteady flow of ground water divided in the sections 0—100 meters, 100—500 meters, 500—1000 meters, and 1000—2000 meters. The discharge increases in direction of excavations.

We supposed in our calculation a sudden drawdown of the water table in the building pit to plus 222 meter, plus 217 meter, and plus 212 meter levels. The real drawdown, however, increased proportionally to the excavation during five months.

We supposed the permeability coefficient to be uniform in the entire area.

We considered the slope of the water table to be uniform in every belt of the flow net.

Further we believed the boundary plane separating the Pliocene and Pleistocene gravels to be a plain slightly inclined towards northeast (2 ‰).

We considered, finally, the Pliocene gravel being an impermeable basement of the Pleistocene gravel.

4. Calculation method

We solved the problem of inflow gradually by the approximation method. In the belts between any two adjacent flow lines of the constructed flow net, we calculated, at the supposed drawdown in the building pit, the discharges and corresponding drawdown curves of the belt sections, more and more distant from the excavation proportionally with the expanding of the depression cone. In proof of rightly chosen discharge and corresponding drawdown curve, the total calculated drawdown should be the same as the difference between the ground water table at the beginning of the belt before this drawdown stage and new drawdown in the building pit.

According to water table contour lines taken from drawdown curves, we adjusted our supposed flow net and repeated our calculation as long as the flow net was correct.

To obtain the discharge Q we applied Dupuit's equation revised by Kamensky

$$Q = k \cdot \frac{b_1 - b_2}{\ln b_1 - \ln b_2} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$$

where k is the coefficient of permeability, b_1 and b_2 are the widths of the flow net belt in transversal sections 1 and 2, h_1 and h_2 are the thicknesses of the aquifer, and L is the distance between the sections 1 and 2 (Figs 9, 10).

To explain the expanding of depression cone, we took in consideration a part of the flow belt between the profiles 1 and 2 shown in figure 11.

The discharge Q and the thicknesses of the aquifer h_1 and h_2 correspond to the drawdown curve d . The discharge Q' and the thicknesses of the aquifer h_1' and h_2' , however, correspond to the drawdown curve d' .

$$Q > Q' \quad h_1 > h_1' \quad h_2 > h_2'$$

The discharge of the volume V in the time t between the drawdown curves d and d' equals the difference of the discharge of both drawdowns. From these the equation

$$t = \frac{V \cdot n}{Q - Q'}$$

can be written, where n is the coefficient of effective porosity.

We calculated the volume V by application of the equation

$$V = \frac{(h_1 - h_1') \cdot b_1 + (h_2 - h_2') \cdot b_2}{2}$$

5. Calculation of the inflow and the depression cone

Inflows as functions of different radii of influence and time are shown in tables 1—7. Drawdowns on the levels 222 meters, 217 meters (Fig. 12), and 212—202 meters (Fig. 13) are considered.

6. Measurements and observations

During excavation work measurements of water inflow into the building pit and measurements of the water table in numerous piezometer tubes were carried out (Fig. 14). Table 8 shows measured inflows in comparison with the ones obtained by calculation.

The evaluation data imply the results of our volumetric inflow calculation by approximation method and the linear inflow through three slopes of the building pit after Šestakov. We can compare the original and the actual water tables with the ones obtained by calculations in table 9.

7. Summary

The excavation works caused a deep drawdown in the building pit. For this reason an involved recharge of ground water entered the area of the building pit. The recharge from Dravsko Polje has been combined with the one from the Drava river. In order to find the numerical value of the influence of the drawdown the author developed his calculation method of gradual approximation.

The results obtained by this method showed:

First, that the excavation may be carried out without sheet pile curtains and without grouting works, but under permanent pumping from the building pit. Secondly, that a new water supply for Prepolje and Starše villages will not be necessary.

The inflows obtained by calculation exceed the measured ones by 10 % to 15 percent (Table 8).

There are many reasons for such a discrepancy.

First, in our calculation a laminar flow was assumed in the entire flow net, but a turbulent flow in the immediate neighbourhood of excavation works with an increased head loss should be taken into consideration.

Secondly, we assumed a uniform permeability in the entire Powerhouse area. But we have already noticed a lower permeability of the area lying south of the excavation works during the first stage of water removal from the building pit through the tailrace canal (Figs 2, 3), when the water table decreased to plus 223 meter level. This resulted after analyzing the drawdown curves. At that time we established, that the inflow in fact would be smaller by 20 percent than it had been calculated before excavations.

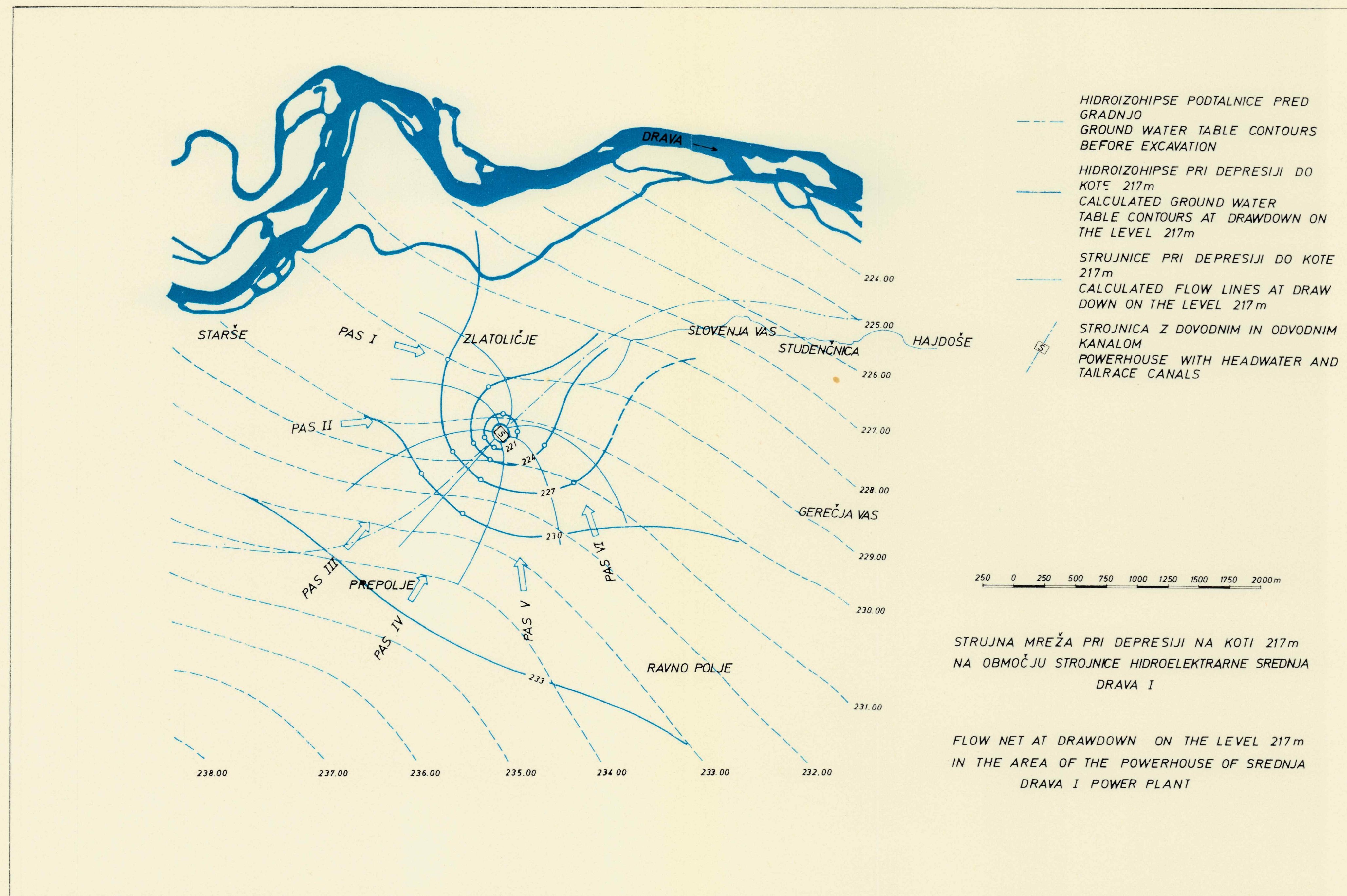
Thirdly, the inflow was smaller because of a higher position of the Pliocene gravel, reaching to plus 213—213,5 meter level, as well as a changed construction of the collector ditch. The actual water table in the collector ditch was on the plus 214,3 meter level (Fig. 7), while in our calculation a drawdown to plus 212 meter level was assumed.

The actual drawdown in the building pit exerts a somewhat smaller influence on the adjacent area as expected on the basis of our calculation (Fig. 14). This is to be explained with a 2 meter shallower depression and with steeply rising ground water in the neighbourhood of the building pit resulting from a larger head loss in consequence of enlarged seepage velocity.

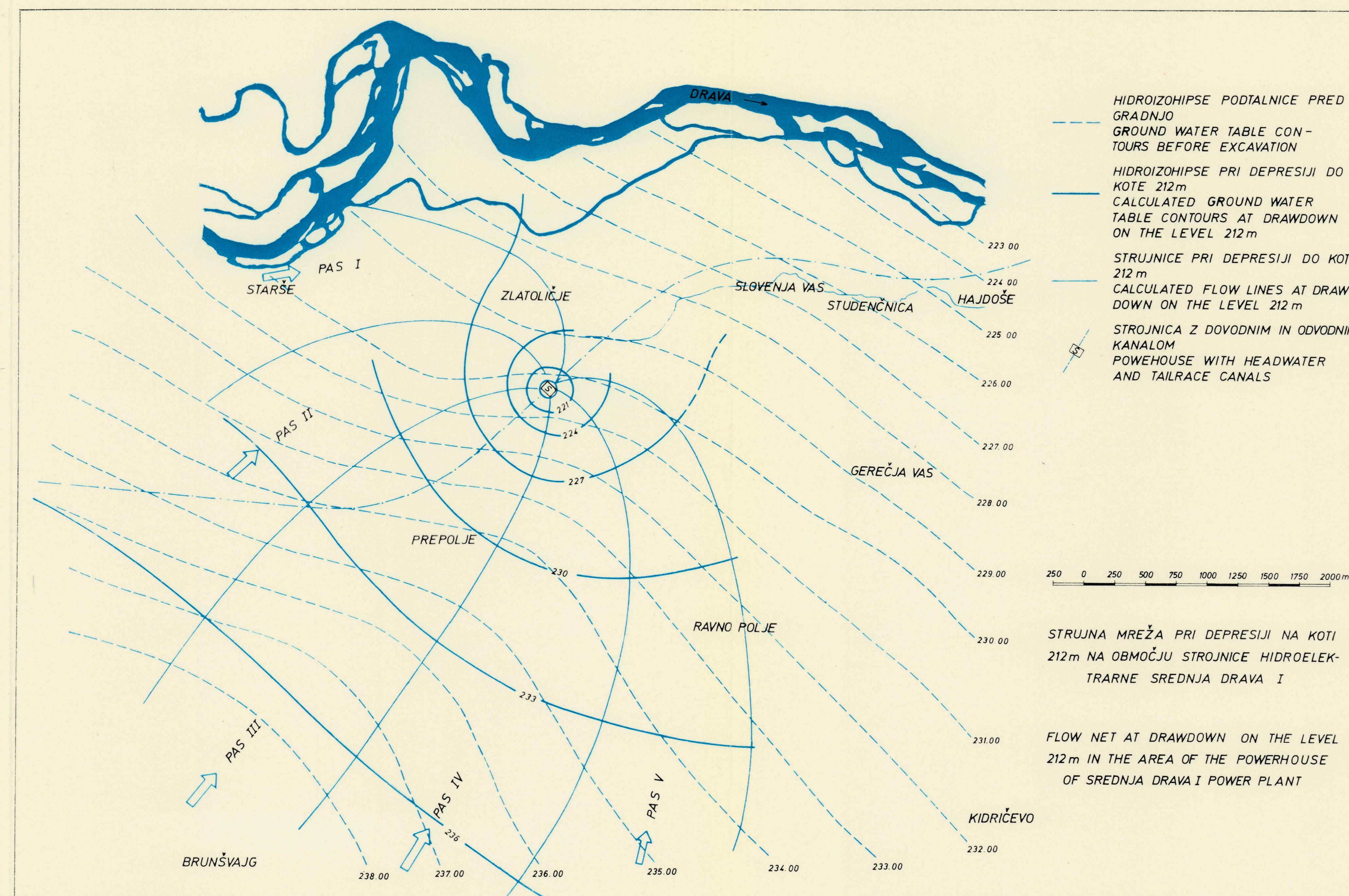
The depression cone followed faster the drawdown in the building pit as expected after our calculation. This resulted from a lower effective porosity of 10 percent, while in our calculation it was assumed to be 30 percent. Besides the totale drawdown was minor as taken in account by calculation.

LITERATURA

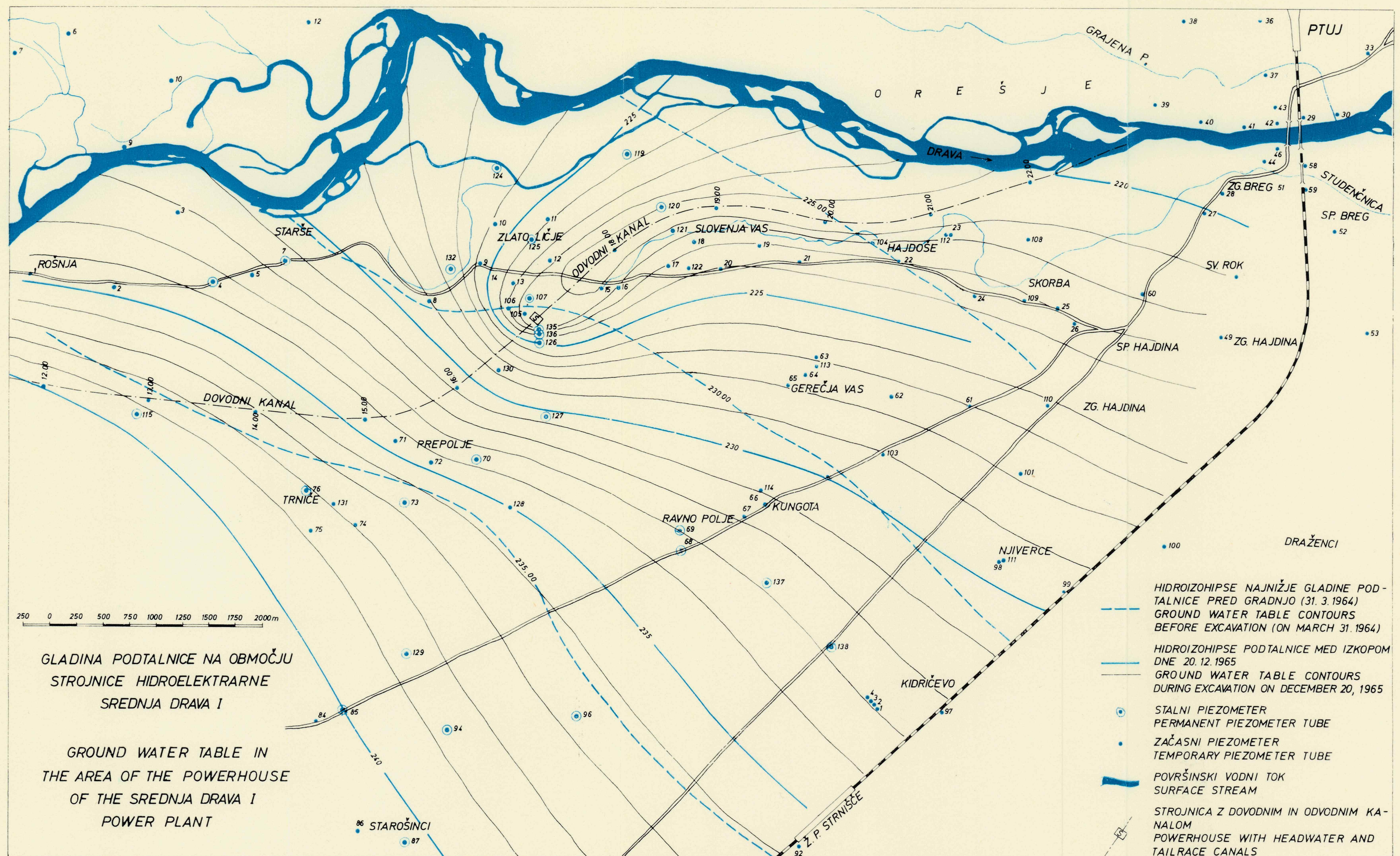
Breznik, M. in Žlebnik, L., 1962, Geološke razmere na območju projektiranih hidroelektrarn na Dravi med Mariborom in Ptujem. Geologija 7. knjiga, Ljubljana.



Sl. 12 — Fig. 12



Sl. 13 — Fig. 13



Sl. 14 — Fig. 14

- Bogomolov, G. V., Silin-Bekčurin, A. I., 1959, Specijalna hidrogeologija. Građevinska knjiga, Beograd.
- Castany, G., 1963, *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris.
- Dravske elektrarne Maribor, Kovačič, V., 1964, Hidrološka karta Dravskega polja, minimalni vodostaj, 31. 3. 1964. Kopiran načrt v arhivu Dravskih elektrarn, Maribor.
- GP TEHNIKA, Breznik, M., 1964, Študija o znižanju gladine podtalnice na področju strojnice HE Srednja Drava I in o dotokih v gradbeno jamo. Tipkan projekt v arhivu Projektivnega biroja GP Tehnike, Ljubljana.
- Hidrometeorološki zavod SRS Ljubljana, 1963, Obstoječi režim podtalnice vzdolž kanala HE SD I na odseku Maribor—Ptuj. Tipkano poročilo v arhivu Hidrometeorološkega zavoda SRS, Ljubljana.
- Schoeller, H., 1959, *Arid zone hydrology, Recent developments*. Unesco, Paris.
- Schoeller, H., 1962, *Les eaux souterraines*. Masson, Paris.
- Silin-Bekčurin, A. I., 1965, *Dinamika podzemnih vod*. Izdatel'stvo Moskovskogo univerziteta, Moskva.
- Šestakov, V. M., 1954, Rasčēt krivyh depressii v zemljanyh plotinah i dambah pri poniženii gorizonta vodohranilišča. *Gidrotehn. Stroit.* 23, 4:32.
- Citirano po L. Šuklje, 1957, *Mehanika tal*. Razmnožena skripta, Ljubljana.
- Vidmar, S., 1964, Poročilo o preiskavi stabilnosti pobočij stavbne jame za strojnico HE Srednja Drava I ter o dotoku talne vode v stavbno jamo. Poročilo v arhivu laboratorija za mehaniko tal univerze v Ljubljani, Ljubljana.
- Žlebnik, L., 1966, Hidrogeološke razmere na območju strojnice elektrarne Srednja Drava I. stopnja. *Geologija* 9. knjiga, Ljubljana.