Analiza istražnog crpljenja na području Belišća

Taraš, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:491759

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Taraš

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Luka Taraš

Analiza istražnog crpljenja na području Belišća

Diplomski rad

Split, 2015.

Analiza istražnog crpljenja na području Belišća

Sažetak:

U ovom radu je analizirano istražno crpljenje na području Belišća. Određene su hidrogeološke karakteristike tla analizom istražnog crpljenja zdenca pri čemu se koristio numerički model nestacionarnog toka FiltraWell. Provedena je kalibracija numeričkog modela s izmjerenim podacima na terenu. Tako određene karakteristike tla daju dovoljno pouzdane rezultate koji će poslužiti za projektiranje odgovarajuće zaštite podzemnih voda zaobalja rijeke Drave.

Ključne riječi:

Nestacionarno crpljenje zdenca, numerički model procjeđivanja, hidrogeološke karakteristike tla, anizotropija hidrauličke propusnosti

Analysis of well pumping tests on Belišće area

Abstract:

This work presents the analyzing of investigation well pumping on area of Belišće. Hydrogeological characteristics of the soil were determined by analyzing of the well pumping tests using numerical model of unsteady flow called FiltraWell. There were performed calibration of the numerical model with the measured data on the field. Certain characteristics of the soil provide sufficiently reliable results that will be used to design appropriate groundwater protection of the Drava river.

Keywords:

Unsteady pumping well, numerical model of filtration, hydrogeological characteristics of the soil, anisotropy of hydraulic conductivity

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ:	**DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	Luka Taraš
BROJ INDEKSA:	473
KATEDRA:	**Katedra za Privrednu hidrotehniku**
PREDMET:	Modeliranje toka i pronosa u podzemlju

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza istražnog crpljenja na području Belišća

Opis zadatka:

Na području Belišće treba odrediti hidrogeološke karakteristike tla analizom istražnog crpljenja zdenca pri čemu treba koristiti numerički model nestacionarnog toka FiltraWell. Zadatak treba izvršiti kalibracijom numeričkog modela s izmjerenim podacima na terenu.

U Splitu, 18.09.2015.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Hrvoje Gotovac

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Prof. dr. sc. Ivica Boko

Želio bih se zahvaliti svojim roditeljima te bratu i sestri koji su mi uvijek bili potpora i ključan dio ovog važnog dijela života.

Također, hvala za sve svojoj baki Stani koja je uvijek bila tu.

Prijateljima hvala na vremenu provedenom zajedno koje je uvelike olakšalo studij.

Osjećati zahvalnost, a ne iskazati ju, isto je što i umotati poklon, a ne predati ga. (W.A. Ward)

S a d r ž a j

1. UVOD 1

2. PROCJEĐIVANJE PODZEMNIH VODA 3

2.1. Opća jednadžba procjeđivanja 3

2.1.1. Zakon procjeđivanja 3

2.1.2. Izvod nestacionarne diferencijalne jednadžbe tečenja podzemne vode 3

2.1.3. Početni i rubni uvjeti nestacionarnog procjeđivanja 5

2.1.4. Nejaka formulacija procjeđivanja 9

2.2. Nestacionarno crpljenje istražnog zdenca 10

2.2.1. Bousinesqueova jednadžba nestacionarnog strujanja podzemnih voda 10

2.2.2. Rješenje za nestacionarno crpljenje zdenca 13

2.2.3. Izvedba istražnog zdenca i obrada nestacionarnih podataka 15

2.3. Numerički model – "FiltraWell" 20

2.3.1. Analitičke metode 20

2.3.2. Opis modela "FiltraWell" 20

2.3.3. Prikaz rješenja numeričkog modela 21

2.3.4. Opis ispitivanja pokusnog crpljenja u svrhu određivanja nepoznatih parametara 22

2.3.5. Numeričko rješenje procjeđivanja za strujanje prema zdencima 22

2.3.6. Rad u numeričkom modelu "FiltraWell" 24

3. ISTRAŽNO CRPLJENJE NA PODRUČJU BELIŠĆA 26

3.1. Svrha istraživanja 26

3.2. Povijest 26

3.3. Opis bunarskog polja 27

3.4. Hidrogeološke karakteristike područja crpljenja.....29

3.5. Preliminaran proračun hidrauličkih parametara vodonosnika.....29

4. ANALIZA REZULTATA I KALIBRACIJA MODELA..... 30

4.1. Postavljanje ulazne datoteke i prikaz područja strujanja.....30

4.2. Prikaz sniženja istražnog crpljenja 36

4.3. Obrada podataka istražnog crpljenja i rezultati 42

5. ZAKLJUČAK..... 69

Literatura 71

1. UVOD

Na rijeci Dravi se planira gradnja višenamjenskog hidrotehničkog sustava za uređenje voda i zemljišta „Vodna stepenica Osijek“ i dio tog projekta uključuje gradnju akumulacije na području općine Belišća. Kako gradnja akumulacije posljedično ima utjecaj na razinu podzemnih voda u zaobalju jer se događa procjeđivanje vode iz akumulacije, potrebno je ispitati narušavanje prirodnog režima podzemnih voda kako bi se mogla projektirati odgovarajuća zaštita zaobalja od tog štetnog utjecaja.

Treba obratiti pozornost na rast razina podzemnih voda i zbog obližnje tvornice "Kombinat Belišće" koja je posebno osjetljiva na takve promjene. Način na koji se može ispitati mogući utjecaj procjeđivanja voda iz akumulacije na obližnje podzemne vode u zaobalju je izvođenjem istražnog crpljenja.

Diplomski rad će se baviti analizom istražnog crpljenja zdenca iz koje će se dobiti hidrogeološke i hidrauličke karakteristike tla koje omogućavaju analizu procjeđivanja nakon gradnje akumulacije na obali.

Analiza će se provoditi numeričkim modelom (u ovom slučaju s programom "FiltraWell") uz kalibraciju s izmjerenim rezultatima sniženja u piezometrima koji su u blizini bunara. Rezultati istražnog crpljenja bunara će dati određene vrijednosti horizontalnog i vertikalnog koeficijenta propusnosti, njihovu anizotropiju te aktivnu poroznost koje odgovaraju najboljem usklađivanju eksperimentalnih i modelskih rješenja.

Ti rezultati će pokazati hidrogeološke karakteristike vodonosnika u zaobalju te količinu procjeđivanja nakon zahvata pomoću kojih se može dalje planirati efikasna i odgovarajuća zaštita podzemnih voda što je i cilj cijele ove analize.

Koristit će se 2D numerički model potencijalnog strujanja za strujanje u poroznim, nehomogenim i anizotropnim sredinama.

Treba pripremiti slijedeće podloge:

- definirati prostornu dubinu modela

- definirati rubne uvjete

- ispitati rješenja s različitim anizotropijama vodonosnog sloja

Planirano rješenje zaštite zaobalja

Akumulaciju V.S. Osijek je moguće jedino ostvariti tako da se rijeka Drava omeđi nasipima te da se vodostaji na potezu akumulacije dignu iznad razine okolnog terena. Kako cijela akumulacija leži na propusnim kvartarnim naslagama, javlja se problem procjeđivanja ispod nasipa i utjecaj tog procjeđivanja na režim podzemnih voda zaobalja.

Izvedbom drenažnog kanala, prihvatit će se dio infiltracijskih voda iz akumulacije. Ocjenu veličine dreniranja zaobalnih podzemnih voda i voda iz akumulacije moguće je dati samo ako se raspolaže s potrebnim hidrogeološkim podacima, a koji su također nužni za razmatranje tehničkih mjera zaštite područja od neželjenih utjecaja. Ovaj je problem moguće većim dijelom riješiti izvedbom minimalne dužine horizontalnog zastora uz vodnu nožicu nasipa te izvedbom odvodnih jaraka na zračnoj strani nasipa koji prikupljaju i odvode veliki dio procjednih voda nizvodno od pregradnog profila.

Stupanj efikasnosti djelovanja drenažnih jaraka duž nasipa akumulacije ovisi o tome koliki će postotak procjednih količina vode iz akumulacije doći u šire zaobalje gdje će poremetiti prirodni režim podzemnih voda. Za postavljanje modela zaštite, odnosno zaštite zaobalja potrebno je poznavati stupanj efikasnosti djelovanja drenažnih jaraka, a to je moguće jedino uz poznavanje vertikalnog i horizontalnog koeficijenta propusnosti gornjeg vodonosnog sloja, odnosno veličine anizotropije vodonosnika duž trase nasipa akumulacije.

Do podatka o anizotropiji moguće je doći samo na osnovu istražnog crpljenja zdenca koje se provodi na karakterističnim dionicama trase nasipa akumulacije. Tako je Programom ispitivanja anizotropije propusnosti za idejni projekt, Programom geotehničkih istražnih radova za V.S. Osijek i V.S. Donji Miholjac predviđeno istražno crpljenje na ukupno tri lokacije, a u sklopu ispitivanja za projektiranje zaštitnog sustava zaobalja V.S. Osijek.

U svrhu dobijanja što točnije prognoze djelovanja drenažnog kanala i projektnih parametara za projektiranje zaštite područja, a posebno područja oko tvornice "Kombinat Belišće", programirani su i izvedeni istražni radovi.

2. PROCJEĐIVANJE PODZEMNIH VODA

2.1. Opća jednadžba procjeđivanja

2.1.1. Zakon procjeđivanja

Procjeđivanje vode kroz, općenito anizotropni, porozni medij odvija se kod srazmjerno malih brzina, tako da se može primjeniti prvo poopćenje Darcyjevog zakona:

$$v_i = -K_{ij} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.1)$$

$i,j = 1,2,3;\ h = z + p / \rho g$

gdje je:

h - piezometarska visina (m)

z - kota položaja točke (m)

p - tlak u točki (Pa)

ρ - gustoća vode (kg/m^3)

g - ubrzanje sile teže (m/s^2)

K - tenzor filtracijskih karakteristika medija (m/s)

x - koordinate osi Kartezijevog koordinatnog sustava (m)

Tenzor filtracijskih karakteristika medija K je simetričan tenzor drugog reda i određuje se eksperimentalno.

2.1.2. Izvod nestacionarne diferencijalne jednadžbe tečenja podzemne vode

Jednadžba procjeđivanja izvodi se iz zakona održanja mase na kontrolnom volumenu V, kojeg zatvara ploha A :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho m dV + \int_A \rho v_i n_i dA = \int_V f_0 dV + \int_V Q_0 \Delta_x \Delta_t dV \quad (2.2)$$

$i,j = 1,2,3$

gdje je:

m - sadržaj vode u jedinici volumena, tj. aktivna poroznost medija u točki

f_0 - specifična volumenska produkcija mase, tj. proizvodnja mase u

jediničnom volumenu ($kg/s/m^3$)

Q_0 - točkasti izvor ili ponor mase (kg/s)

Δ_x, Δ_t - Diracove funkcije za točke x i trenutke t

n - jedinična vanjska normala na plohu

Prvi član izražava promjenu u jedinici vremena mase sadržane u kontrolnom volumenu.

Drugi član izražava ukupni netto ulaz - izlaz mase uslijed strujanja.

Treći član izražava ukupnu proizvodnju mase u kontrolnom volumenu, izazvanu raspodijeljenim izvorima ili ponorima mase.

Četvrti član izražava ukupnu proizvodnju mase u kontrolnom volumenu, izazvanu koncentriranim izvorima mase.

Aktivna poroznost, tj. stvarni porni sadržaj vode može biti manji nego li je geomehanička poroznost. U tom slučaju koeficijent zasićenja je manji od jedan, dakle, medij je nezasićen.

U daljnjem tekstu promatrat će se strujanje u zasićenim medijima, gdje je koeficijent zasićenja jednak jedinici.

Primjenom Gauss - Green - Ostrogradski poučka o transformaciji integrala po projekciji na integral po području, te kako (2.2) vrijedi za bilo koji kontrolni volumen, a kontrolni volumen se ne mijenja po vremenu, jednadžba kontinuiteta poprima oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho m = \frac{\partial}{\partial x_i}\rho v_i + f_0 + Q_0\Delta_x\Delta_t \quad (2.3)$$

Uvodeći Darcyjev zakon (2.1) u (2.3) dobije se jednadžba procjeđivanja:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho m = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right) + f_0 + Q_0\Delta_x\Delta_t \quad (2.4)$$

i,j = 1,2,3

Pri tome se za praktične potrebe može smatrati da se gustoća vode i aktivna poroznost medija mijenjaju linearno s promjenom tlaka (iz razvoja u red uzimaju se samo prva dva člana):

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \alpha(p - p_0) \\ m &= m_0 + \beta(p - p_0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdje su α i β koeficijenti linearne promjenjivosti, prema hidromehaničkim i geomehaničkim zakonima.

Parcijalnim deriviranjem prvog člana u jednadžbi (2.4), te uvodeći (2.5) u (2.4), nakon sređivanja dobije se jednadžba procjeđivanja u obliku:

$$\mu' \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + f_0' + Q_0' \Delta_x \Delta_t \quad (2.6)$$

i,j = 1,2,3

gdje je:

$$\begin{aligned} \mu' &= \rho g \beta + m g \alpha \\ f' &= f_0 / \rho \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$Q' = Q_0 / \rho \quad (2.8)$$

μ' - naziva se volumenskim koeficijentom elastičnog kapaciteta, često i elastičnog poroziteta, odnosno uskladištenja poroznog medija, u točki (aktivna poroznost).

Kako su α i β male vrijednosti, to se red veličine ovog parametra kreće ispod 0.001 za uobičajene uvjete vodonosnih slojeva pod tlakom.

2.1.3. Početni i rubni uvjeti nestacionarnog procjeđivanja

Jednadžba (2.6) rješava se za odabrane početne i rubne uvjete. Početni i rubni uvjeti mogu biti eksplicitno ili implicitno zadani.

Početni uvjeti

Odražavaju neko trenutno stanje filtracijskog procesa. Stoga se zadaju u obliku razdiobe piezometarske visine:

$h(x,y,z,t_0)$

u nekom trenutku t_0. Tako odabrano stanje može biti bilo neko stacionarno ili dinamičko stanje. Proces se prati od početnog stanja nakon čega je dalje pod kontrolom rubnih uvjeta i

filtracijskih jednadžbi. Stoga u procesima nakon jako dugačkog vremena, stanje procesa više ne ovisi o početnim uvjetima.

Najčešći slučaj modeliranja procesa procjeđivanja svodi se na izdvajanje jednog dijela iz cjeline. Djelovanje odbačenog dijela procesa na proces u promatranom području nadomještava se putem interakcije, tj. putem rubnih uvjeta na zajedničkom rubu.

Prirodni rubni uvjeti

Prirodnim se nameće da se interakcija s odbačenim dijelom procesa nadomjesti tokom (fluksom) ekstenzivnog polja:

q (A,h,t)

dakle, nekom funkcijom toka u točkama ruba. Takav tok, u općem slučaju je složena funkcija položaja točke na rubu, vremena i vrijednosti piezometarskog potencijala u toj točki.

Funkcija toka može se razviti u red po varijabli *h*, gdje je za linearne probleme dovoljno uzeti u obzir samo prva dva člana iz razvoja.

Nužni ili prisilni rubni uvjeti

Primjena prirodnih rubnih uvjeta ne garantira jedinstveno rješenje u svim slučajevima. Stoga je, radi postizanja jedinstvenog rješenja, nužno uvesti stanovite restrikcije, tj. dodati nužne uvjete za jedinstvenost rješenja. Drugim riječima, kod stanovitih prirodnih rubnih uvjeta postoji neizmjerno velik broj mogućih rješenja, od kojih odabiremo ona koja trebamo, prisiljavajući rješenje da u pojedinim točkama promatranog područja poprimi unaprijed zadane vrijednosti.

Stoga se pojam nužnih ili prisilnih rubnih uvjeta ne mora uvijek povezivati s točkama na rubu, već se takvi uvjeti mogu postaviti za bilo koju točku promatranog područja.

Oblik nužnog rubnog uvjeta odabire se prema potrebi, ali to je najčešće u obliku piezometarske visine, bilo na rubu područja, bilo unutar samog područja.

S obzirom da rubni uvjeti predstavljaju interakciju promatranog područja s vanjskim, rubni uvjeti moraju biti poznati u svim točkama ruba.

Uvjeti na slobodnom vodnom licu

Prostorno nestacionarno procjeđivanje u zasićenim sredinama ne mora biti u zatvorenom, vremenski nepromjenjivom području. Tipičan primjer takvog procjeđivanja je strujanje sa slobodnim vodnim licem, gdje je vodno lice vremenski promjenjiva ploha, vidi sliku br. 2.1.

Prostorno gibanje slobodnog vodnog lica mora zadovoljiti kinematički uvjet:

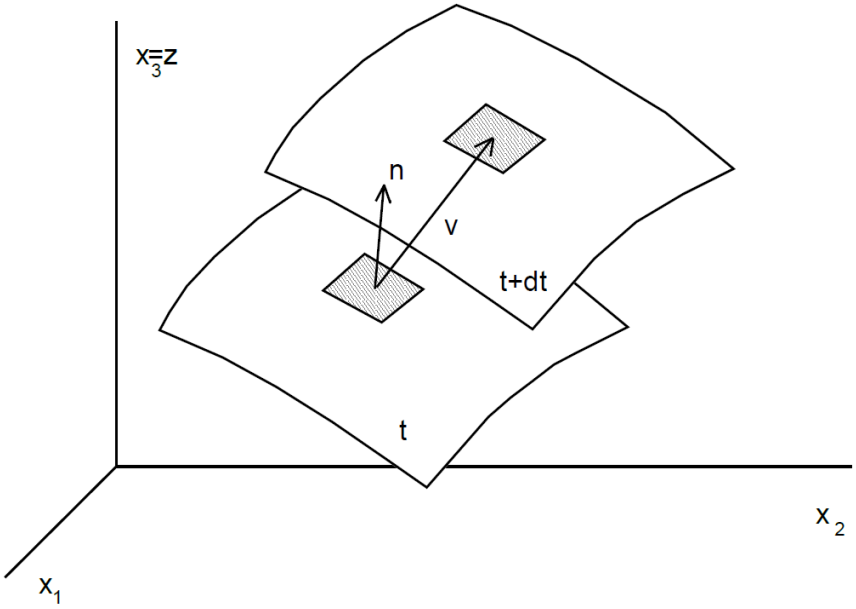
$$v_i = m\frac{\partial x_i}{\partial t} \quad (2.9)$$

i,j = 1,2,3

gdje je:

v_i - vektor filtracijske brzine točaka na vodnom licu

m - koeficijent aktivne poroznosti u području pomaka vodnog lica



Slika br. 2.1 - Pomak vodnog lica

S druge strane, po definiciji vodnog lica, na vodnom licu vlada atmosferski tlak, stoga je piezometarska visina jednaka koti *z*. To je takozvani energijski uvjet.

Ova dva uvjeta u potpunosti određuju rubne uvjete, koje treba zadovoljiti u prostornoj nestacionarnoj filtraciji na slobodnom rubu.

U analitičkom smislu rješavanja jednadžbi procjeđivanja ovog tipa, potrebno je ove uvjete objediniti, i to oblikom prikladnim za jaku formulaciju rješavanja problema.

Neka na slobodnom vodnom licu piezometarski potencijal ploha ima implicitni oblik:

$$h(x_i, t) = 0 \quad (2.10)$$

za koju vrijedi materijalna derivacija:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h}{\partial x_i}\cdot\frac{\partial x_i}{\partial t}$$

odnosno:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+v_i*\cdot\frac{\partial x_i}{\partial t} \quad (2.11)$$

gdje je:

v_i* - stvarna brzina strujanja, određena odnosom $v_i*=\frac{v_i}{m}$ prema brzini procjeđivanja.

Uvodeći (2.9) i (2.1) u (2.11) dobije se:

$$m\frac{\partial h}{\partial t}=K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_i}\frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

i,j = 1,2,3

te nakon uvođenja energijskog uvjeta i to u lijevu stranu jednadžbe (2.12), dobije se uvjet na slobodnom vodnom licu u obliku:

$$m\frac{\partial z}{\partial t}=K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_i}\frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

i, j = 1,2,3

Vidi se, bilo iz izraza (2.12) ili (2.13), da slobodno vodno lice daje nelinearni rubni uvjet. Takva nelinearnost zove se geometrijska nelinearnost. Geometrijska nelinearnost uvijek se javlja kad područje strujanja nije unaprijed eksplicitno zadano, te predstavlja jedan od teže, u općem smislu, rješivih problema.

Za potrebe rješavanja problema ove vrste znatno prikladnija je nejaka, tj. tzv. slaba formulacija problema. Stoga će se za pomak vodnog lica koristiti Lagrangeovske koordinate, tako da se za točke vodnog lica, uz pomoć Darcyjevog zakona (2.1), može napisati u obliku:

$$v_i=m\frac{\partial x_i}{\partial t}=-K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.14)$$

Isto tako, za vodno lice vrijedi:

$$m\frac{\partial x_i}{\partial t}n_i = -K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}n_i \quad (2.15)$$

i, j = 1,2,3

gdje je n_i vektor jedinične normale na vodno lice.

Gibanje vodnog lica rješava se kao slijed rješenja u poznatom području, gdje se od trenutka do trenutka područje mijenja po zakonu (2.14), i rubnog uvjeta (2.15), gdje se za treći koordinatni smjer (smjer z), primjenjuje energijski uvjet $h = z$.

Pomak vodnog lica u uspravnom smjeru

Vrlo čest slučaj je da je pomak vodnog lica ograničen u jednom smjeru, npr. u uspravnom, tj. u smjeru osi z (treći koordinantni smjer). Tada je, radi energijskog uvjeta $h = z$ za rubni uvjet dovoljno koristiti izraz (2.15), koji se svodi na oblik:

$$m\frac{\partial h}{\partial t} = -K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}n_i \quad (2.16)$$

i, j = 1,2,3

Time je ovaj rubni uvjet lineariziran. Kao slijedeći korak moguće je promijeniti uvjet $h = z$ te na takav način uzeti u obzir promjenjivost područja strujanja.

2.1.4. Nejaka formulacija procjeđivanja

Postupak će se prikazati na općoj jednadžbi (2.6) nestacionarnog prostornog procjeđivanja, za koju nejaka formulacija glasi:

$$\int_V u\mu'\frac{\partial h}{\partial t}dV + \int_V K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}\frac{\partial u}{\partial x_i}dV = \int_A uK_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}n_i dA + \int_V uf'dV \quad (2.17)$$

i, j = 1, 2, 3

gdje je *u* test funkcija. Ovdje su izostavljeni koncentrirani izvori i ponori, koji se neće u ovim problemima razmatrati.

2.2. Nestacionarno crpljenje istražnog zdenca

2.2.1. Bousinesqueova jednadžba nestacionarnog strujanja podzemnih voda

Na slici 2.2 prikazano je strujanje podzemne vode kroz kontrolni volumen koje zadovoljava Dupuitovu pretpostavku.

Kontrolni volumen *V* je nepravilan valjak kojem je osnovica površina *A* zatvorena krivuljom *C*. Kroz plašt valjka, odnosno, kroz zatvorenu krivulju *C*, postoji specifični protok:

$$\vec{q} = -KM \cdot gradh \quad (2.18)$$

koji raspisan po koordinatnim osima, glasi:

$$\vec{q} = -KM \frac{\partial h}{\partial x}\vec{i} - KM \frac{\partial h}{\partial y}\vec{j} \quad (2.19)$$

Na uzvodnom dijelu plašta postoji ulazni protok, dok se na nizvodnom javlja izlazni protok.

U stacionarnom strujanju ulazni i izlazni protok su jednaki. U nestacionarnom strujanju javlja se razlika koja ako je pozitivna podiže vodostaj tako da dolazi do popunjavanja pora unutar povećanog kontrolnog volumena. Negativna razlika uzrokuje opadanje vodostaja i ocjeđivanja pora.

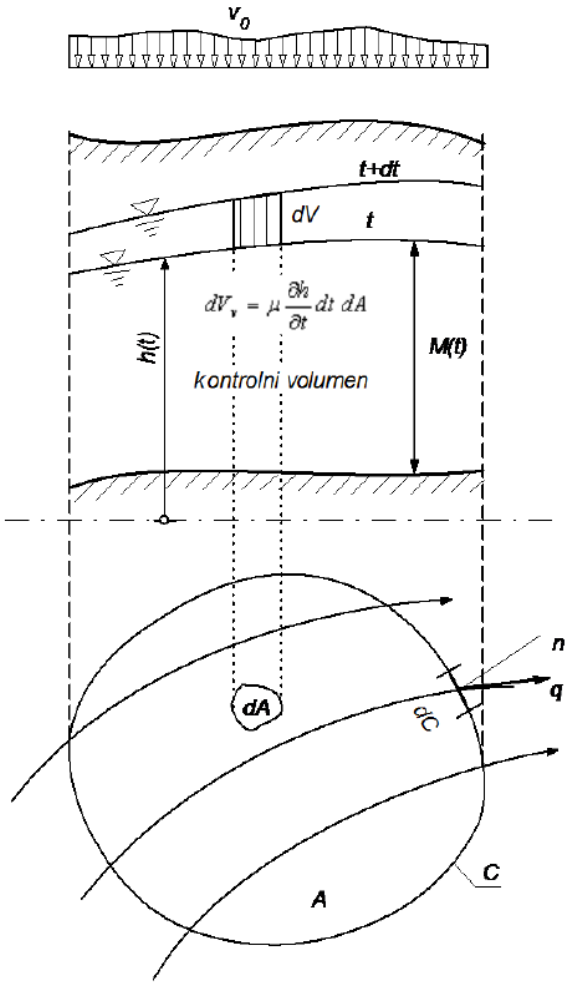
Ukupna netto razlika ulaznog i izlaznog protoka određena je integralom preko krivulje *C*, gdje se specifični protok projicira u smjeru vanjske normale.

Iz elementarnog volumena koji je jednak:

$$dV = dA \cdot \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad (2.20)$$

može se ocijediti ili uskladištiti volumen vode koji je određen veličinom aktivne poroznosti μ:

$$dV_{\upsilon} = \mu \cdot \frac{\partial h}{\partial t} dt \cdot dA \quad (2.21)$$



Slika 2.2 – Kontrolni volumen u vodonosniku

odnosno, odgovarajući specifični protok je:

$$\frac{dV_\upsilon}{dt} = \mu \cdot \frac{\partial h}{\partial t} dA \quad (2.22)$$

Ukupna promjena sadržaja vode u kontrolnom volumenu, izražena u obliku protoka jednaka je:

$$\int_A \mu \frac{\partial h}{\partial t} dA \quad (2.23)$$

Također, uslijed oborina, isparavanja, evapotranspiracije ili ocjeđivanja podinskog sloja, u općem slučaju postoji komponenta specifičnog protoka $v_0 \left[m^3 / s / m^2 \right]$ u uspravnom smjeru, čiji je ukupni doprinos promjeni sadržaja vode u kontrolnom volumenu:

$$\int_A v_0 dA \quad (2.24)$$

Negativna vrijednost v_0 odgovara isparavanju, evapotranspiraciji i procurivanju iz vodonosnika. Pišući zakon održanja mase vode u obliku protoka, dobije se integralna bilanca vode u kontrolnom volumenu:

$$\int_A \mu \frac{\partial h}{\partial t} dA = \int_C KM \cdot gradh \cdot \vec{n} dA + \int_A v_0 dA \quad (2.25)$$

odnosno, pisano indeksnim načinom:

$$\int_A \mu \frac{\partial h}{\partial t} dA = \int_C KM \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \cdot n_i dA + \int_A v_0 dA \quad (2.26)$$

Primjenom GGO poučka o pretvorbi krivuljnog u plošni integral, te grupiranjem članova, piše se:

$$\int_A \left[\mu \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(KM \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) - v_0 \right] dA = 0 \quad (2.27)$$

Kako dobijeni izraz vrijedi za ma kako veliki kontrolni volumen, podintegralna funkcija mora biti jednaka nuli, pa integralni oblik zakona održanja prelazi u diferencijalni:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(KM \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + v_0 \quad (2.28)$$

Raspisano po komponentama dobije se:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(KH \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KH \frac{\partial h}{\partial y} \right) + v_0 \quad (2.29)$$

Dobijena jednadžba je Boussinesqueova jednadžba nestacionarnog strujanja podzemne vode. To je nelinearna parabolička parcijalna jednadžba. Takav oblik jednadžbe pojavljuje se u nizu fizikalnih pojava, npr. u provođenju topline, električnom strujanju u kapacitivnoj elektroprovodnoj sredini, difuznim pojavama itd, pa se mogu praviti analogni modeli, slično kao kod stacionarnog strujanja podzemne vode.

U posebnom slučaju kad je provodljivost vodonosnika $T = KH$ konstantna, i za konstantnu aktivnu poroznost, bez doprinosa uspravnih tokova, jednadžba postaje linearna:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (2.30)$$

pa se mogu koristiti načela superpozicije rješenja. Stoga se linearni oblik Boussinesqueove jednadžbe može napisati i u obliku sniženja *S* jer ako se u jed. (2.30) uvede $h = H_0 - S$, gdje je H_0 neporemećeno stacionarno stanje piezometarske visine koje zadovoljava jednadžbu, tj. također je rješenje (2.30), dobije se jednadžba za sniženje:

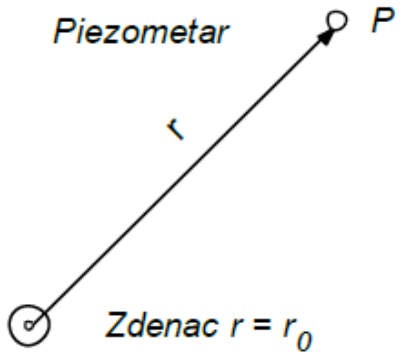
$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{T}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) \quad (2.31)$$

Odnos koeficijenta provodljivosti i aktivne poroznosti naziva se piezoprovodnost:

$$a = \frac{T}{\mu} \left[m^2 / s \right] \quad (2.32)$$

2.2.2. Rješenje za nestacionarno crpljenje zdenca

Promatra se nestacionarno crpljenje zdenca pod tlakom u ravnini. Početni uvjeti su neporemećeno stanje piezometarske visine. U trenutku $t = 0$ počinje se crpiti zdenac konstantnim protokom Q, uslijed čega dolazi do opadanja piezometarske visine, tj. dolazi do sniženja koje se najprije pojavljuje u samom zdencu, a poremećaj se vremenom širi u koncentričnim kružnicama u okolni prostor. Strujanje je osnosimetrično.



Slika 2.3 – Radijus piezometra

Za osnosimetrično strujanje Boussinesqueova se jednadžba, tj. oblik jed. (2.31), može napisati u radijalnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{T}{\mu} \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} \right) \quad (2.33)$$

Bez ulaženja u izvod, za jednadžbu (2.33) i početni uvjet $S = 0$, vrijedi rješenje u obliku:

$$S = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \int_{\alpha}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.34)$$

gdje je $S(r,t)$ sniženje, u bilo kojoj točki P, prema slici 2.3, na udaljenost r u vremenu t. U izrazu za sniženje pojavljuje se eksponencijalno integralna funkcija:

$$E_i(\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.35)$$

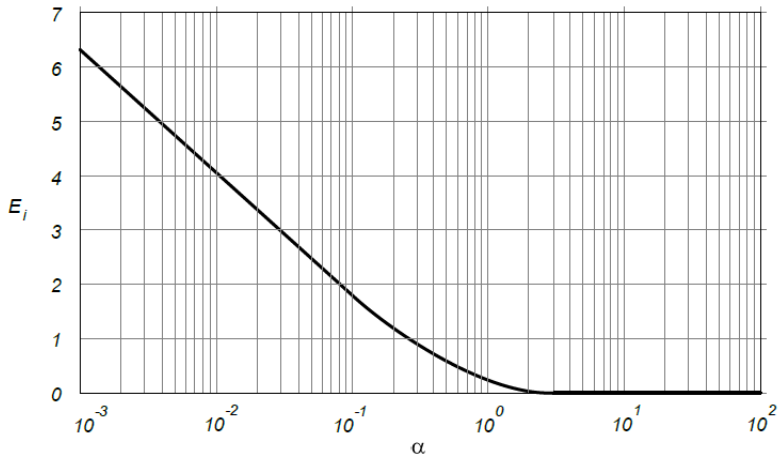
Razvoj E_i funkcije u red glasi:

$$E_i(\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -C - \ln \alpha + \alpha - \frac{1}{2 \cdot 2!} \alpha^2 - \frac{1}{3 \cdot 3!} \alpha^3 - \cdots \quad (2.36)$$

gdje je $C = -0{,}5772$ Eulerova konstanta, a argument funkcije jednak:

$$\alpha = \frac{r^2}{4at} \quad (2.37)$$

Na slici 2.4 prikazan je graf E_i funkcije, iz čega se vidi da je sve do vrijednosti argumenta $\alpha_0 = 10^{-1}$ funkcija određena sa samo dva prva člana iz razvoja u red.



Slika 2.4 – Eksponencijalno integralna funkcija

Ako se promatra odgovarajuće vrijeme za argument α_0:

$$t > \frac{r^2}{4\alpha_0 a} \quad (2.38)$$

zaključuje se da neposredno nakon početka crpljenja vrijedi:

$$E_i(\alpha) = -0.5772 - \ln \alpha \quad (2.39)$$

Nakon sređivanja konstanti piše se:

$$E_i(\alpha) = -\ln \frac{r^2}{2.246at} \quad (2.40)$$

tako da je sniženje:

$$S = -\frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{r^2}{2.246at} = +\frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246at}{r^2} \quad (2.41)$$

Nakon sređivanja konstanti, sniženje ima konačni oblik:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.5\sqrt{at}}{r} \quad (2.42)$$

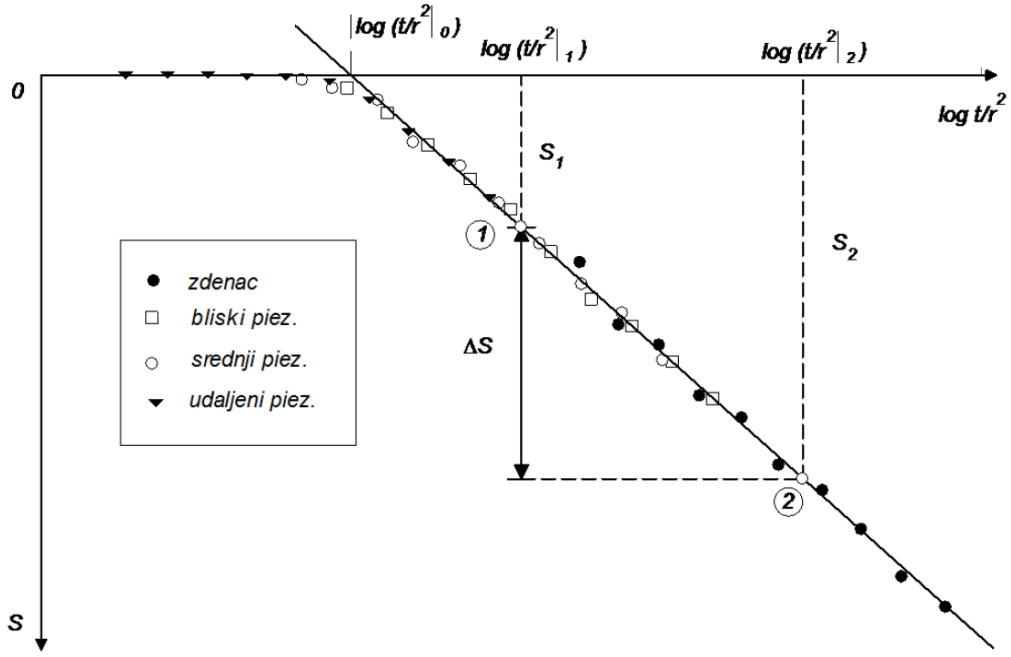
gdje se u brojniku pod logaritmom prepoznaje radijus utjecaja zdenca koji se vremenski povećava:

$$R = 1.5\sqrt{at} \quad (2.43)$$

2.2.3. Izvedba istražnog zdenca i obrada nestacionarnih podataka

Glavni nedostatci istražnog pokusa u stacionarnom strujanju, kako je već rečeno, su ti što je potrebno predugačko čekanje stacioniranja jer unutar tog vremena može doći do globalnih poremećaja u prihranjivanju vodonosnika.

Ovaj nedostatak se bitno ublažava ili otklanja, ako se koriste nestacionarni podaci o sniženju. U tom slučaju nije potrebno čekati stacioniranje strujanja. Naime, ako se izvede istražni zdenac na isti način kao za stacionarni pokus, te bilježi vrijeme mjerenja sniženja, tada se svi podaci o sniženju, nanešeni u *log-lin* jedinicama, grupiraju na jednu krivulju, vidi sliku 2.5.



Slika 2.5 – Obrada podataka nestacionarnog istražnog crpljenja

Krivulja oko koje se grupiraju podaci je krivulja eksponencijalne integralne funkcije E_i pomnožena s konstantom, tj. krivulja nestacionarnog rješenja crpljenja zdenca konstantnim protokom.

Zakrivljeni dio odgovara vremenu neposredno nakon početka crpljenja, nakon čega se podaci grupiraju oko logaritamskog pravca koji odgovara rješenju:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246at}{r^2} \quad (2.44)$$

Za bilo koje dvije točke na povučenom pravcu sniženje će biti jednako:

$$S_1 = \frac{Q}{4\pi T}\ln 2.246a\left(\frac{t}{r^2}\right)_1$$
$$S_2 = \frac{Q}{4\pi T}\ln 2.246a\left(\frac{t}{r^2}\right)_2 \quad (2.45)$$

gdje su u zagradama pod logaritmima očitane vrijednosti na apcisi grafa, iz čega se može izračunati razlika:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{4\pi T}\ln\frac{\left(\frac{t}{r^2}\right)_2}{\left(\frac{t}{r^2}\right)_1} \quad (2.46)$$

u kojoj se krati konstanta i vrijednost piezoprovodnosti *a*. Posebno, ako se točke *1* i *2* uzmu na susjednim dekadskim logaritamskim jedinicama, tako da im je odnos jednak 10, te nakon pretvorbe prirodnog logaritma u dekadski, vrijedi:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{4\pi T}\ln(10) \quad (2.47)$$

iz čega se može izračunati provodljivost:

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta S_{jed}}\ln(10) \quad (2.48)$$

i koeficijent procjeđivanja $K = T/M$. Piezoprovodnost *a,* odnosno koeficijent aktivne poroznosti, također se mogu dobiti iz nestacionarnog istražnog crpljenja zdenca. Ako se pravac produži do točke na apscisi gdje je sniženje jednako nuli, te se očita podatak:

$$\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 \quad (2.49)$$

a iz rješenja slijedi:

$$S = 0 = \frac{Q}{4\pi T}\left[\ln 2.246a\left(\frac{t}{r^2}\right)_0\right] \quad (2.50)$$

i vrijedi:

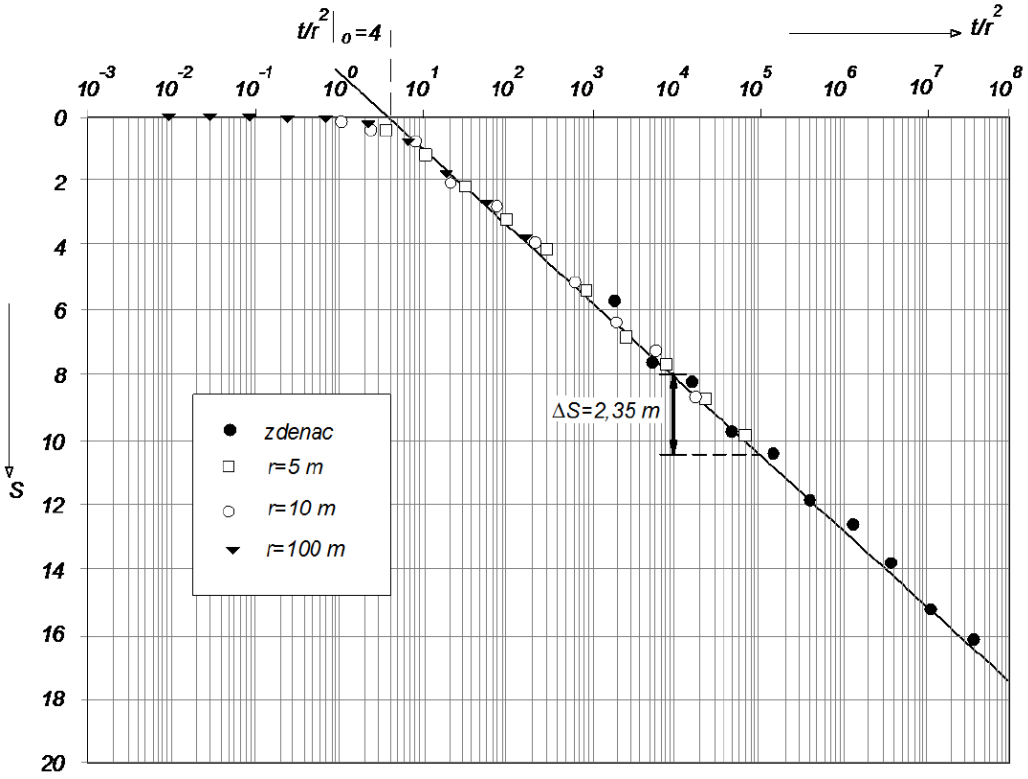
$$\begin{aligned} \ln 2.246a\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 &= 0 \\ 2.246a\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 &= 1 \end{aligned} \qquad (2.51)$$

iz čega je piezoprovodnost jednaka:

$$a = \frac{1}{2.25 \cdot (t/r^2)_0} \qquad (2.52)$$

Kako je $a = T/\mu$, dobije se koeficijent aktivne poroznosti $\mu = T/a$

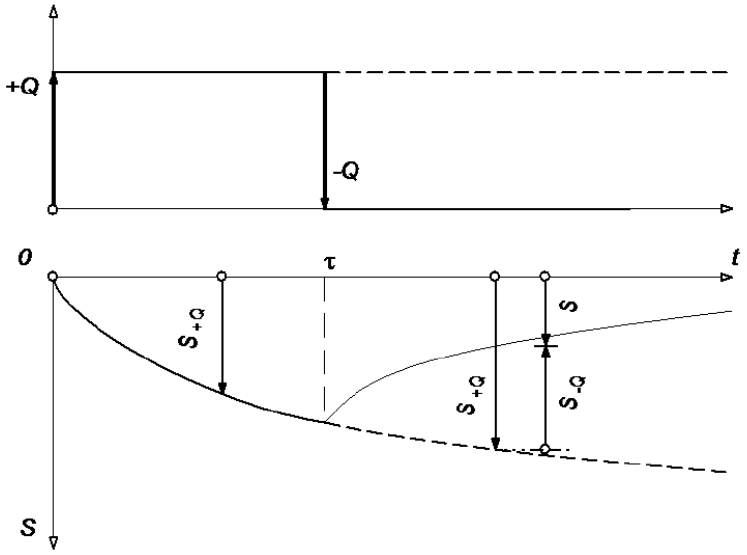
Na slici 2.6 prikazani su podaci za nestacionarno crpljenje zdenca, promatranog kao primjer za prikaz obrade podataka:



Slika 2.6 – Primjer obrade nestacionarnog crpljenja zdenca

Iz očitanja vrijednosti $\Delta S = 2.35m$ i $\left(t/r^2\right)_0 = 4$ dobije se provodljivost T, koeficijent procjeđivanja K, piezoprovodnost, a i koeficijent aktivne poroznosti μ.

U pokusu istražnog nestacionarnog crpljenja zdenca također se mjeri povratak razine nakon prestanka crpljenja. Povratak razine također se može iskoristiti za određivanje propusnosti vodonosnika. Na slici 2.7 prikazan je povrat razine nakon prekida crpljenja u trenutku $t = \tau$.



Slika 2.7 – Povrat razine

Krivulju sniženja nakon prekida crpljenja može se promatrati načelom superpozicije sniženja pozitivnog i negativnog zdenca. Pozitivni zdenac radi od trenutka *t = 0* protokom +Q neprekidno:

$$S_{+Q} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246at}{r^2} \quad (2.53)$$

a negativni zdenac –Q protokom od trenutka $t = \tau$:

$$S_{-Q} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246a \cdot (t-\tau)}{r^2} \quad (2.54)$$

Rezultirajuća povratna razina određena je razlikom:

$$S = S_{+Q} - S_{-Q} = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2.25at}{r^2} - \ln \frac{2.25a(t-\tau)}{r^2} \right] \quad (2.55)$$

Nakon sređivanja dobije se sniženje u povratku razine o obliku:

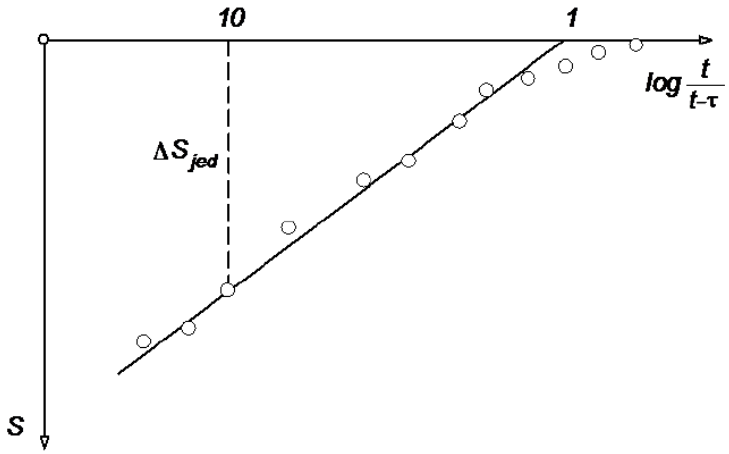
$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t}{t-\tau} \quad (2.56)$$

Dobijeni izraz omogućuje izračunavanje provodljivosti *T* iz grafa sniženja u povratku razine prema slici 2.8, za bilo koji piezometar ili zdenac. Podaci različitih piezometara se ne grupiraju na jednu, već na pomaknute krivulje.

Nagib bilo koje krivulje u dijelu aproksimacije logaritamskim pravcem određuje provodljivost:

$$T = \frac{Q}{4\pi \cdot \Delta S} \ln \frac{t}{t - \tau} \quad (2.57)$$

gdje je ΔS očitano sniženje između dviju točaka na krivulji.



Slika 2.8 – Obrada mjerenja povrata razine

Ako se točke izaberu tako da je argument logaritamske funkcije jednak jedan, tada vrijedi izraz:

$$T = \frac{Q}{4\pi \cdot \Delta S_{jed}} \ln(10) \quad (2.58)$$

gdje je ΔS_{jed} očitano sniženje između dviju jedinica dekadskog logaritma, kao što je na slici prikazano.

2.3. Numerički model – ''FiltraWell''

2.3.1. Analitičke metode

Kod praćenja nestacionarnog crpljenja potpunog bunara, analitičke metode se mogu jedino primjeniti za određivanje koeficijenata transmisivnosti i aktivne poroznosti. Tada one moraju zadovoljiti određene uvjete:

- vodonosni sloj je horizontalan i strujanje je pod tlakom

- bunar se nalazi u homogenom, izotropnom, neograničenom vodonosnom sloju (stacionarnost nije moguća prilikom vremena crpljenja)

- crpljenje bunara nastupa trenutačno i količina je konstantna

- za vrijeme crpljenja ne dolazi do promjena u globalnom režimu podzemnih voda

Ukoliko analitičke metode ne zadovoljavaju prethodne uvjete, one nisu primjenjive te se ne mogu koristiti.

Kod istražnog crpljenja dolazi do promjene globalnog nivoa podzemnih voda te se u ovom slučaju mogu koristiti samo numeričke metode.

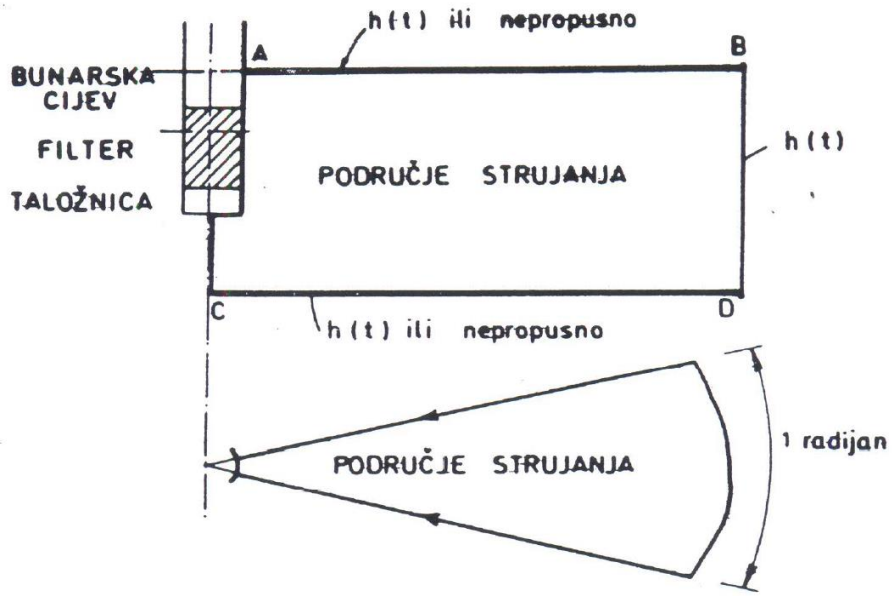
2.3.2. Opis modela ''FiltraWell''

Program FILTRA WELL je numerički model nestacionarnog toka u anizotropnoj sredini koji je prilagođen za simulaciju crpljenja iz zdenaca. Koristi podatke o količini crpljenja i nestacionarne rubne uvjete tj. globalne promjene režima podzemnih voda. Samo numerički model kao što je "FiltraWell" može riješiti problem nepoznate distribucije protoka kroz bunarski filter.

Metoda modeliranja se bazira na numeričkom rješenju jednadžbe nestacionarnog procjeđivanja u nehomogenoj, anizotropnoj i zasićenoj sredini.

Numeričko rješenje jednadžbe se dobiva po metodi konačnih elemenata gdje se koriste kvadrilateralni, četveročvorni konačni elementi. Integracija odgovarajuće nejake formulacije je izvršena Galjerkinovom metodom koja je prikazana u prethodnom poglavlju.

Područje u kojem se traži rješenje je isječak širine jednog radijana:



Slika br. 2.9 – Poprečni presjek i tlocrt područja strujanja

Proračun modela je vezan uz određene pretpostavke:

- vodonosni slojevi su horizontalni

- strujanje podzemne vode je osnosimetrično

2.3.3. Prikaz rješenja numeričkog modela

Model najjednostavnijom metodom vrši provjeru zadovoljavanja eksperimentalnih, izmjerenih podataka s proračunatim, modelskim rezultatima.

Taj prikaz je pomoću grafa gdje se na apscisi nalazi parametar t/r^2 (r – radijus određenog piezometra od osi bunara; t- vrijeme) u logaritamskoj skali, a na ordinati (dekadska skala) se nalazi sniženje podzemne vode od početnog vodostaja kod određenog piezometra.

Ukoliko ne postoje odstupanja izmjerenih podataka od modelske krivulje, tada su sve pretpostavke zadovoljene i svi parametri određeni.

Kod složenih hidrauličkih uvjeta, odstupanja postoje te je potrebno numerički odrediti parametre vodonosnih slojeva.

2.3.4. Opis ispitivanja pokusnog crpljenja u svrhu određivanja nepoznatih parametara

Odstupanja postoje zbog različite anizotropije vodonosnih slojeva (K_x / K_y) te zbog nehomogenosti slojeva u vertikalnom i horizontalnom smjeru.

Vertikalni koeficijent propusnosti K_y je moguće odrediti samo na nepotpunom zdencu jer se samo kod njega javljaju vertikalne komponente brzine strujanja podzemne vode.

Potrebno je postaviti najmanje tri piezometra od kojih dva trebaju biti postavljena negdje u blizini zdenca gdje će se izmjeriti zakrivljenost ekvipotencijala prilikom crpljenja zdenca. Treći piezometar treba biti postavljen dovoljno daleko od zdenca gdje su dominantne samo horizontalne komponente brzine strujanja podzemnih voda i on predstavlja tada rubni uvjet.

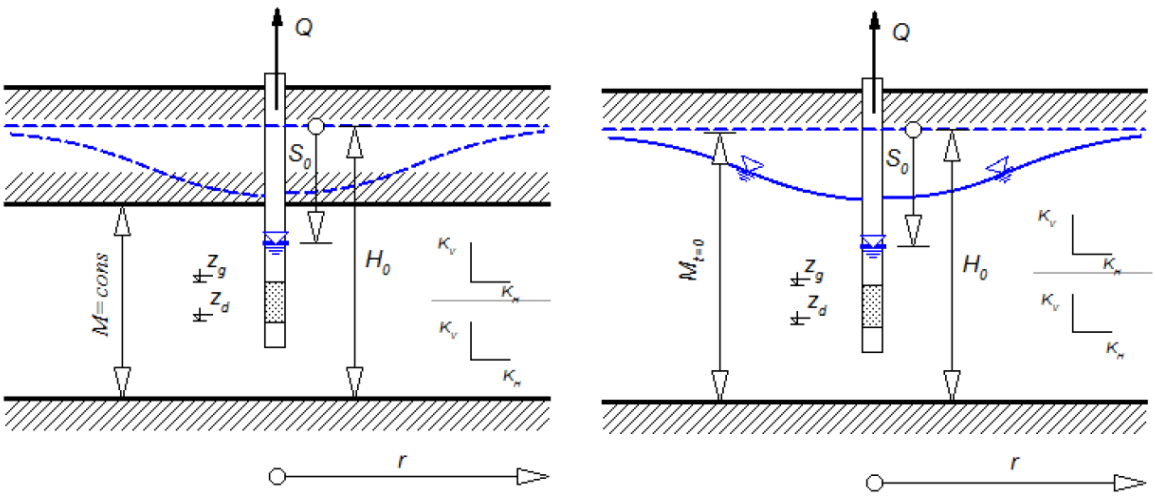
Uspoređujući odstupanja pri različitim vertikalnim propusnostima modela u odnosu na izmjerene podatke, odredit će se stvarni koeficijent propusnosti u vertikalnom smjeru postupnim približavanjem.

Nehomogenost slojeva u vertikalnom i horizontalnom smjeru se provjerava ugradnjom više piezometara u različitim smjerovima i na različitim dubinama.

2.3.5. Numeričko rješenje procjeđivanja za strujanje prema zdencima

Područje definicije

a) Zdenac pod tlakom b) Zdenac sa slobodnim vodnim licem



Slika br. 2.10

2D problem u uspravnoj ravnini integrira se za slijedeće uvjete:

- Debljina toka *H* varijabilna je po elementu.

- Filtracijska svojstva medija su konstantna na elementu.

- Rubna funkcija toka ima oblik $q_0(t)$, te je jednoliko ili nejednoliko raspodijeljena po rubnim bridovima područja.

- Produkcijska funkcija ima oblik $v_0(t)$, te je jednoliko ili nejednoliko raspodijeljena po elementu.

- Dozvoljeno je vodno lice, ali bez korekcije područja strujanja (linearni problem).

$$\frac{\partial h_r}{\partial t}\mu'\int_{\Omega} H\phi_r\phi_s d\Omega + \frac{\partial h_r}{\partial t}m\int_{\Gamma_3} H\phi_r\phi_s d\Gamma + h_r K_{ij}\int_{\Omega} H\frac{\partial\phi_r}{\partial x_j}\frac{\partial\phi_s}{\partial x_i}d\Omega = \int_{\Gamma_2}\phi_s q_0 d\Gamma + \int_{\Omega}\phi_s v_0 d\Omega \quad (2.59)$$

i, j = 1, 2,

r, s = 1, 2, 3, ...N

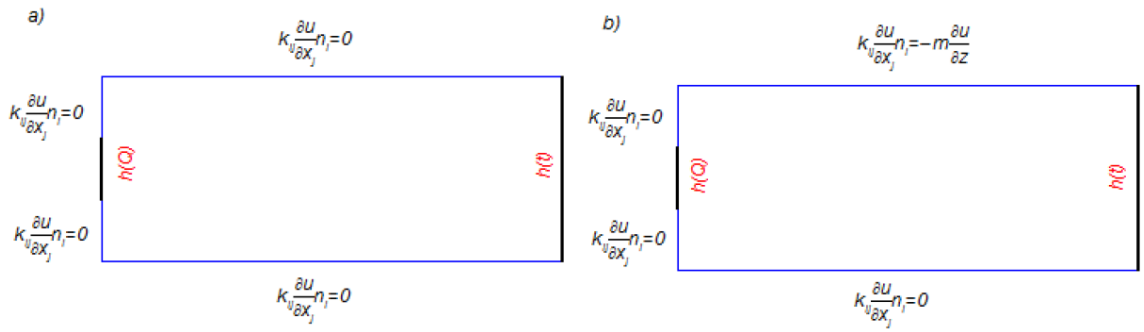
Prethodni uvjeti integracije vrijede i za osnosimetrični problem oko uspravne osi.

Matrice i vektori konačnih elemenata

$$C_{rs} = \mu'\int_{\Omega} H\phi_r\phi_s d\Omega \quad (2.60)$$

$$C_{rs}' = m\int_{\Gamma_3} H\phi_r\phi_s d\Omega \quad (2.61)$$

Rubni uvjeti za strujanje prema zdencu



Slika 2.11 – Rubni uvjeti za programsko rješenje FiltraW

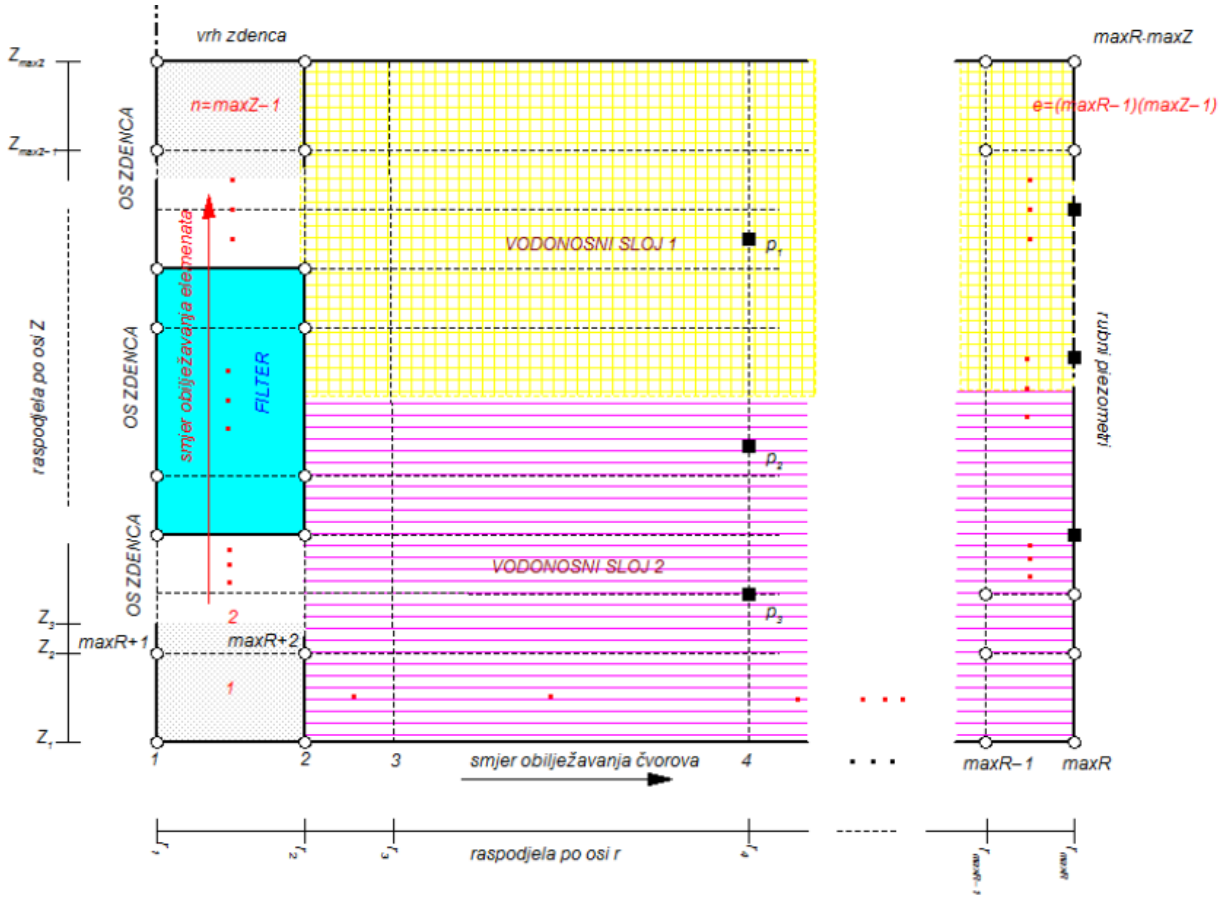
a) za vodonosnik pod tlakom b) za vodonosnik sa slobodnim vodnim licem

2.3.6. Rad u numeričkom modelu "FiltraWell"

Područje strujanja u isječku jednog radijana se prvo prikazuje tako da se zdenac i svi piezometarski krakovi preslikaju u jedan u kojem se odredi struktura vodonosnika od određenog broja homogenih, anizotropnih slojeva.

Koordinatno ishodište se smješta u donji, lijevi ugao područja strujanja na osi zdenca (slika 2.12). Svi piezometri iz svih smjerova se nanose na istu ravninu. Kraj modela je određen najudaljenijim piezometrom koji predstavlja rubni uvjet. Gornji i donji rub modela određen je položajima nepropusnih slojeva, odnosno inicijalnim položajem vodnog lica za slučaj otvorenog strujanja.

Područje se diskretizira nepravilnom, ortogonalnom mrežom četveročvornih, kvadrilateralnih konačnih elemenata, koristeći horizontalni raster r_1, r_2, r_3, ... , r_{maxR} i vertikalni raster Z_1, Z_2, Z_3, ... , Z_{maxZ}.



Slika 2.12 – Poprečni presjek područja strujanja

Gustoću mreže nastojimo postaviti tako da, približno jednoliko u logaritamskoj skali, prati udaljenosti od zdenca, uz uvjet da se na položajima mjernih piezometara točno nalaze čvorovi mreže. Vertikalna uslojenost, kao i položaj bunarskog filtra treba biti dovoljno precizno obuhvaćena odgovarajućim "slojevima" konačnih elemenata.

Cjelokupne topološke veličine određene su radijalnim i vertikalnim raspodjelama. Pri tome se nepropusni dijelovi zdenca (bunarska cijev) proglašavaju konačnim elementima s materijalom tipa 0 (obojeno sivo), a filtersko područje zdenca materijalom tipa 200 (obojeno cijan). Različiti materijali će se prikazati u različitim bojama.

Unose se vrijednosti količine crpljenja i vrijeme trajanja crpljenja (iz dijagrama crpljenja).

Postojeći piezometri trebaju biti smješteni u čvorove mreže. Izmjerene vrijednosti sniženja piezometara tijekom vremena crpljenja služe kao eksperimentalni pokazatelj stanja na terenu koje bi se trebalo poklapati s numeričkim rješenjem modela.

Za slučaj vodonosnog sloja pod tlakom, parametar PORO je jednak nuli. U suprotnom je jednak aktivnoj geomehaničkoj poroznosti u području pomaka vodnog lica. Ovdje se radi o nelinearnom problemu gdje je nelinearnost tipa geometrijske nelinearnosti. Tada program "FiltraWell" automatski generira red rubnih konačnih elemenata pomoću kojih se zadaju rubni uvjeti na slobodnom vodnom licu.

Program se izvodi različitim brojem različitih skupina vremenskih koraka. Pri određenom broju koraka i malom vremenskom koraku se računa i bilježi djelovanje crpljenja u blizini zdenca dok veliki vremenski koraci pokazuju stanje na većoj udaljenosti od zdenca.

S tako formiranom datotekom ulaznih podataka kreće se u proračun anizotropije i aktivne poroznosti.

3. ISTRAŽNO CRPLJENJE NA PODRUČJU BELIŠĆA

Provedena istraživanja su izvedena po programu istraživanja od tvrtke "Elektroprojekt". Terenske istražne radove je izveo Građevinski Institut Zagreb.

3.1. Svrha istraživanja

Razlog provedenog istražnog crpljenja na rijeci Dravi je utvrđivanje nepovoljnog djelovanja procjeđivanja voda iz akumulacije na režim podzemnih voda zaobalja čime bi se dalje mogla planirati odgovarajuća efikasna zaštita zaobalja od porasta podzemnih voda.

Cilj istraživanja je odrediti hidrogeološke i hidrauličke karakteristike gornjeg vodonosnog sloja čime bi se odredile moguće negativne posljedice na obalu i tvornicu "Kombinat Belišće" koja je posebno osjetljiva na promjenu razina podzemnih voda. Treba utvrditi početni vodostaj podzemnih voda koji će utjecati na rad tvornice te način površinske odvodnje u slučaju da je glino-betonska zavjesa najpovoljnije rješenje.

Obradom rezultata, dobiveni su parametri koji potpuno opisuju vodonosne slojeve odnosno svojstva tla. Ta svojstva su stupanj homogenosti tla, horizontalna i vertikalna propusnost vodonosnika (anizotropija), aktivna poroznost te utjecaj donjeg vodonosnika na gornji i obrnuto.

Koeficijenti aktivne poroznosti slojeva koji se nalaze pod tlakom se sastoje od doprinosa elastičnih promjena poroznosti sredine i elastičnih promjena gustoće vode. Red veličine se kreće od 0,01 prema niže.

Vertikalna razdioba gornjeg vodonosnika je izvršena na temelju terenske AC (Arthur-Casagrande) klasifikacije (podjela tla na krupnozrnata i sitnozrnata) i istraživanja granulometrijskog sastava jezgre dubokih bušotina.

3.2. Povijest

U vrijeme kad su se obavljala terenska istraživanja crpljenja, uz obalu rijeke Drave je djelovala tvornica "Kombinat Belišće" koja se bavila proizvodnjom poluceluloze, papira i preradom papira te mehaničkom i kemijskom preradom drveta i proizvodnje strojeva.

Tadašnja velika tvornica (slika 3.1) koja je u najboljim danima zapošljavala i do 5.500 ljudi, danas je spala na oko 300-tinjak zaposlenih. Tvornica je smještena na desnoj obali Drave, neposredno uz korito rijeke.



Slika br. 3.1 – Kombinat "Belišće"

Vodna stepenica Osijek je odbačena 1988. godine zbog gospodarskih, ekoloških nejasnoća, nejasnoća kod sigurnosti "Kombinata Belišće" te zbog imovinsko-pravnih problema (postojanje vikend naselja uz Dravu).

3.3. Opis bunarskog polja

Postoje samo slijedeće informacije o području ispitivanja:

- s hidrogeološkog aspekta na području V.S. Osijek, donekle se poznaje samo kvartarni kompleks stijena

- ti kvartarni sedimenti su nehomogeni u vertikalnom i u horizontalnom smjeru

- izrazita je pojava proslojaka i leća

- veza pojedinih vodonosnika je slaba te se ostvaruje preko vertikalne propusnosti

- prostorno je kvartarni bazen određen prema tercijarnim sedimentima

- na režim podzemnih voda utječu oborine, evapotranspiracija i nivo rijeke Drave

- mjerenja podzemnih voda nisu odraz stanja podzemnih voda iste sredine

- utjecaj Drave je mjerljiv na udaljenosti od nekoliko stotina metara

- osnovni čimbenik prihranjivanja su oborine

- krovina je različite debljine duž aluvija

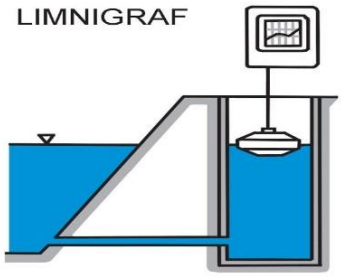
Mjesto ispitivanja je izabrano tako da u litološkom smislu bude što karakterističnije za šire zaobalje, a ujedno i što bliže tvornici "Kombinat Belišće" kako bi se dobiveni rezultati mogli koristiti za što efikasnije projektiranje odgovarajuće zaštite tvornice.

Lokacija izvedenog bunarskog polja se nalazila oko 3 km nizvodno od tvornice i to u blizini trase planiranog drenažnog kanala.

Širina bunara je bila 0,25 m, a filter bunara se smjestio u drugom sloju od površine terena tj. na dubini od 9,5m do 14,5m. Bunarsko polje se sastojalo od četiri grupe piezometara postavljenih u pravcu rijeke Drave. Prva grupa je postavljena 5,3 m od zdenca i sadrži četiri piezometra dok je druga grupa postavljena 11,2 m od bunara i sadrži tri piezometra. Treća grupa se sastoji od tri piezometra i postavljena je na radijusu od 24,7 m od bunara. Četvrta grupa se sastoji od jednog piezometra koji ujedno predstavlja i rubni uvjet koji je smješten na udaljenosti od 150,2 m.

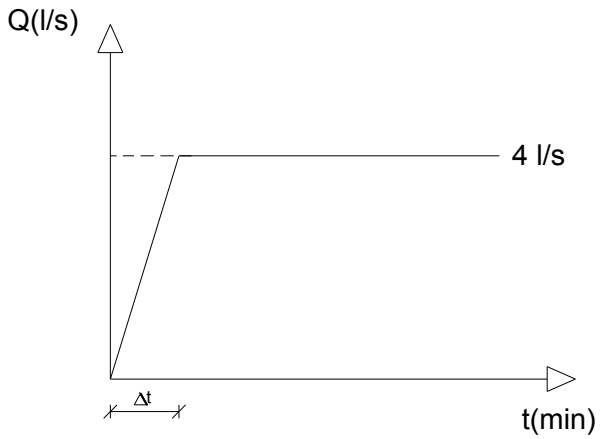
Filteri plitkih piezometara prvih triju grupa su smješteni na dubini od 4,5 m. Srednje duboki filteri prvih triju grupa od bunara su smješteni na dubini od 9,5 m. Duboki filteri triju grupa piezometara plus četvrta grupa (piezometar na rubu) su smješteni na dubini od 15,5 m. Ostaje još jedan piezometar u prvoj grupi koji je smješten na dubini od 26,5 m i on je ugrađen u donji vodonosnik u svrhu određivanja hidrauličkih karakteristika slabije propusnog proslojka i njegovog utjecaja na gornji vodonosni sloj.

Početak crpljenja je bio 16.12. 1988. godine, a crpna količina je iznosila približno 4 l/s. U piezometar radijusa 5,3 m i dubine 9,5 m je ugrađen limnigraf (slika 3.2). To je instrument koji neprestano bilježi razinu vode. Način na koji funkcionira je pomoću plovka u zdencu koji je spojen s vodenim tokom te se položaj i pomicanje plovka bilježi na zapisnom uređaju.



Slika 3.2 – Limnigraf

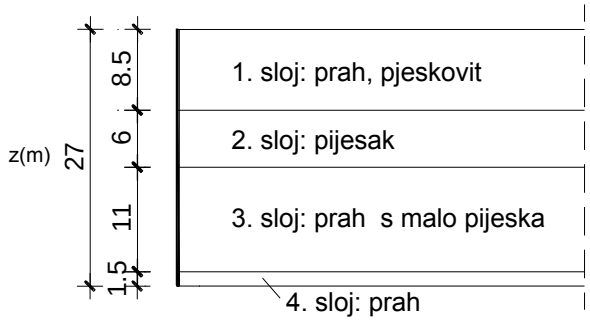
Vrijeme praćenja sniženja u bunaru i u piezometrima je iznosilo 7200 minuti tj. 5 dana.



Slika 3.3 – Dijagram crpljenja

3.4. Hidrogeološke karakteristike područja crpljenja

Razdioba slojeva je određena hidrogeološkom analizom slojeva na temelju granulometrijskih krivulja i determinacijom jezgra iz dubokih bušotina.



Slika 3.4 – Vertikalna raspodjela slojeva

3.5. Preliminaran proračun hidrauličkih parametara vodonosnika

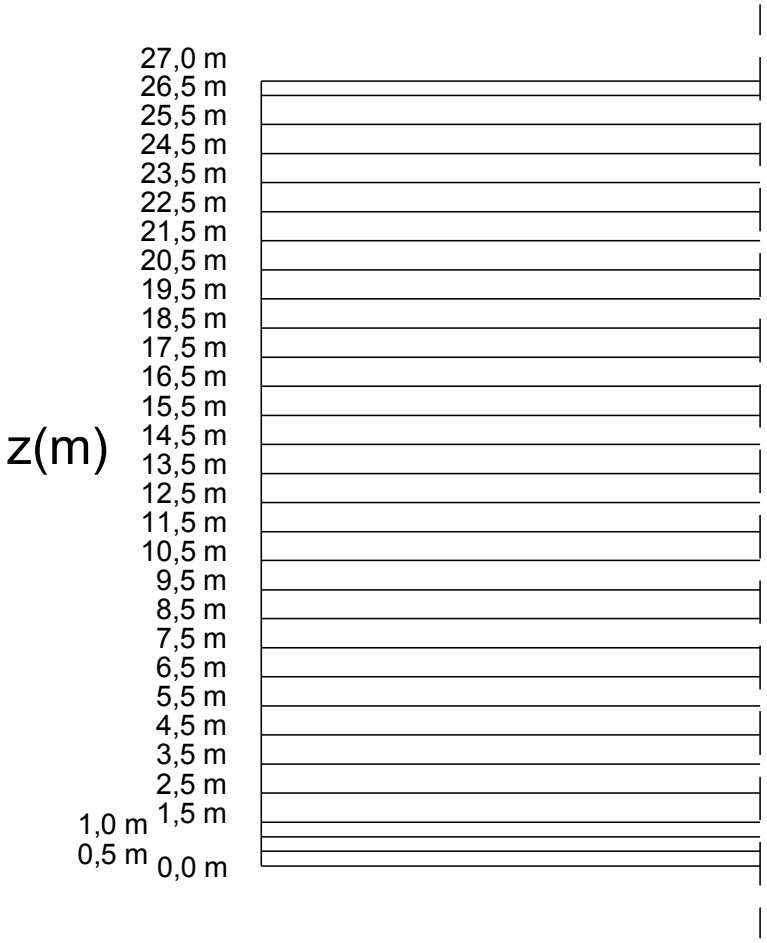
Korisno je znati približnu aktivnu poroznost μ i horizontalni koeficijent propusnosti K_x na rubu područja obuhvaćenog numeričkim modelom jer se na taj način eventualno može smanjiti broj iteracija potrebnih za dobijanje zadovoljavajuće razdiobe propusnosti unutar područja numeričkog modela. Njih se određuje iz Jacobijevog izraza korištenjem polulogaritamskog mjerila između opadanja vodnog lica (aritmetičko mjerilo) i vremena crpljenja (log mjerilo).

4. ANALIZA REZULTATA I KALIBRACIJA MODELA

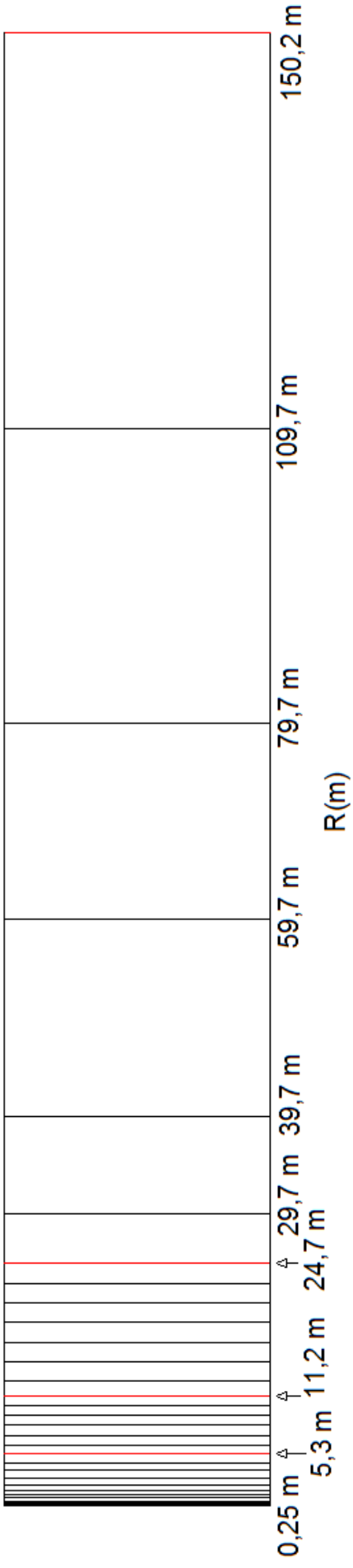
4.1. Postavljanje ulazne datoteke i prikaz područja strujanja

Za postavljanje ulazne datoteke su potrebni brojni podaci koji su se našli i odredili posredno ili neposredno iz postojeće literature tj. iz dokumenata prethodnog istražnog crpljenja zdenca.

Prvo se odredila odgovarajuće raspodijeljena gustoća mreže koja je odabrana od 30x30=900 čvorova tj. mreža od 841 konačnog elementa (Slika 4.1 i 4.2).



Slika 4.1 – Prikaz horizontalne raspodjele domene



Slika 4.2 – Prikaz vertikalne raspodjele domene uz označen položaj piezometara

Svaki postojeći sloj tla domene (ima ih 4 i položeni su horizontalno) te zdenac i njegov filter su postavljeni u pripadajuće konačne elemente.

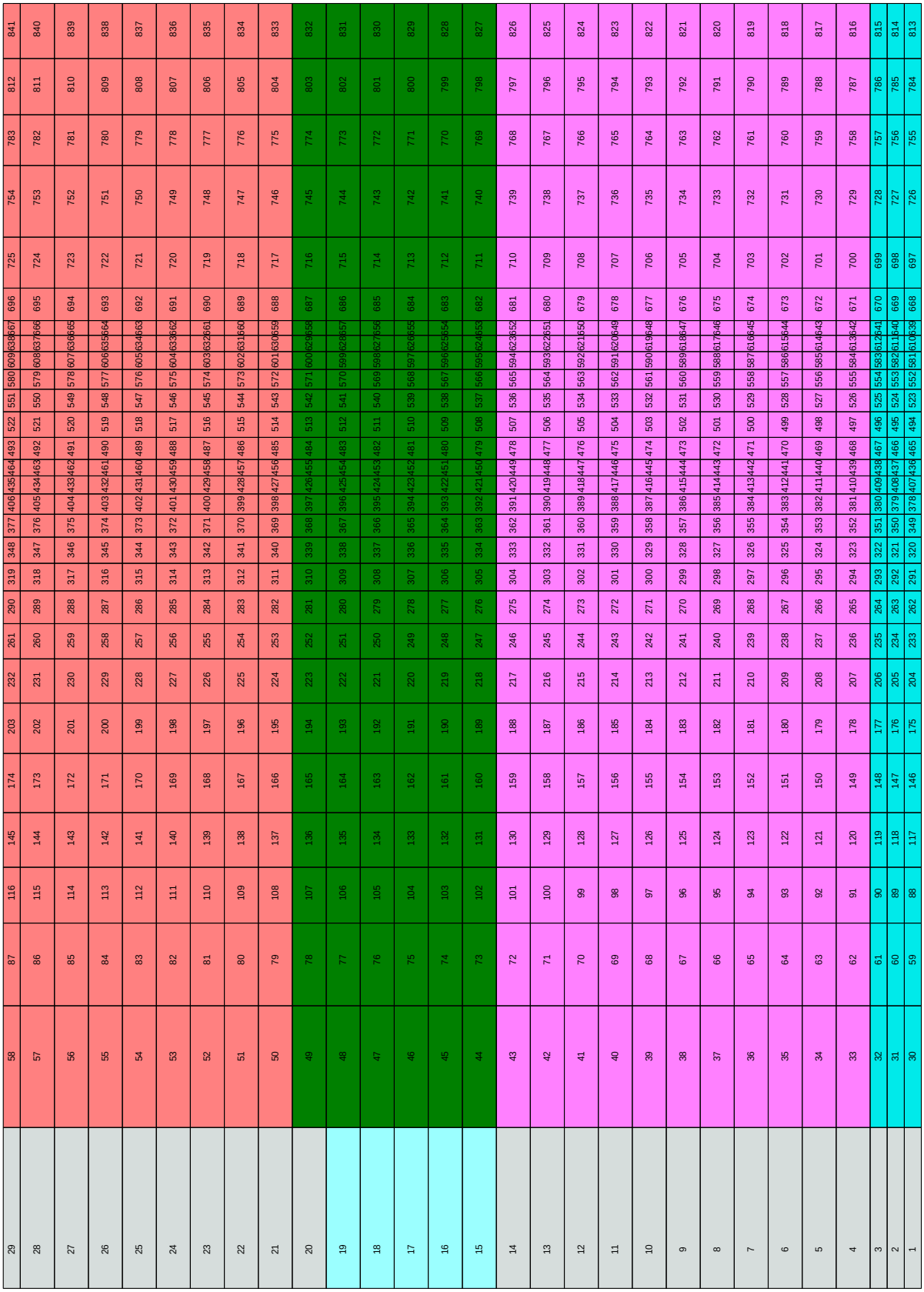
Zadano je vrijeme provođenja crpljenja koje je jednako 7200 minuti te količina crpljenja od 4 l/s.

Svaki piezometar je opisan svojim rednim brojem, radijusom od crpilišnog zdenca, početnim vodostajem i podacima o sniženju tijekom vremena trajanja crpljenja.

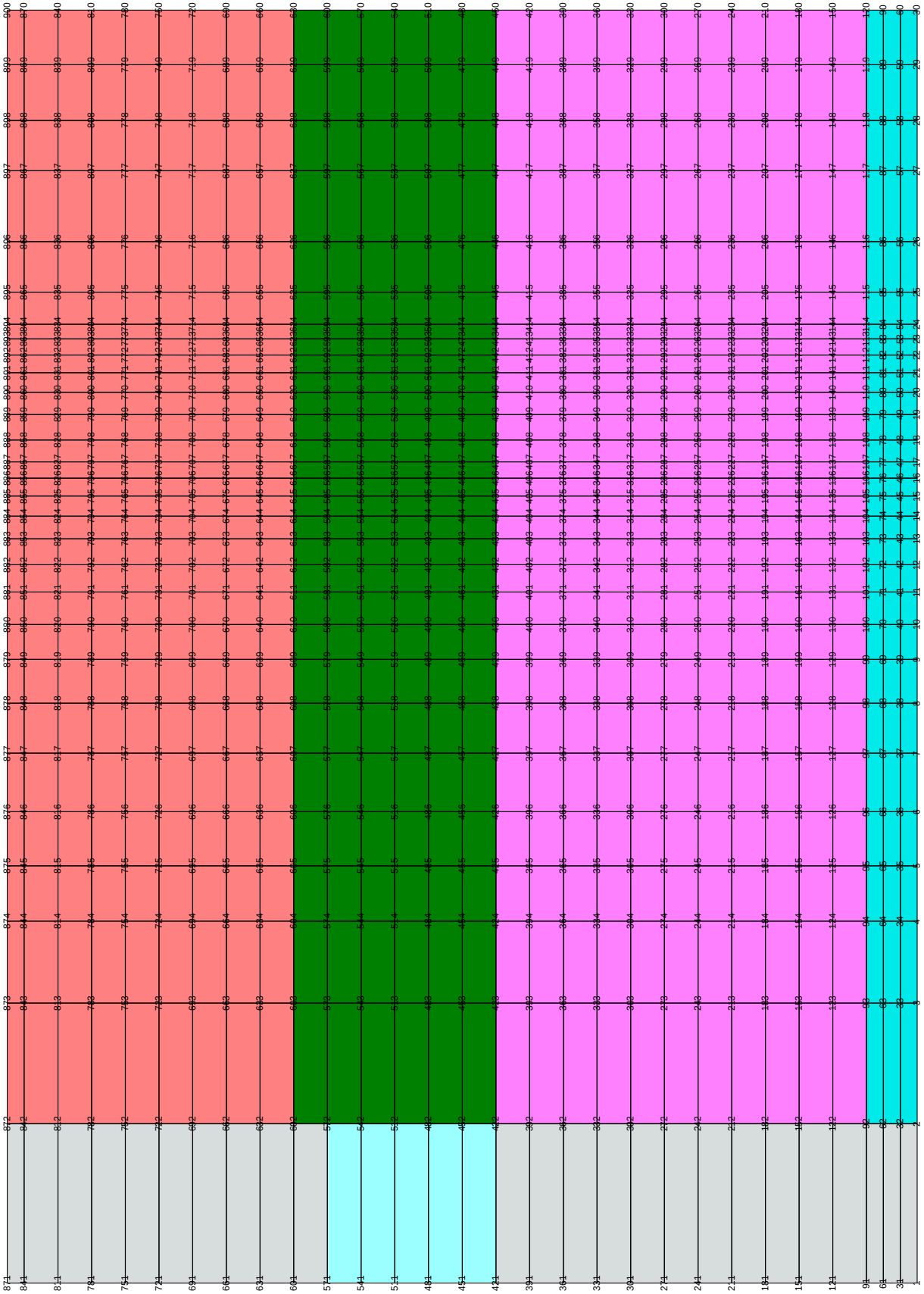
Određen je rubni uvjet domene (piezometar broj 11 na radijusu od 150,2 m) za kojeg su se unijeli svi brojevi rubnih čvorova u ulaznu datoteku. Svi filteri piezometara su uneseni kao određeni čvorovi u ulaznu datoteku.

Koristio se broj koraka od 100 sa početnim vremenskim korakom od 5 sekundi koji je opisivao stanje pri crpljenju u blizini zdenca te se analogno povećavajući vremenske korake došlo do vremenskog koraka od 5000 sekundi koji je opisivao stanje područja strujanja na većoj udaljenosti od zdenca.

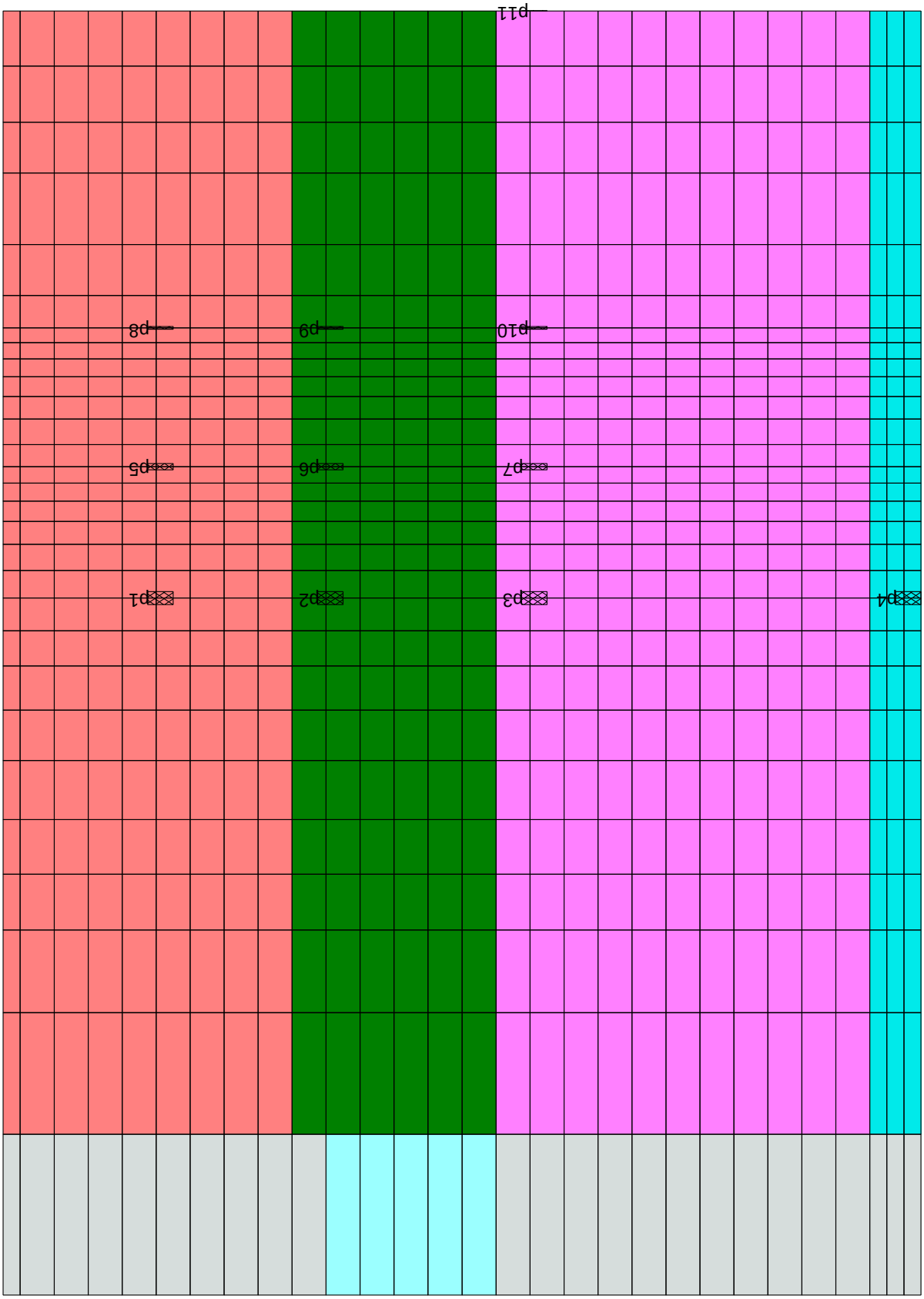
Unosom ulazne datoteke u program se dobio prikaz domene s položajima slojeva po dubini, položajima piezometara i njihovih filtera te prikaz cijele mreže s oznakama brojeva konačnih elemenata i čvorova (Slike br. 4.3, 4.4 i 4.5).



Slika 4.3 – Prikaz konačnih elemenata domene uz položaje slojeva i zdenca



Slika 4.4 – Prikaz čvorova domene uz položaje slojeva i zdenca



Slika 4.5 – Prikaz položaja filtera piezometara domene uz položaje slojeva i zdenca

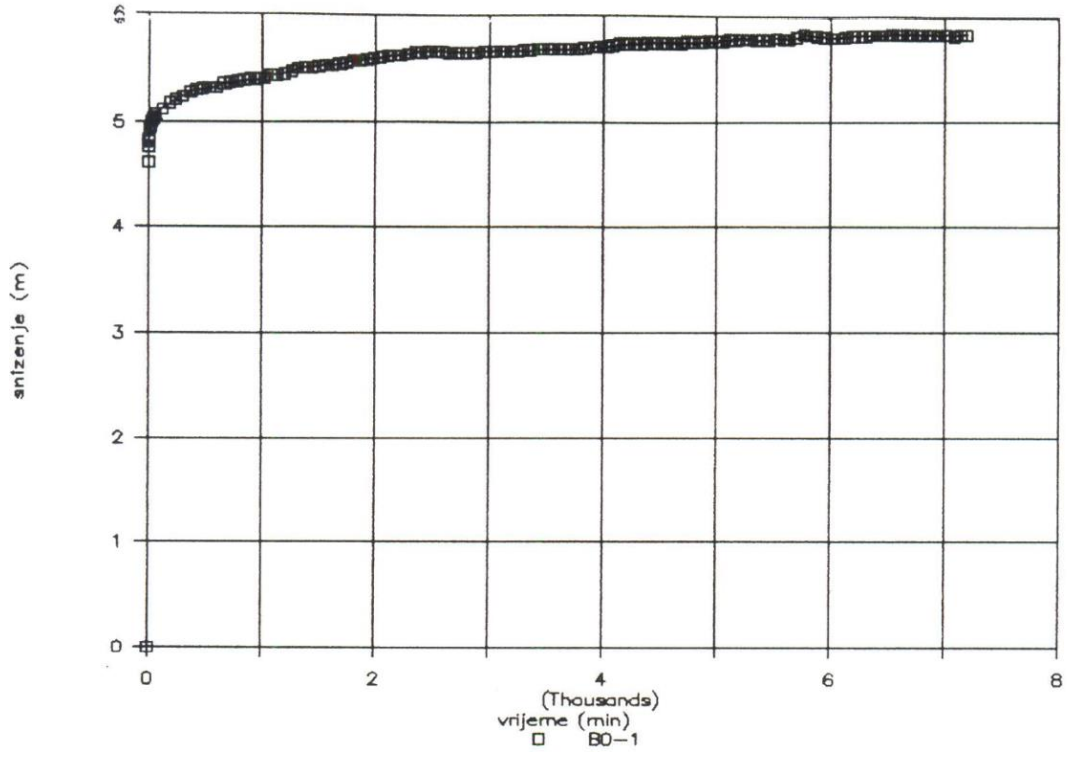
4.2. Prikaz sniženja istražnog crpljenja

Na osnovu izmjerenih podataka sniženja u postavljenim piezometrima u toku istražnog crpljenja, napravljeni su dijagrami vrijeme - sniženja (t-S) za:

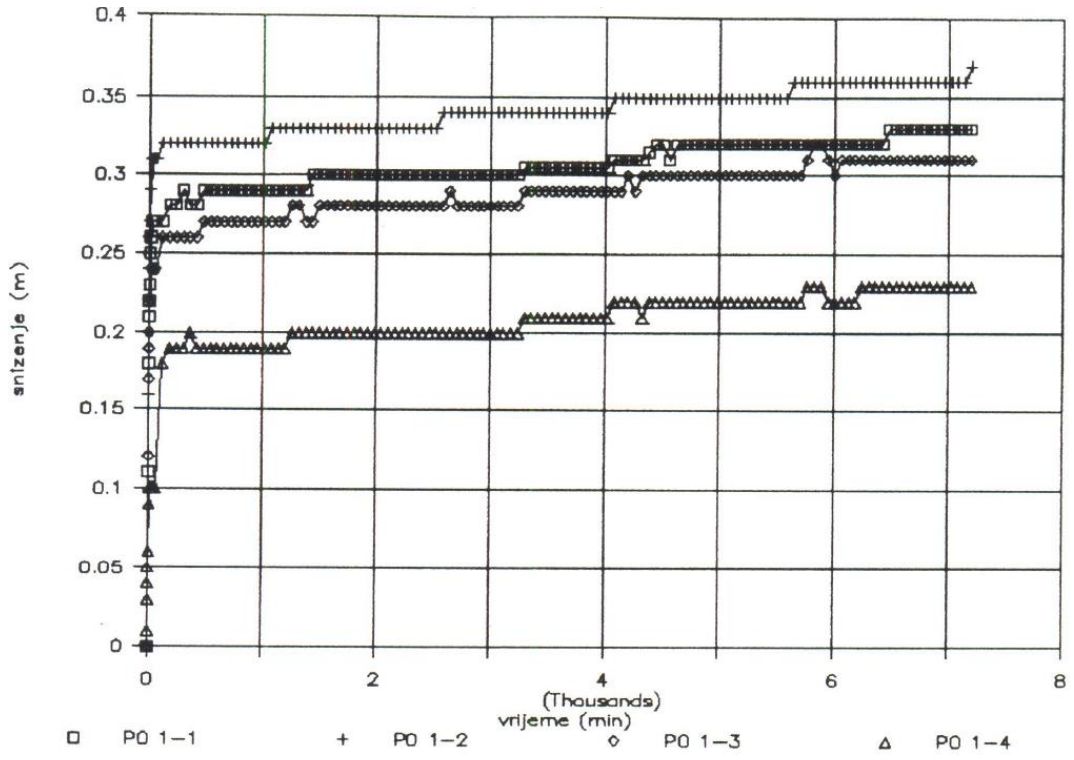
- bunar (slika 4.6)
- 1. piezometarsku grupu - R=5,3 m (slika 4.7)
- 2. piezometarsku grupu - R=11,2 m (slika 4.8),
- 3. piezometarsku grupu - R= 24,7 m (slika 4.9)
- 4. piezometarsku grupu - R=150,2 m (slika 4.10)

zatim za sve piezometre s filterom na dubini:

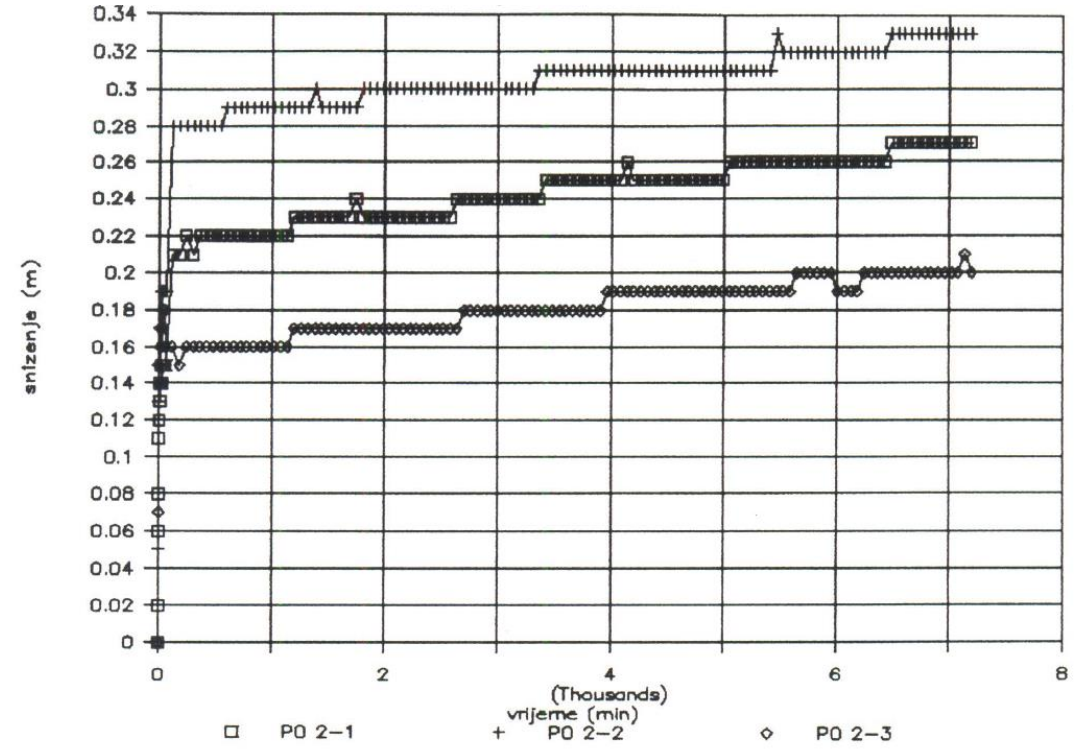
- Z=4,5 m (slika 4.11)
- Z=9,5 m (slika 4.12)
- Z=15,5 m (slika 4.13)
- Z=26,5 m (slika 4.14)



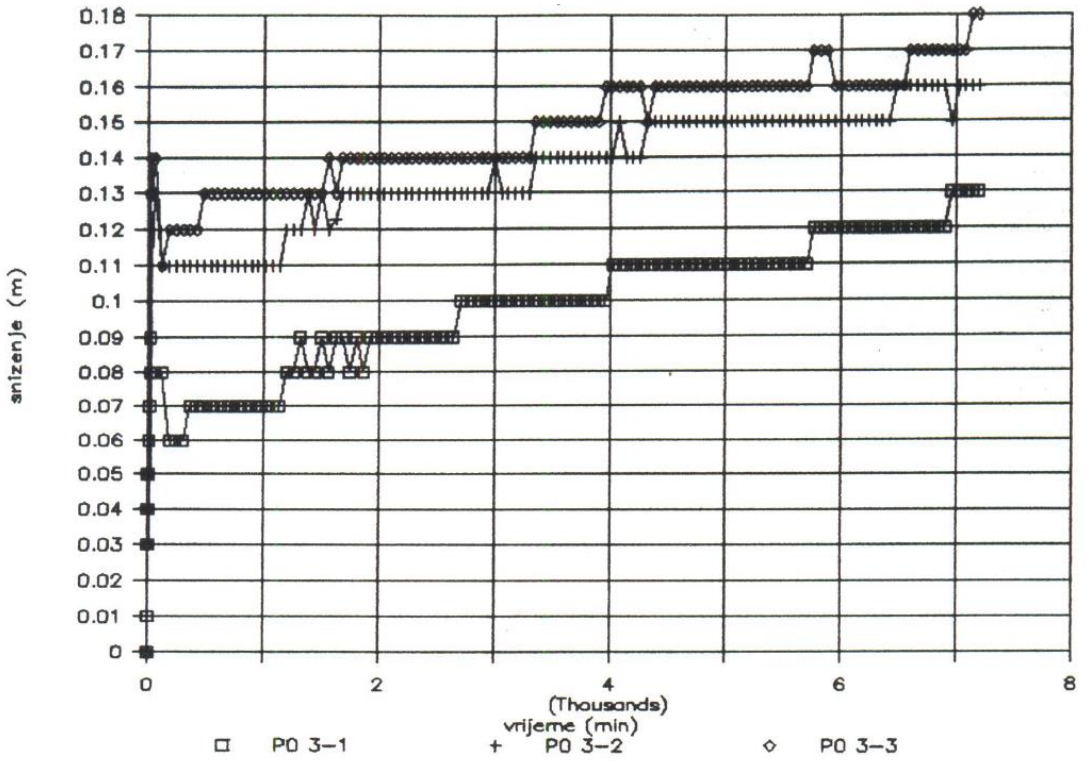
Slika 4.6 – Sniženja u bunaru



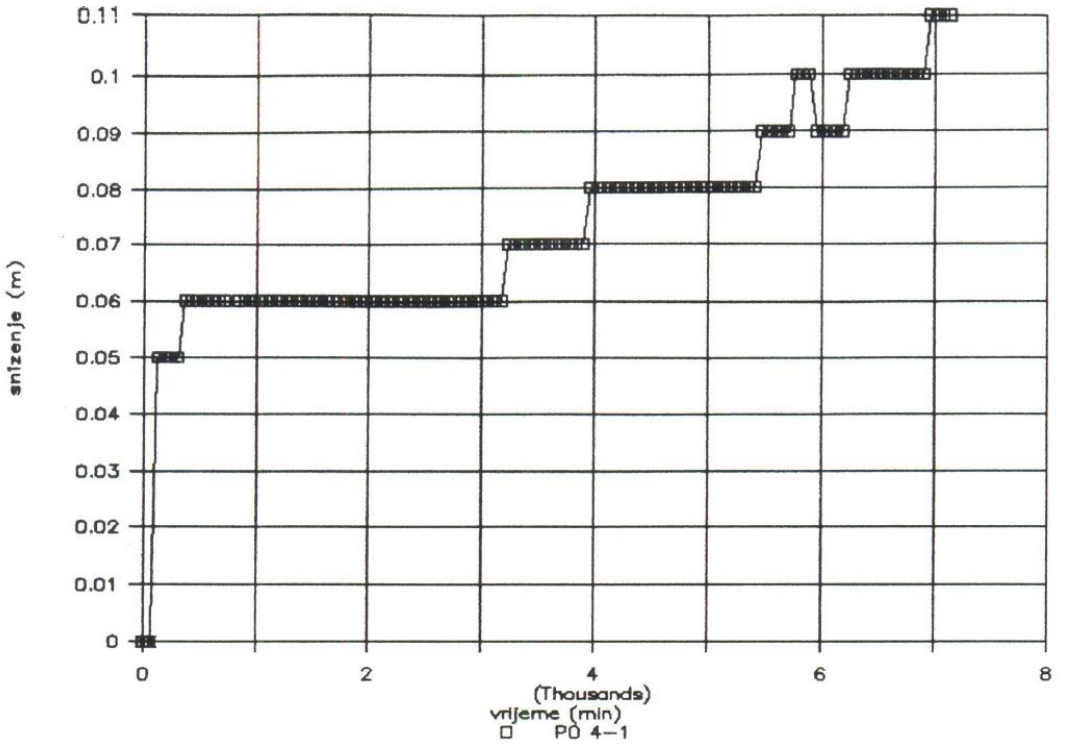
Slika 4.7 – Sniženja u 1. piezometarskoj grupi



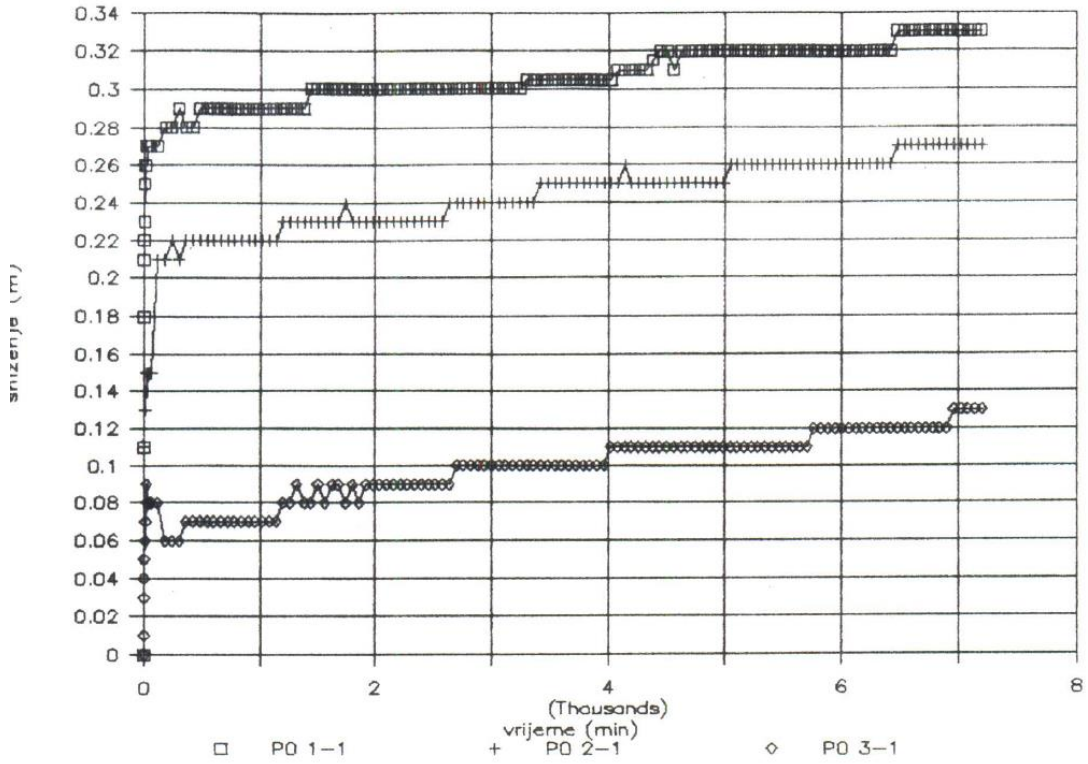
Slika 4.8 – Sniženja u 2. piezometarskoj grupi



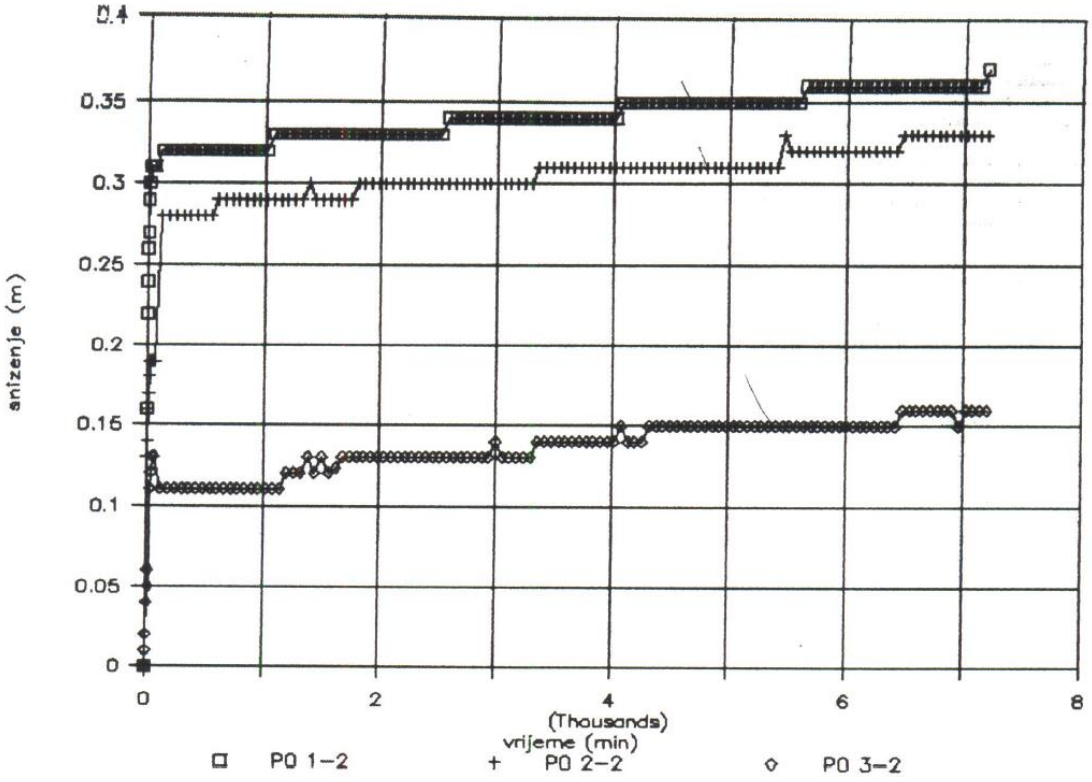
Slika 4.9 – Sniženja u 3. piezometarskoj grupi



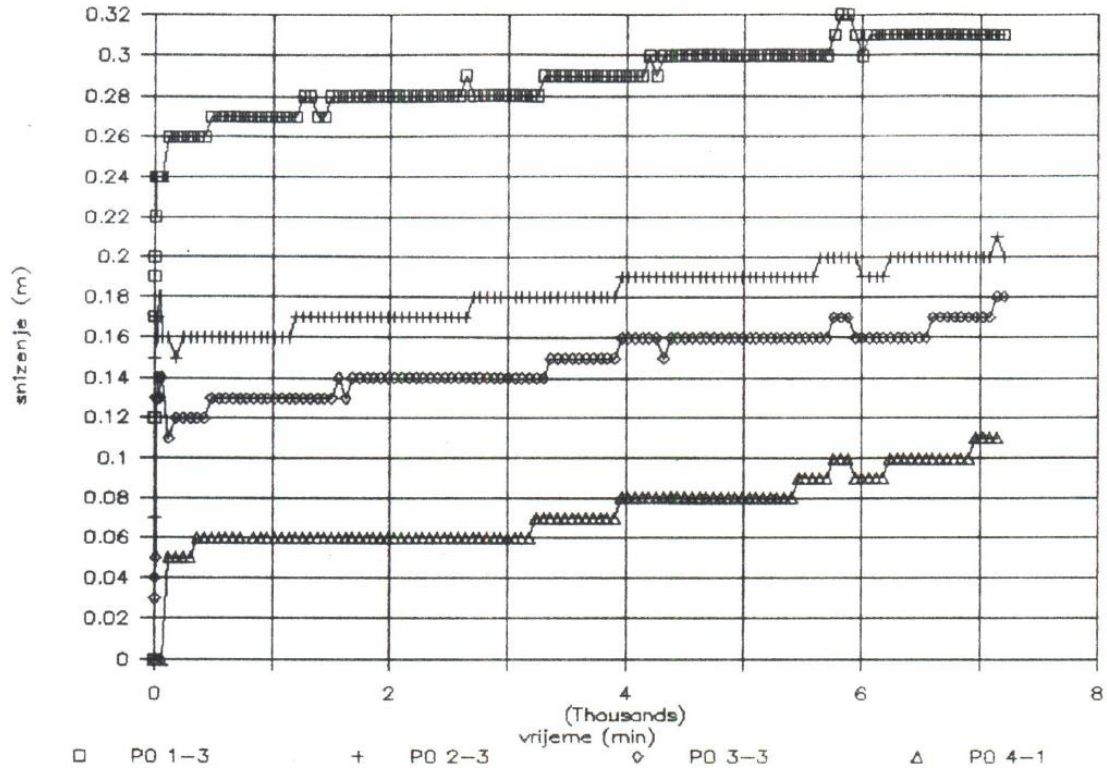
Slika 4.10 – Sniženja kod najudaljenijeg piezometra (rubnog uvjeta)



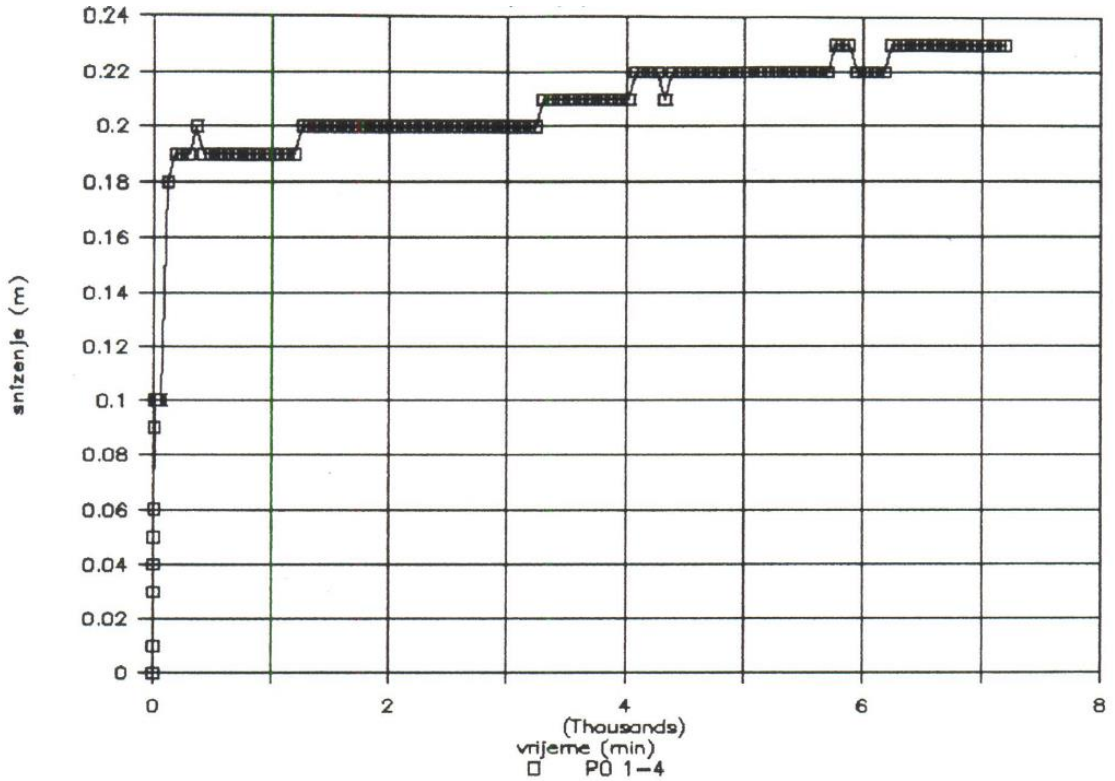
Slika 4.11 – Sniženja piezometara na dubini od 4,5 m



Slika 4.12 – Sniženja piezometara na dubini od 9,5 m

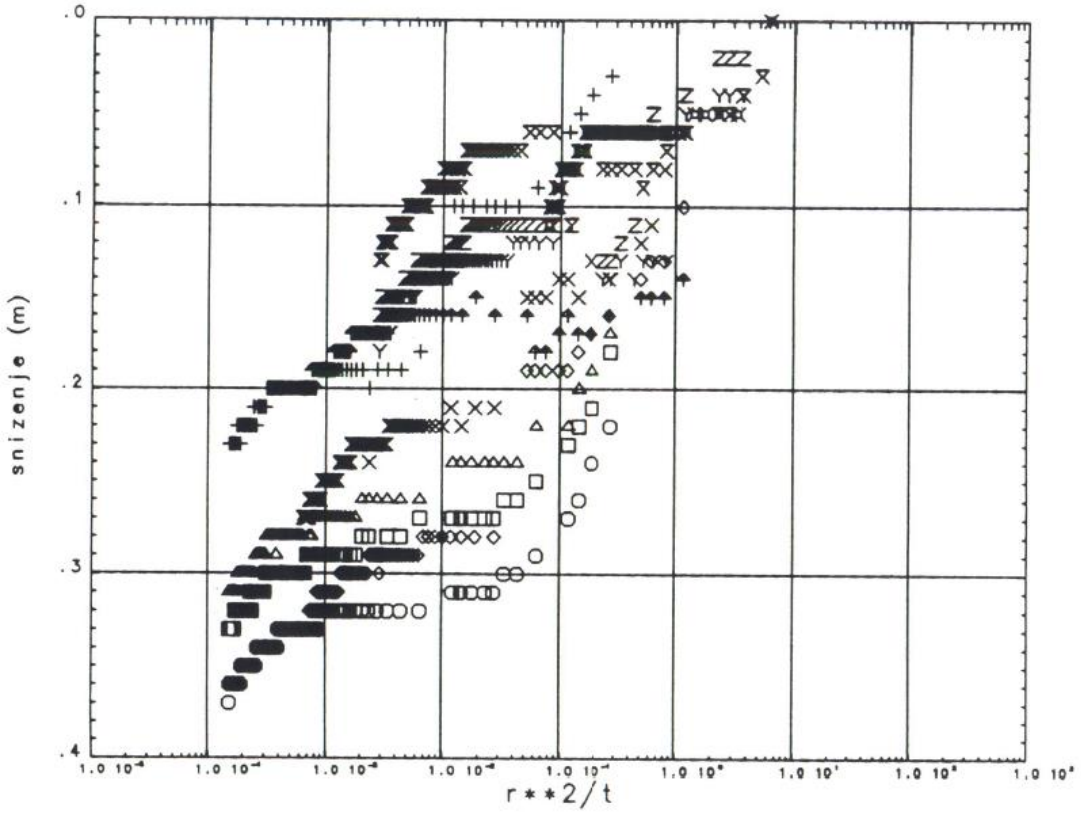


Slika 4.13 – Sniženja piezometara na dubini od 15,5 m



Slika 4.14 – Sniženja piezometra na dubini od 26,5 m

Pomoću dobivenih podataka probnog crpljenja, određen je također dijagram sniženja S – r^2/t (log) za svih 11 piezometara na slici 4.15. Tu se vide veće razlike između grupa podataka koje najviše ovise o udaljenosti (radijusu) piezometara od bunara te o dubini ugrađenih filtera piezometara.



Slika 4.15 – Sniženje S - r^2/t (log) za svih 11 piezometara

Zaključeno je da sniženja imaju logične vrijednosti i da se može s njima ići u numerički model za proračun koeficijenata propusnosti (anizotropije) i aktivne poroznosti.

4.3. Obrada podataka istražnog crpljenja i rezultati

Poznavajući sve ulazne podatke kao što su:

- hidrogeološki profil i geometrija područja koji su potrebni za konstruiranje mreže u numeričkom modelu
- broj i položaj piezometara sa svim izmjerenim sniženjima tijekom trajanja crpljenja
- visinsku raspodjelu slojeva u tlu
- dijagram crpljenja koji pokazuje količinu crpljenja i vrijeme crpljenja,

krenilo se u proračun koeficijenata propusnosti i aktivne poroznosti postupnim približavanjem traženom rješenju koristeći podatke terenskih sniženja svih 11 piezometara odjednom. Obrađen je veliki broj podataka da bi se došlo do zadovoljavajućih rješenja. To se vršilo raznim kombinacijama horizontalnih i vertikalnih koeficijenata propusnosti (promjenama anizotropije).

Preliminarni proračun

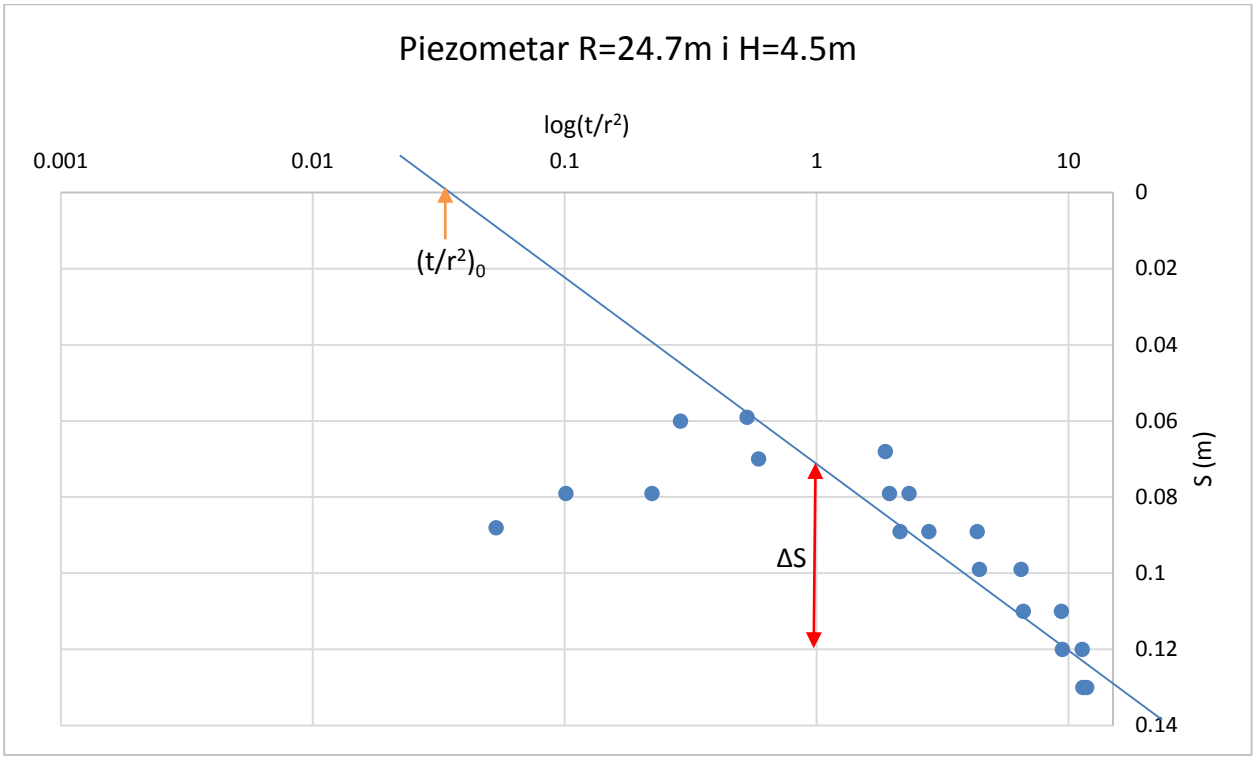
Prije kalibracije modela, odredit će se preliminarna vrijednost propusnosti u horizontalnom smjeru te aktivna poroznost s kojima će se bitno pojednostavniti i ubrzati put prema traženom rješenju.

Koristeći nestacionarne podatke o crpljenju, tj. sniženja vodnog lica u vremenu crpljenja kod piezometra određenog radijusa, odredi se aproksimativni (logaritamski) pravac u *log-lin* jedinicama koji najviše odgovara podacima.

Koriste se tri piezometra različite dubine i jednakog radijusa (24.7m). Oni su idealni zbog većeg radijusa jer je kod njih zanemariva vertikalna komponenta propusnosti K_y.

Očitaju se sniženja u točkama sa susjednim dekadsko logaritamskim jedinicama ($t/r^2=1$ i $t/r^2=10$) pa se odredi razlika sniženja prema formuli (2.47). Tada se kreće u proračun provodljivosti T (2.48) iz koje se dobije koeficijent propusnosti $K_x=T/M$ (M je visina vodonosnog sloja).

Za određivanje aktivne poroznosti je prvo potrebno produžiti pravac sve dok on ne siječe apscisu tj. dok se ne postigne sniženje jednako nuli. Očitavši to sjecište, izračuna se piezoprovodnost a prema (2.52) i odredi aktivna poroznost $\mu=T/a$.



Očitano:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 0{,}1211m - 0{,}0698m = 0{,}0513m$$

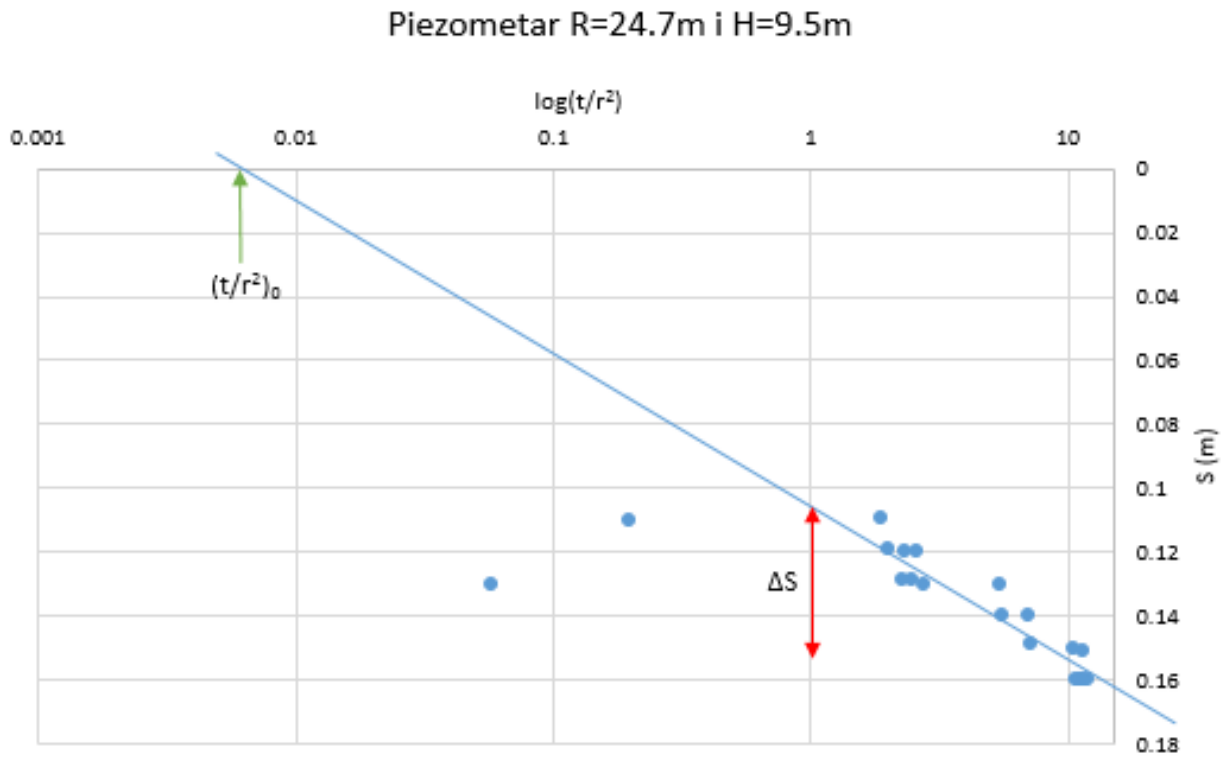
$$\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 = 0{,}02$$

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta S_{jed}}\ln(10) = \frac{0{,}004}{4\pi \cdot 0{,}0513}\ln(10) = 0{,}0143m^2/s$$

$$K = \frac{T}{M} = \frac{0{,}0143}{25{,}5} = 5{,}6 \cdot 10^{-4} m/s$$

$$a = \frac{1}{2.25 \cdot (t/r^2)_0} = \frac{1}{2.25 \cdot 0{,}02} = 22{,}22m^2/s$$

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{0{,}0143}{22{,}22} = 6 \cdot 10^{-4}$$



Očitano:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 0{,}1550m - 0{,}1055m = 0{,}0495m$$

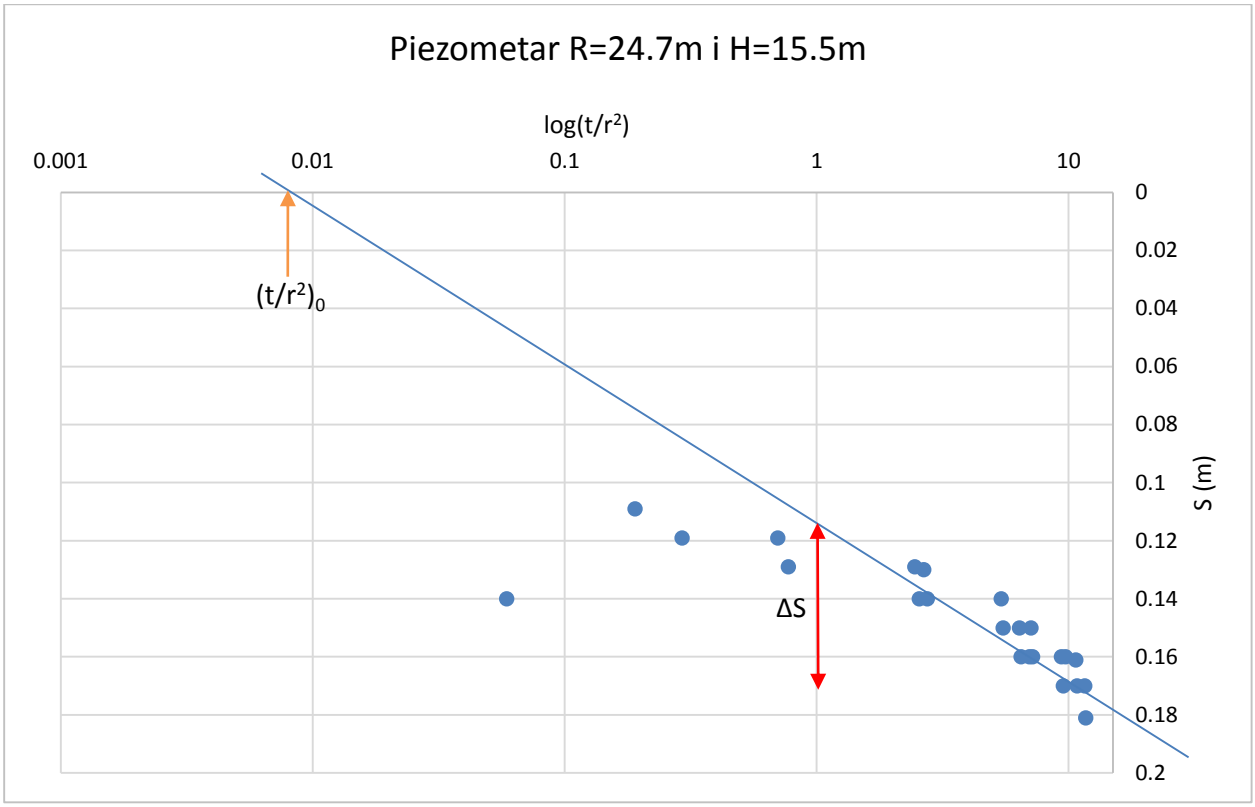
$$\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 = 0{,}004$$

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta S_{jed}}\ln(10) = \frac{0{,}004}{4\pi \cdot 0{,}0495}\ln(10) = 0{,}0148m^2/s$$

$$K = \frac{T}{M} = \frac{0{,}0148}{25{,}5} = 5{,}8\cdot 10^{-4} m/s$$

$$a = \frac{1}{2.25\cdot(t/r^2)_0} = \frac{1}{2.25\cdot 0{,}004} = 111{,}11m^2/s$$

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{0{,}0148}{111{,}11} = 10^{-4}$$



Očitano:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 0{,}1700m - 0{,}1142m = 0{,}0558m$$

$$\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 = 0{,}008$$

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta S_{jed}}\ln(10) = \frac{0{,}004}{4\pi \cdot 0{,}0558}\ln(10) = 0{,}0131 m^2/s$$

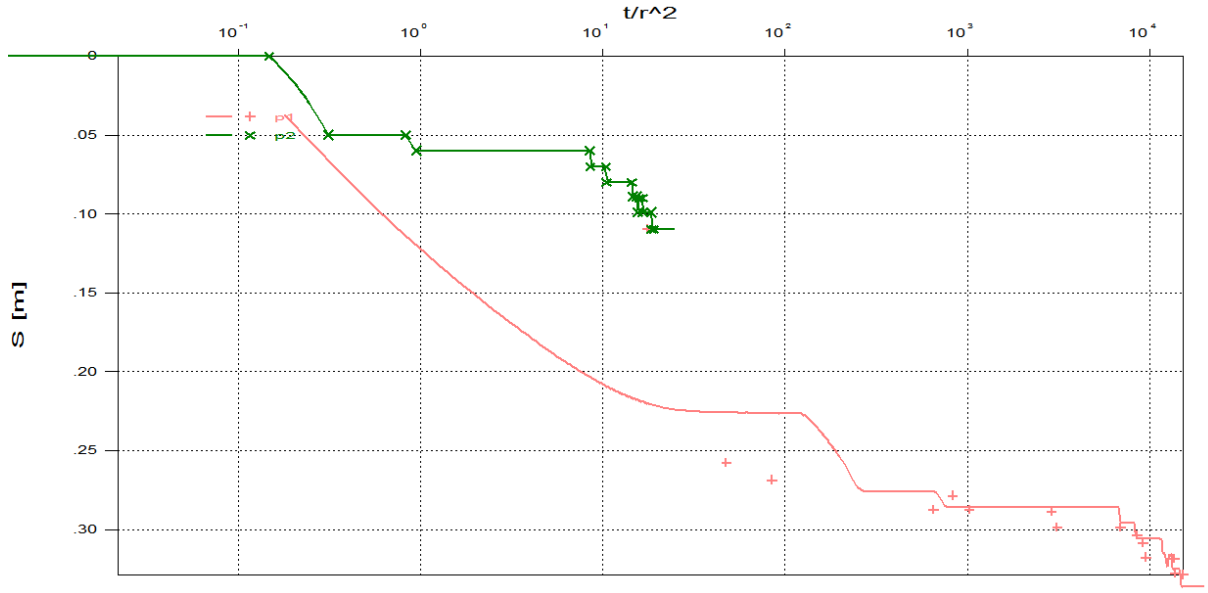
$$K = \frac{T}{M} = \frac{0{,}0131}{25{,}5} = 5{,}1 \cdot 10^{-4} m/s$$

$$a = \frac{1}{2.25 \cdot (t/r^2)_0} = \frac{1}{2.25 \cdot 0{,}008} = 55{,}55 m^2/s$$

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{0{,}0131}{55{,}55} = 2 \cdot 10^{-4}$$

Vrijednosti K_x su u trima piezometrima približno iste i smjernica su za daljnji postupak kalibracije. Aktivna poroznost malo utječe na rezultate kalibracije te je pri početku kalibracije korištena vrijednost od 10^{-4}.

U slijedećim slikama (4.16 – 4.26) su prikazani dijagrami sniženja S - t/r^2 s tablicama propusnosti koje prikazuju najbolju kombinaciju koeficijenata propusnosti pojedinog piezometra za najmanje odstupanje krivulje modela od izmjerenih podataka sniženja:

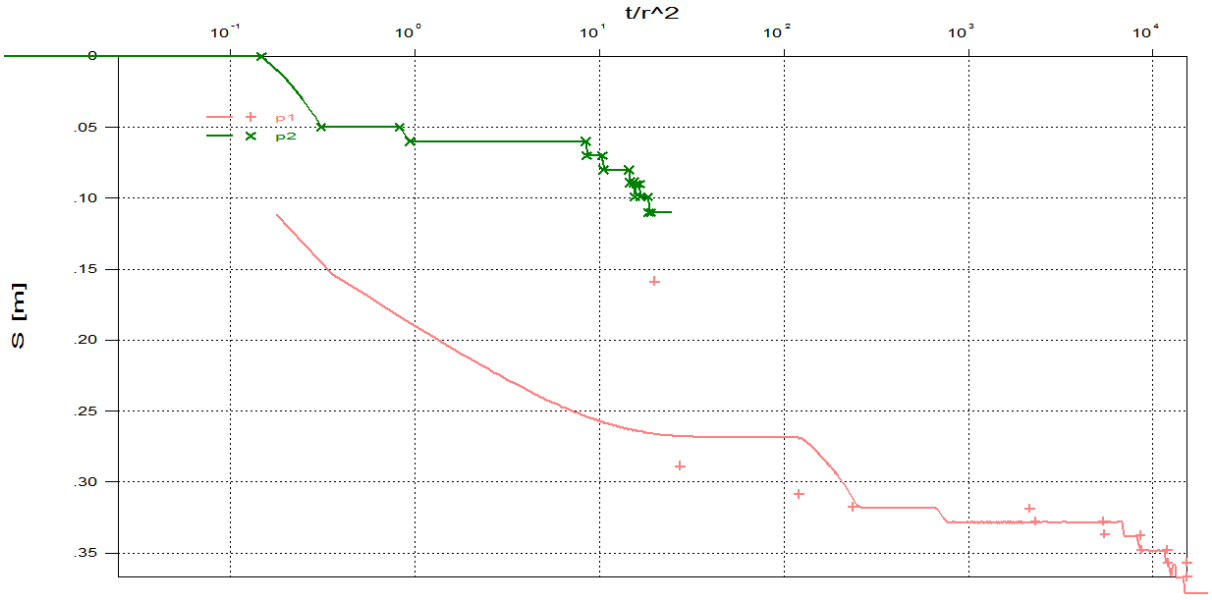


Slika 4.16 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=5,3 m i Z=4,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$3x10^{-4}$	$7x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$1x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/K_y	3	7	5	1

Tablica 4.1 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Najplići i najbliži piezometar zdencu je uspješno kalibriran s vijednostima propusnosti koje odgovaraju slojevima u tlu. Primjećena je veća propusnost u vertikalnom smjeru što za posljedicu ima manju anizotropiju slojeva.

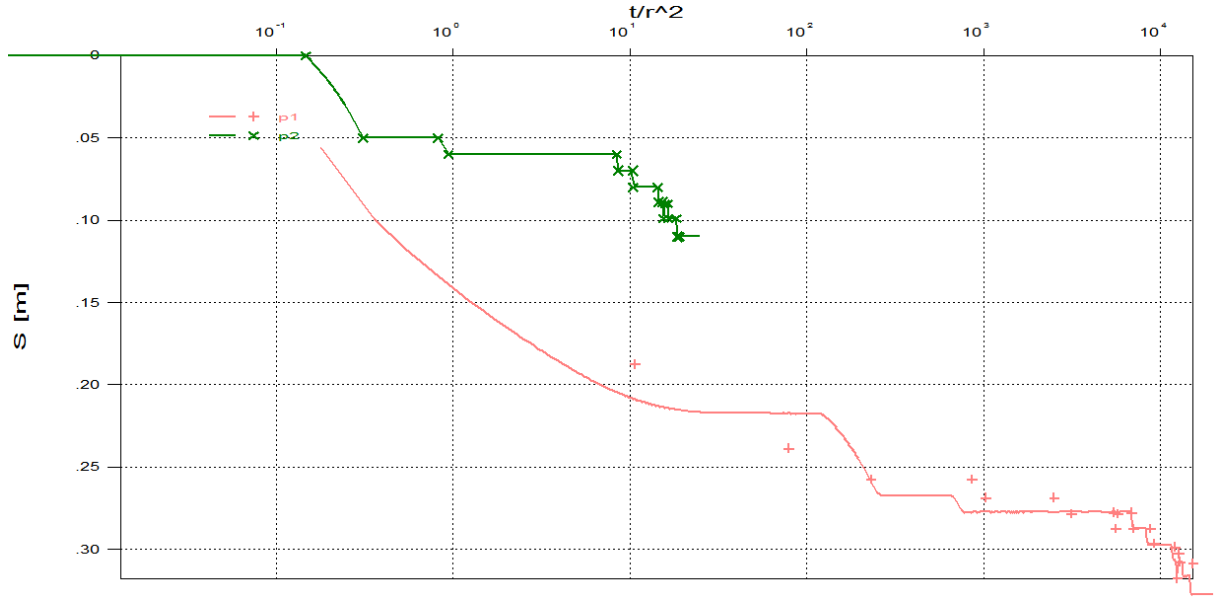


Slika 4.17 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=5,3 m i Z=9,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$4x10^{-5}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	4	20	5	1

Tablica 4.2 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

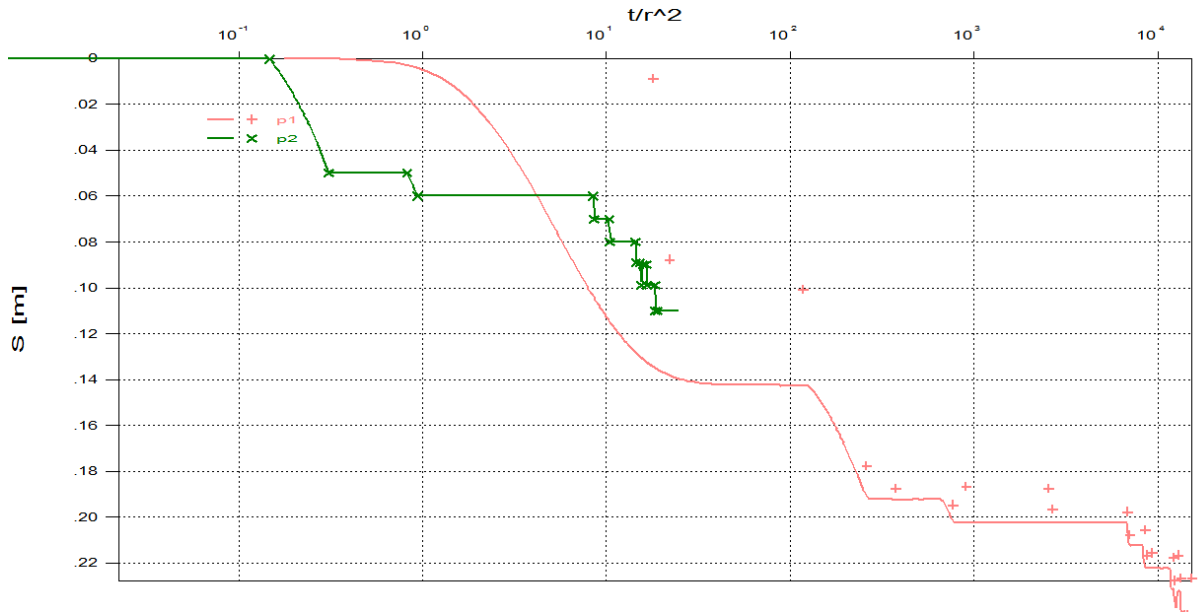
Komentar: Ovaj piezometar ima malo veću vrijednost anizotropije u drugom sloju od površine jer je propusnost u vertikalnom smjeru manja 2 puta nego u prethodnom piezometru.



Slika 4.18 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=5,3 m i Z=15,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$5x10^{-4}$	$9x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1.25	2.25	5	1

Tablica 4.3 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

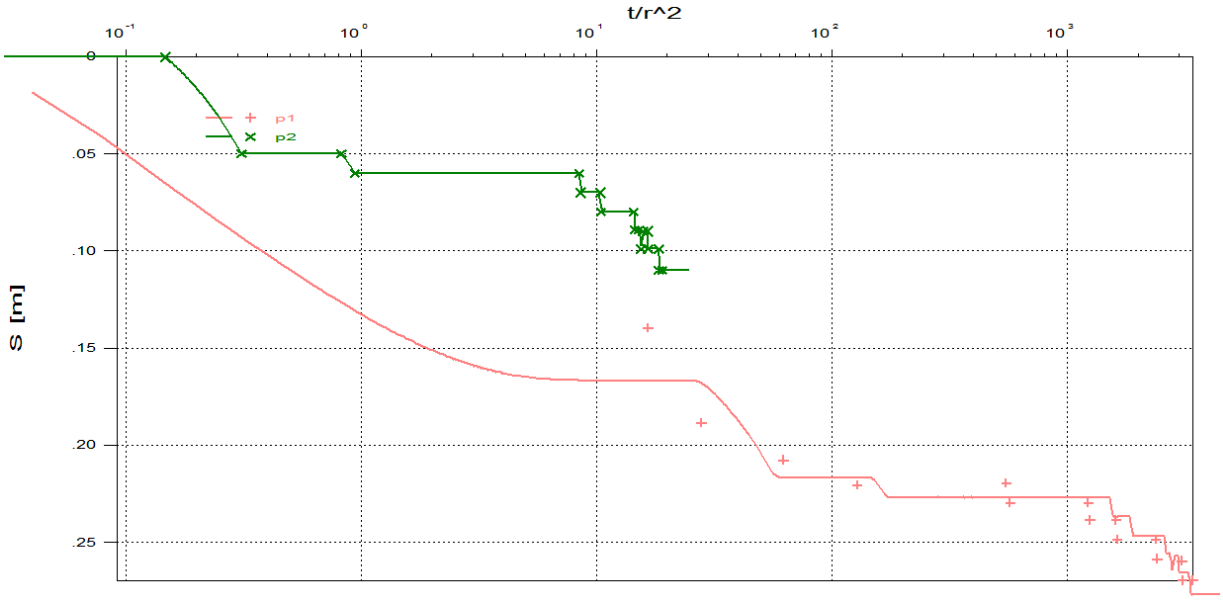


Slika 4.19 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=5,3 m i Z=26,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.4 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

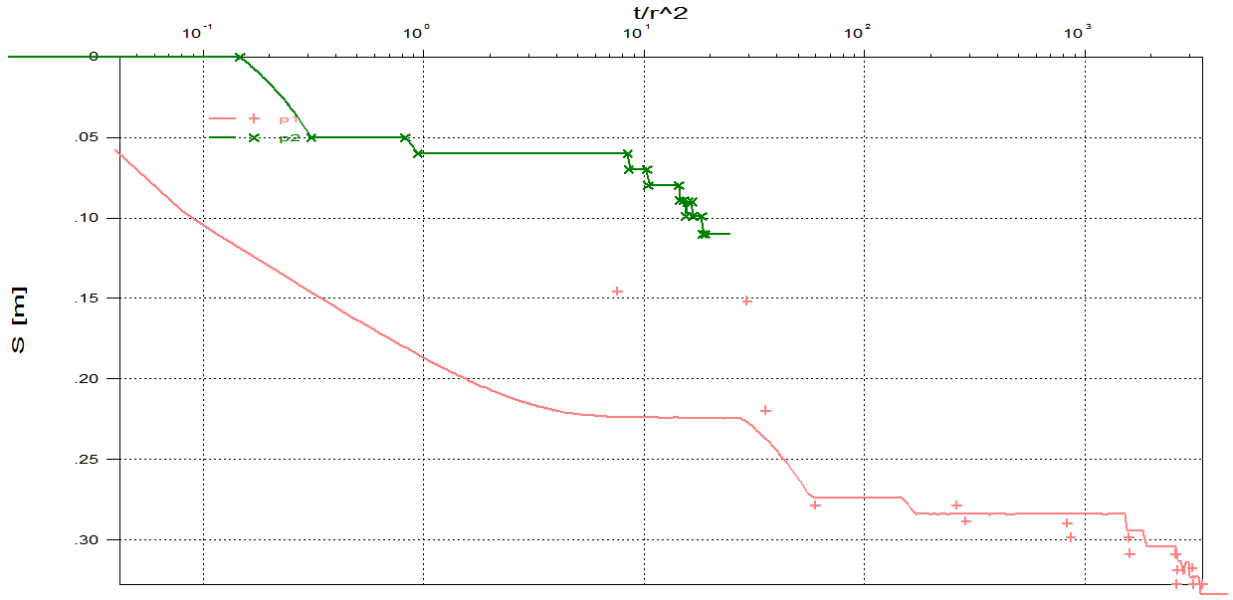
Komentar: Lokacija ovog piezometra je u zadnjem sloju od površine i njime se ispitivao utjecaj donjeg vodonosnika na gornji. Iskalibrirana je mala propusnost u sloju te je pokazano da je izotropan.



Slika 4.20 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=11,2 m i Z=4,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$7x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$4x10^{-5}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	4	17.5	5	1

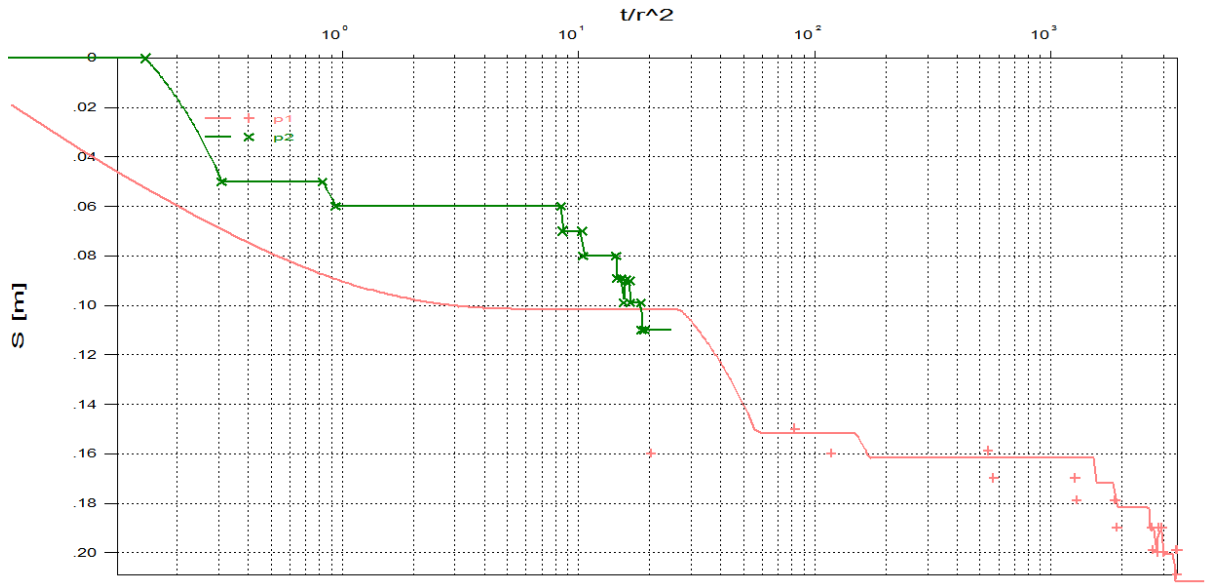
Tablica 4.5 – Koeficijenti propusnosti po slojevima



Slika 4.21 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=11,2 m i Z=9,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$3x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$5x10^{-5}$	$9x10^{-5}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	6	9	5	1

Tablica 4.6 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

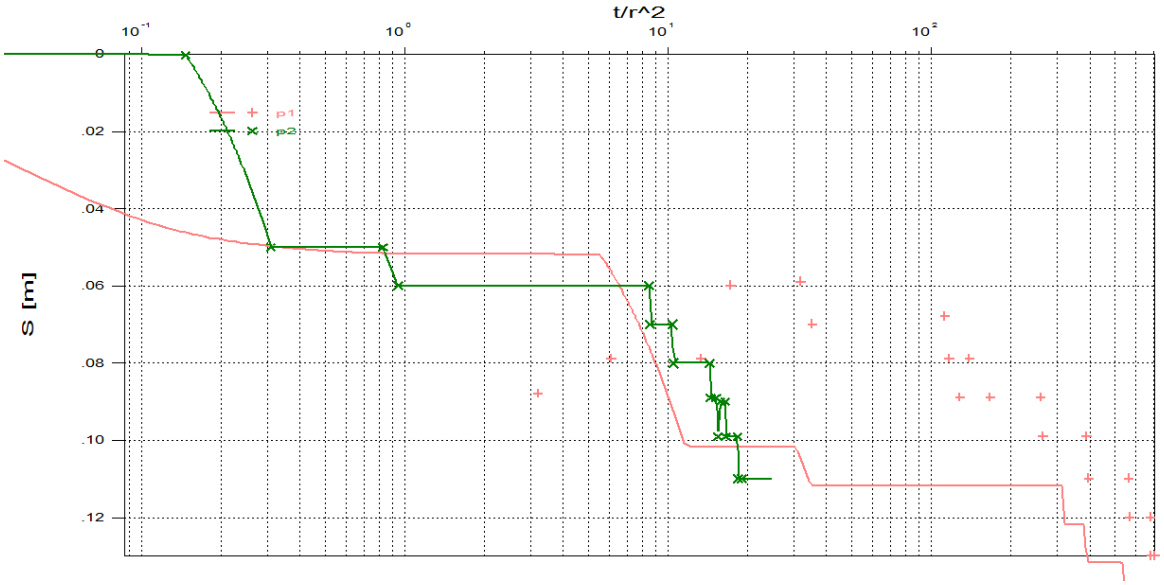


Slika 4.22 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=11,2 m i Z=15,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$2x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	5	5	1

Tablica 4.7 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: U najdubljem piezometru radijusa 11,2m je provedeno kalibriranje pri kojem se dobila velika horizontalna propusnost u drugom sloju od površine netipična za vrstu tla u tome dijelu.

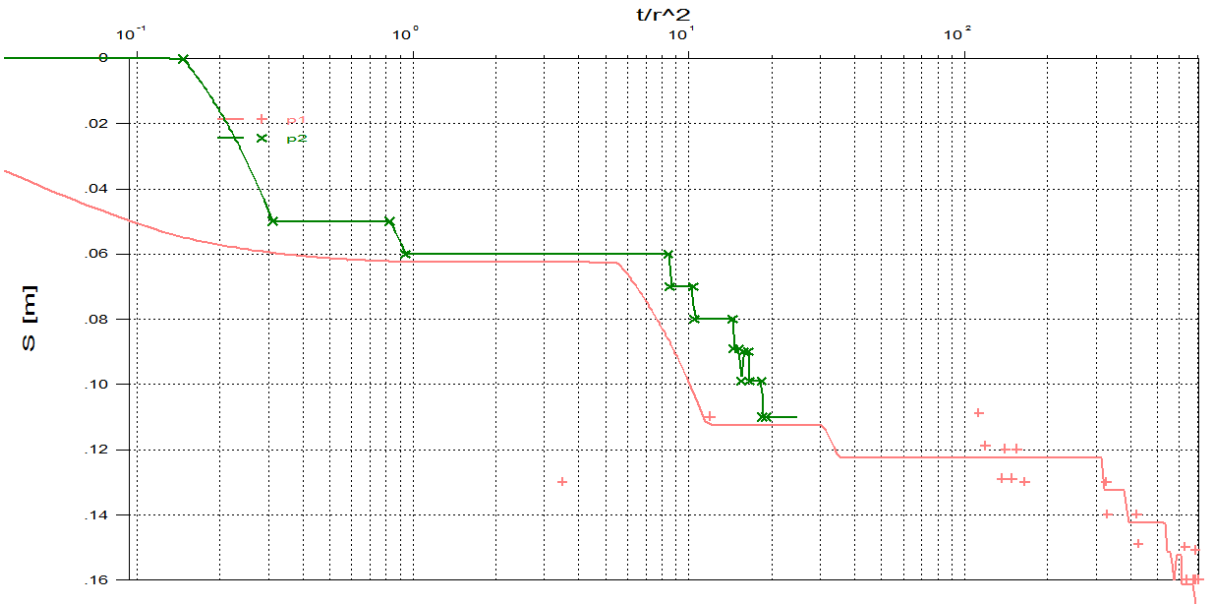


Slika 4.23 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=24,7 m i Z=4,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$1x10^{-3}$	$2x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$2x10^{-4}$	$2x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	5	10	5	1

Tablica 4.8 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

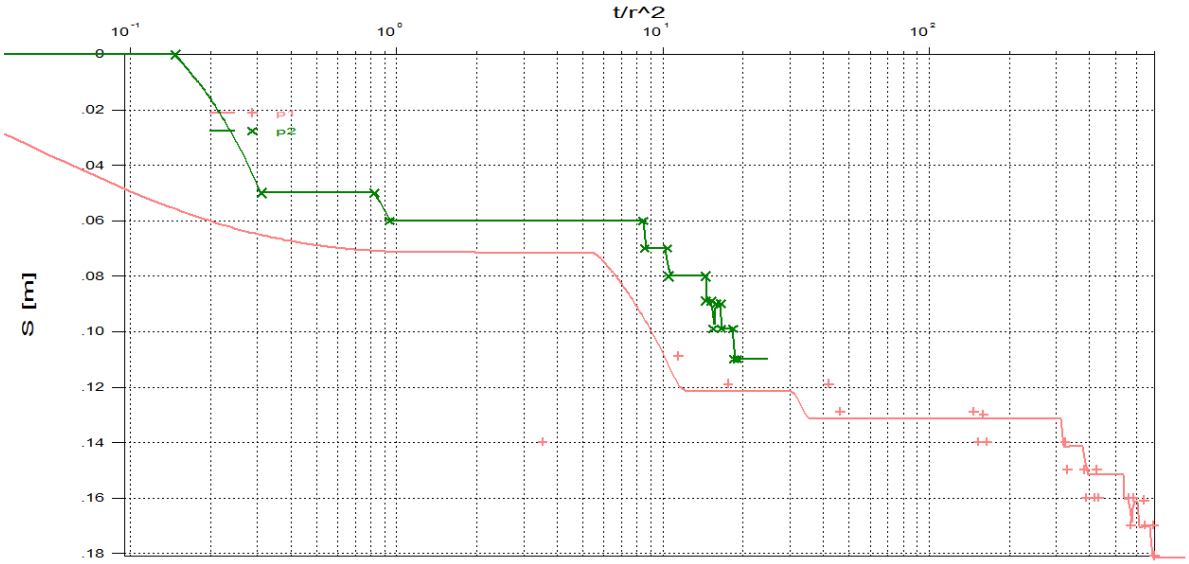
Komentar: Kao i u prethodnom piezometru, izrazita je propusnost tla u drugom sloju, ali i u prvom sloju. Udaljavanjem od mjesta crpljenja se pokazuje da slojevi tla povećavaju propusnost u horizontalnom smjeru. To vrijedi i za slijedeća dva piezometra.



Slika 4.24 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=24,7 m i Z=9,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$7x10^{-4}$	$2x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1.75	5	5	1

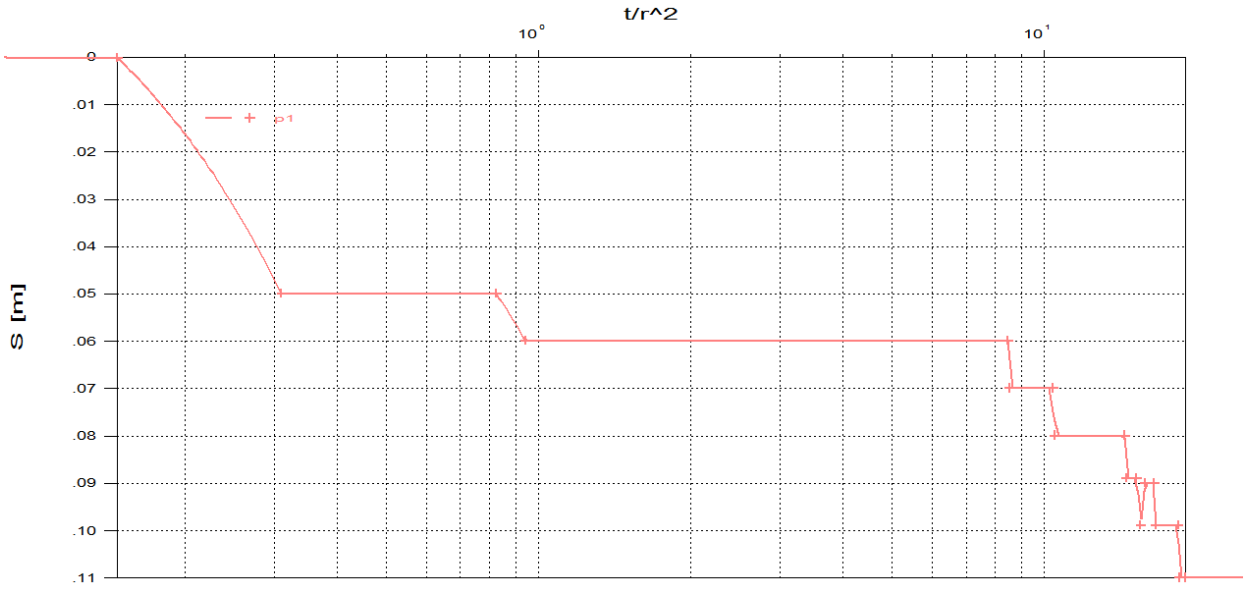
Tablica 4.9 – Koeficijenti propusnosti po slojevima



Slika 4.25 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=24,7 m i Z=15,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$2x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	5	5	1

Tablica 4.10 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

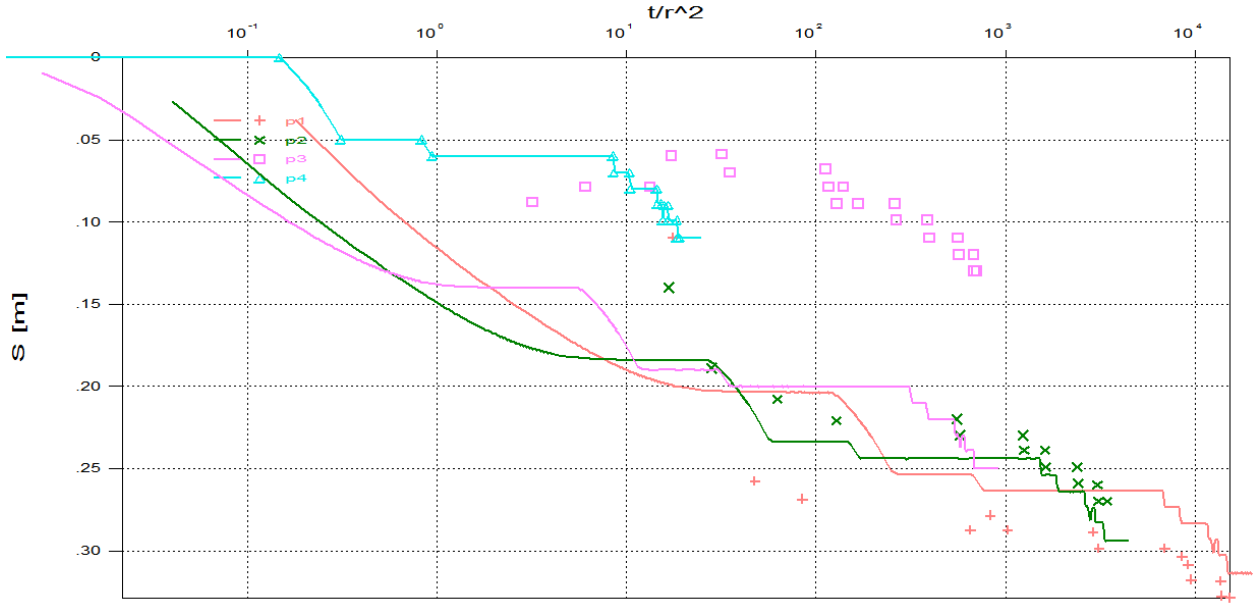


Slika 4.26 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=150,2 m i Z=15,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.11 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Rezultati najbolje kombinacije koeficijenata propusnosti za piezometre na jednakoj dubini su prikazani na slijedećim slikama:

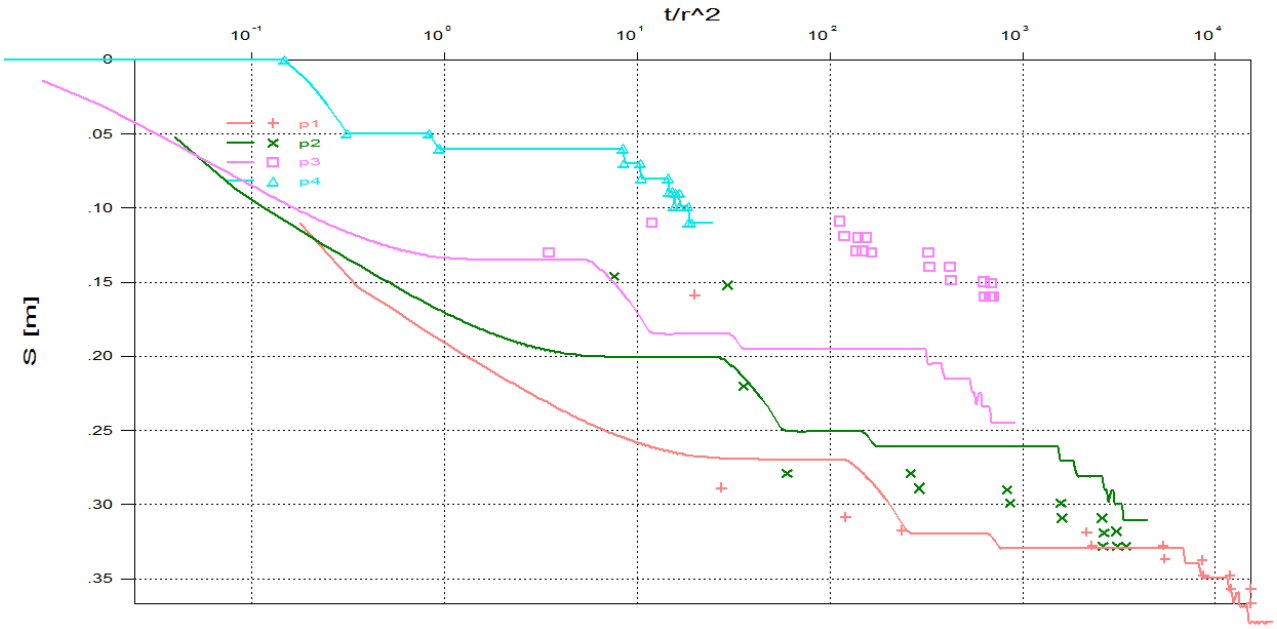


Slika 4.27 – S – t/r^2 (log) za piezometre na dubini Z=4,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$7x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$2x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	4	3.5	5	1

Tablica 4.12 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Nakon nekoliko kombinacija i postupnog usklađivanja krivulja modela s izmjerenim vrijednostima piezometara, odabrale su se slijedeće vrijednosti koeficijenata propusnosti za piezometre na dubini od 4,5m. Piezometar na udaljenosti 24,7 m od zdenca (p3) pokazuje značajnu razliku sniženja u odnosu na piezometre bliže zdencu koji su zadovoljavajući. Glavni razlog ovoj razlici odstupanja između piezometara je anizotropija slojeva tj. odnos između vertikalnog i horizontalnog koeficijenta propusnosti.

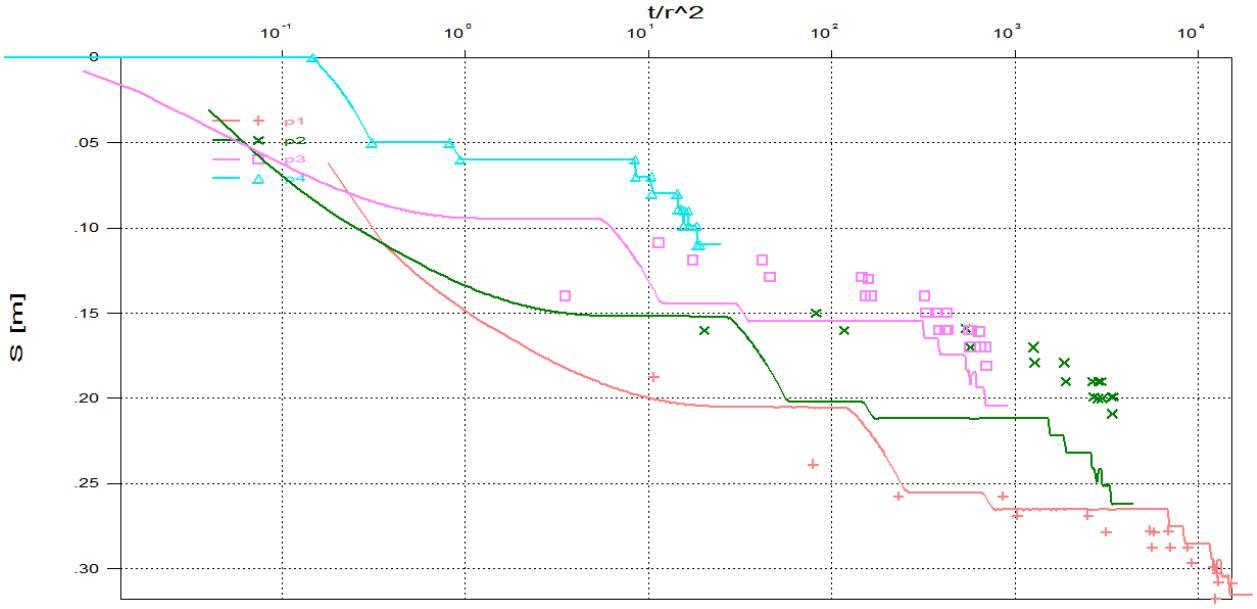


Slika 4.28 – S – t/r^2 (log) za piezometre na dubini Z=9,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$1x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	4	8	5	1

Tablica 4.13 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Ovdje imamo isti slučaj kao kod piezometara na dubini od 4,5m. Piezometar na udaljenosti 24,7 m od zdenca (p3) nema zadovoljavajuće rezultate jer ima veliko odstupanje zbog anizotropije slojeva.

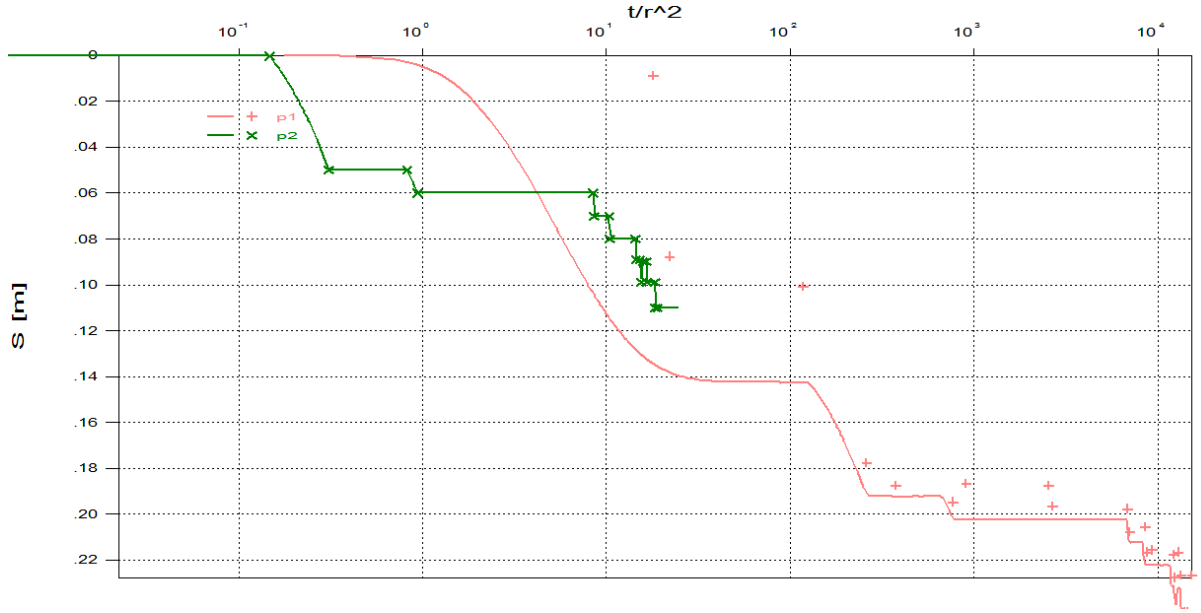


Slika 4.29 – S – t/r^2 (log) za piezometre na dubini Z=15,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$8x10^{-4}$	$1x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$1x10^{-4}$	$1x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	8	10	5	1

Tablica 4.14 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Na dubini od 15,5m, u trećem sloju po dubini, provedena su kalibriranja piezometara. Nakon postupnog usklađivanja, došlo se do kombinacije parametara od kojih su zadovoljili dva piezometra na radijusu od 4,5m i 15,5m. Piezometar na udaljenosti 11,2 m od zdenca (zelena p2) ima najveće odstupanje koje iznosi približno 5 cm.

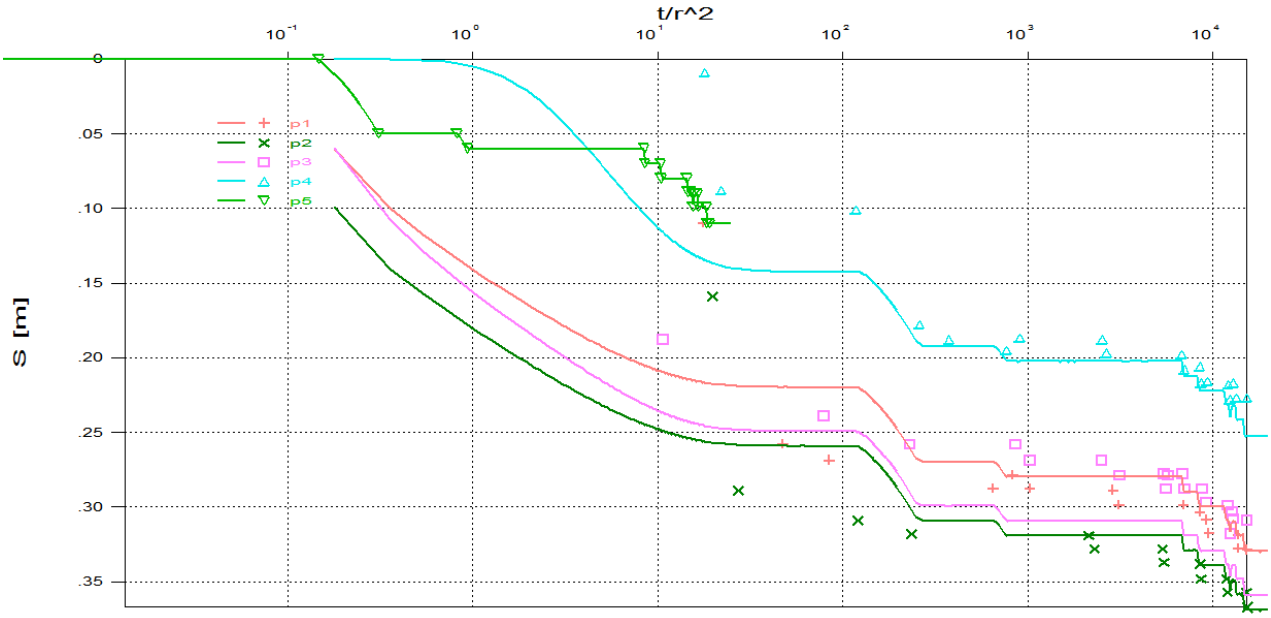


Slika 4.30 – S – t/r^2 (log) za piezometar R=5,3 m i Z=26,5 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.15 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Rezultati najbolje kombinacije koeficijenata propusnosti za piezometre na jednakim radijusima su prikazani na slijedećim slikama:

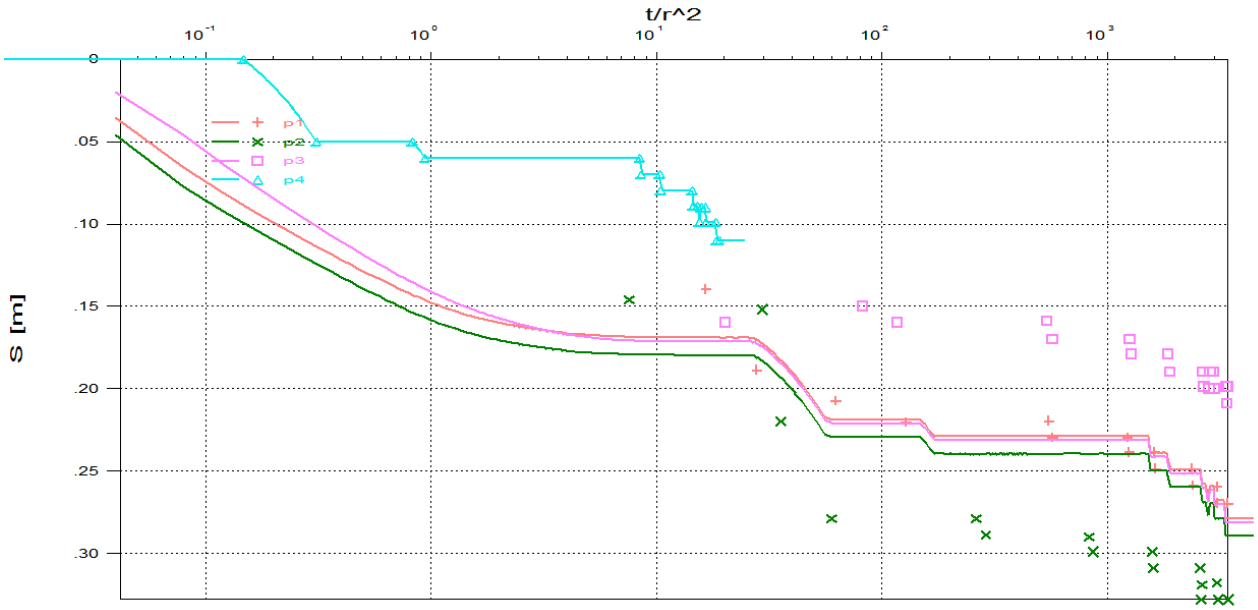


Slika 4.31 – S – t/r^2 (log) za piezometre na radijusu R=5,3 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.16 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Tijekom kalibracije piezometara jednakih radijusa se došlo do konačnog rezultata kojim je utvrđeno određeno odstupanje samo u piezometru smještenom u trećem sloju u iznosu od 3 cm što je vrlo zadovoljavajuće. Prisutna je mala anizotropija i to u trećem sloju od površine.

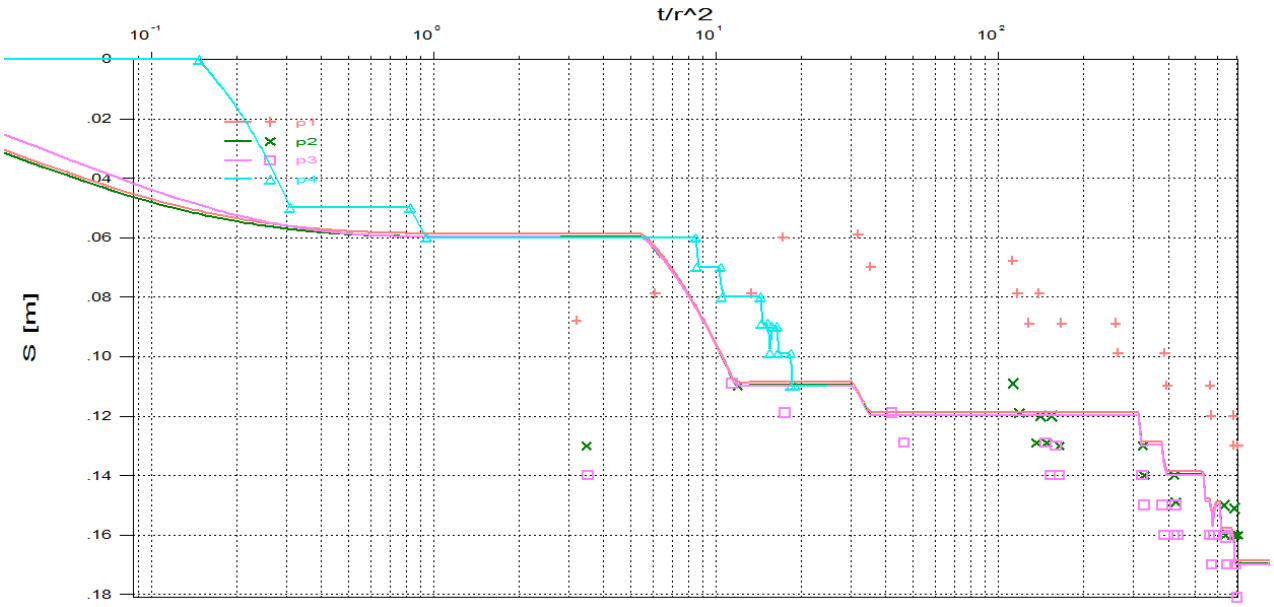


Slika 4.32 – S – t/r^2 (log) za piezometre na radijusu R=11,2 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$5x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$3x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1.25	2	10	1

Tablica 4.17 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Najboljom mogućom kombinacijom parametara u ovom slučaju je pokazano da dublji piezometri tj. oni u drugom i trećem sloju imaju određena odstupanja koja se kreću od od 3 do 6 cm.

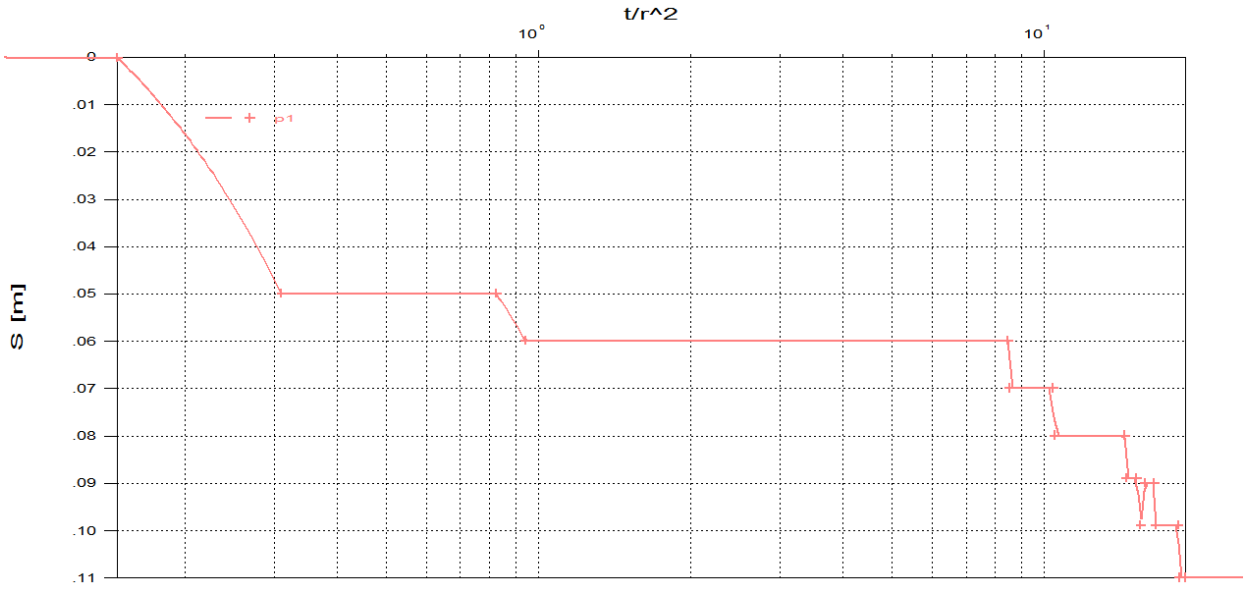


Slika 4.33 – S – t/r^2 (log) za piezometre na radijusu R=24,7 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$8x10^{-4}$	$2x10^{-3}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	2	5	5	1

Tablica 4.18 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Kalibracijom ovih podataka se došlo do ne baš zadovoljavajućih rezultata uspoređujući ih s ostalim odstupanjima. Piezometar na dubini od 15,5 m pokazuje dobro podudaranje izmjerenih podataka s modelskom krivuljom dok se kod ostalih primjeti veće odstupanje iako je određena velika horizontalna propusnost u gornjim slojevima. Ta odstupanja su iznosom od od 1 do 3 cm što može biti posljedica neispravnog očitavanja aparature.

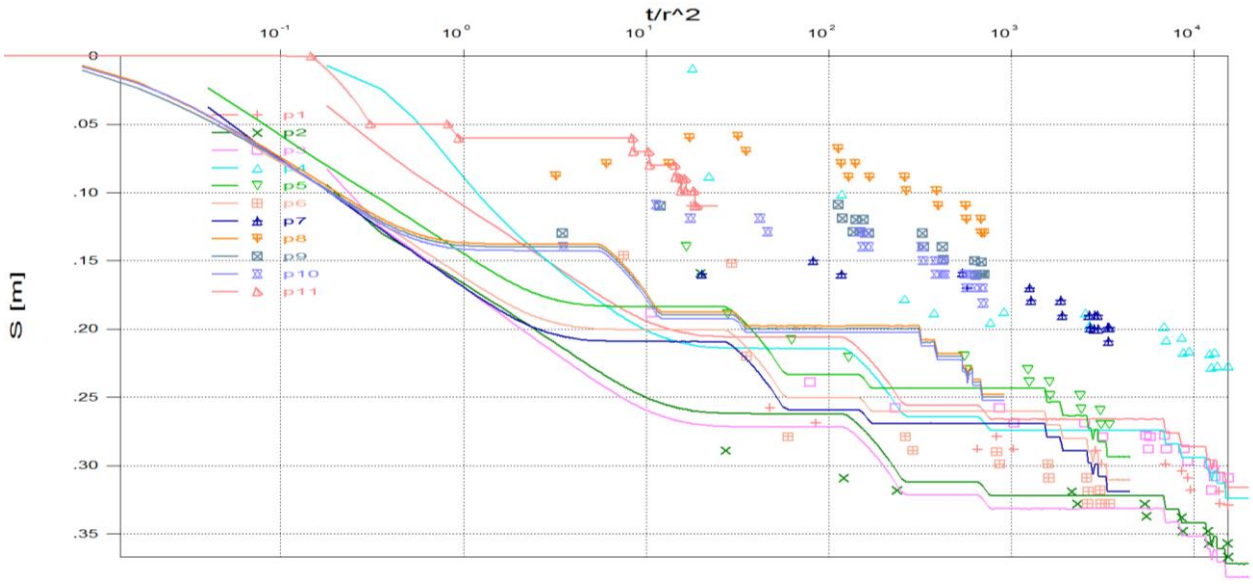


Slika 4.34 – S – t/r^2 (log) za piezometar na radijusu R=150,2 m

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.19 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Na slijedećim slikama su prikazane razne kombinacije koeficijenata propusnosti za svih 11 piezometara:

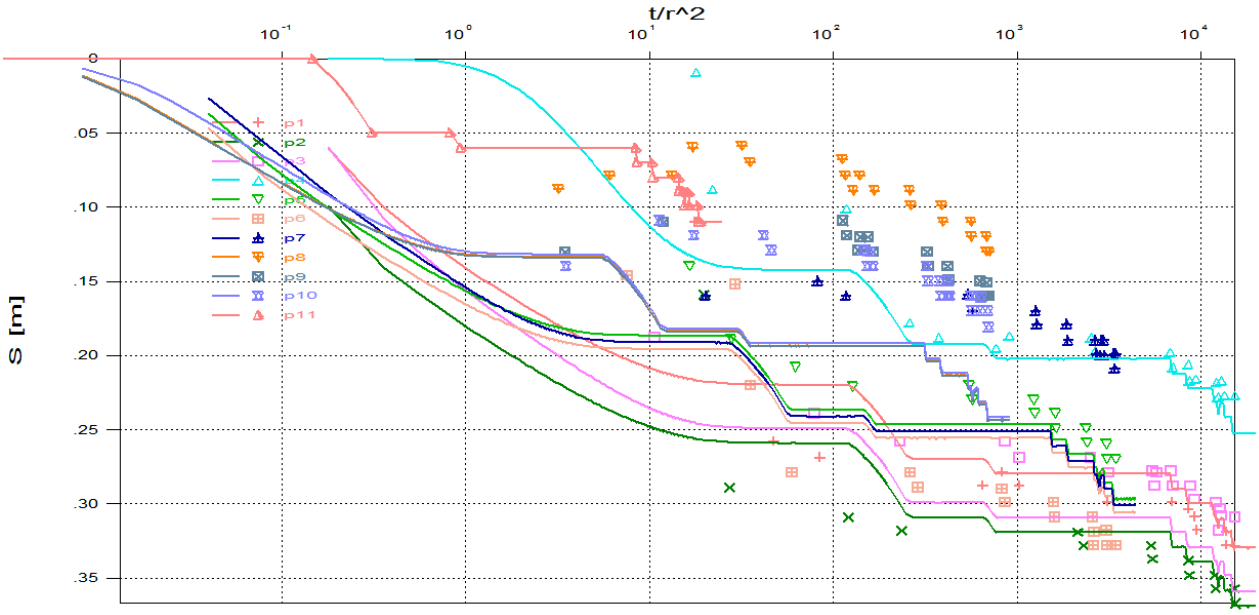


Slika 4.35 – S – t/r^2 (log) za sve piezometre kombinacije 1

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$2x10^{-4}$	$9x10^{-4}$	$9x10^{-5}$	$2x10^{-6}$
K_y	$2x10^{-4}$	$6x10^{-5}$	$9x10^{-5}$	$2x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	15	1	1

Tablica 4.20 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: S kalibracijom svih piezometara u ovom slučaju se krenulo s kombinacijom parametara koja je davala najbolje rezultate za piezometre u blizini zdenca i površine. Postupnim mijenjanjem se pokušavalo smanjiti što je moguće više odstupanja ostalih piezometara, a da se ne poremete izkalibrirani rezultati piezometara koji su zadovoljili. Na kraju se prihvatilo rješenje koje prikazuje odstupanja plave (p7) i narančaste boje (p8) kao najveća odstupanja. Anizotropija je dobivena samo u drugom sloju i iznosi 15. Ukupno odstupanje na 11 piezometara iznosi 58 cm. Maksimalno odstupanje je zabilježeno na piezometru radijusa 24,7 m i dubine 4,5 m koje iznosi 12 cm.

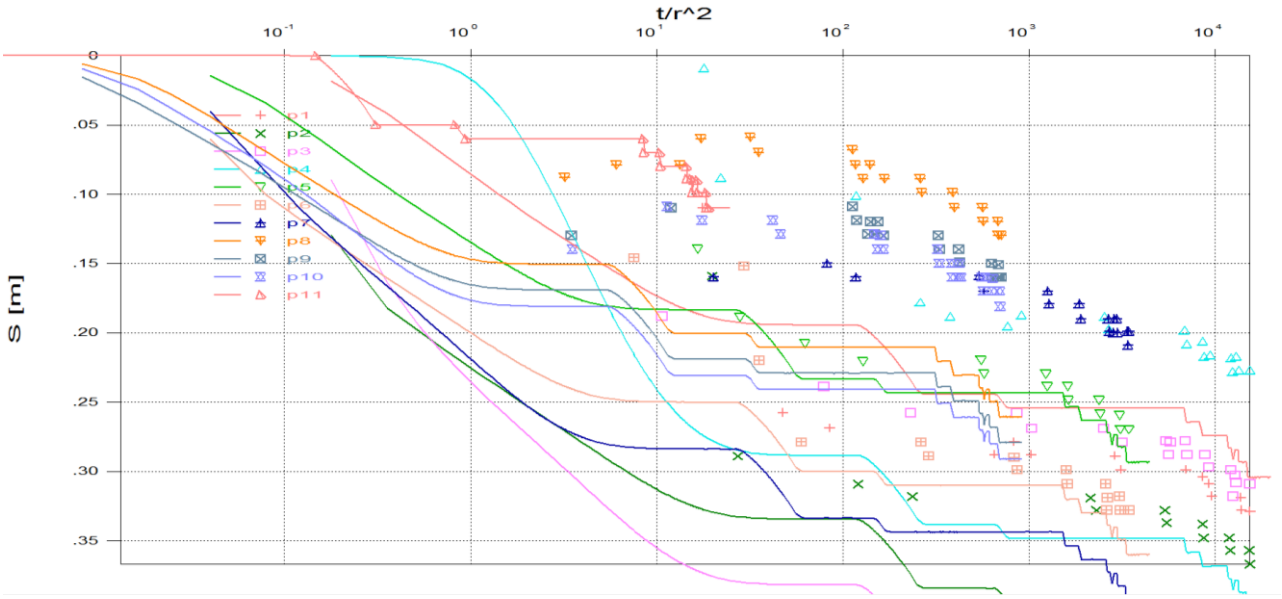


Slika 4.36 – S – t/r^2 (log) za sve piezometre kombinacije 2

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 4.21 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Pazeći na okvirne vrijednosti propusnosti pojedinih slojeva u tlu, dobili su se prethodni rezultati. Primjetilo se da se rezultati poboljšavaju povećanjem propusnosti u horizontalnom smjeru, ali zbog ranijeg hidrogeološkog ispitivanja tla se nije moglo ići unedogled s tim vrijednostima. To ukazuje na različitu propusnost tla u ispitivanom području u ovisnosti o udaljenosti od zdenca. Ukupno odstupanje na svih 11 piezometara iznosi 39 cm. Maksimalno odstupanje je zabilježeno na piezometru radijusa 24,7 m i dubine 4,5 m koje iznosi 11 cm.

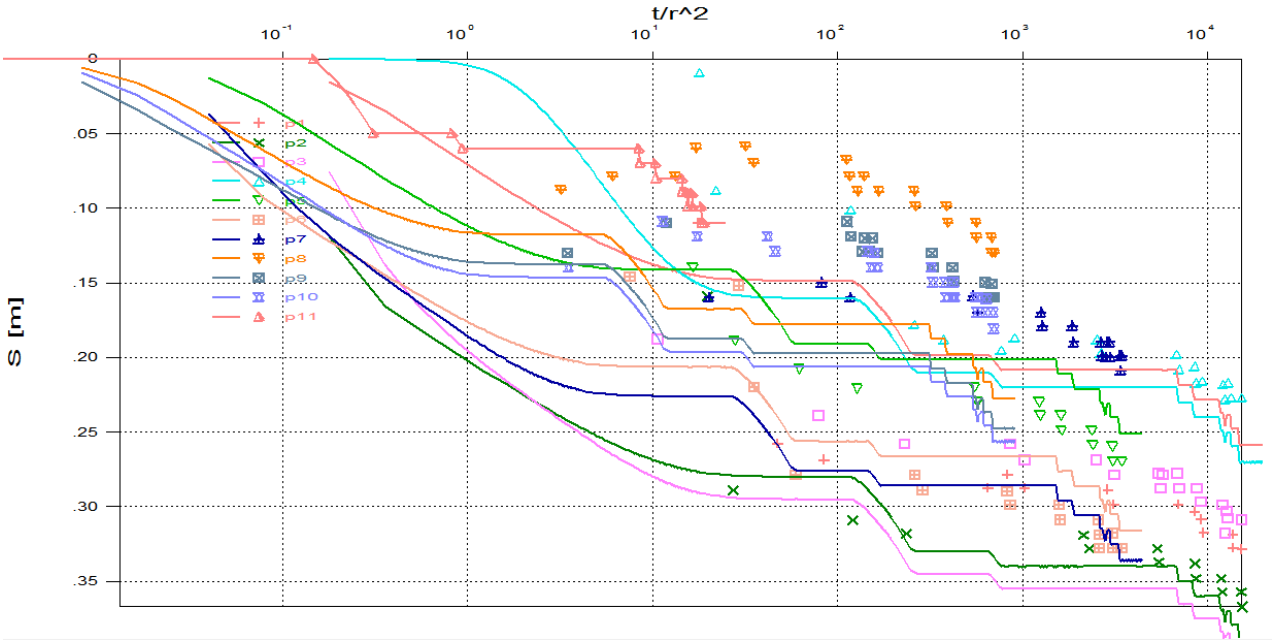


Slika 4.37 – S – t/r^2 (log) za sve piezometre kombinacije 3

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$3x10^{-4}$	$7x10^{-4}$	$8x10^{-6}$	$2x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-5}$	$4x10^{-5}$	$8x10^{-6}$	$2x10^{-6}$
K_x/K_y	7.5	17.5	1	1

Tablica 4.22 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Parametri i dobivene anizotropije u ovoj kombinaciji su uzete iz "Obrade rezultata pokusnog crpljenja na bunarskom polju Belišće, 1989. godine". Izrazita su odstupanja u svim piezometrima koja se daljnjom kalibracijom mogu još prilično dobro umanjiti tj. poboljšati.



Slika 4.38 – S – t/r^2 (log) za sve piezometre kombinacije 4

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-5}$	$4x10^{-5}$	$6x10^{-6}$	$1x10^{-6}$
K_x/K_y	10	20	5	5

Tablica 4.23 – Koeficijenti propusnosti po slojevima

Komentar: Ova kombinacija je slična s kombinacijom broj 2 jer imaju jednake propusnosti u horizontalnom smjeru. Vertikalna propusnost u slojevima je ovdje niža i do 10 puta. Uz povećanje anizotropije, još jedna posljedica toga su različita sniženja u piezometrima koja su posebno izražena u blizini zdenca zbog utjecaja crpljenja. Dobivene vrijednosti sniženja odstupaju i nigdje se ne poklapaju s terenskim sniženjima. Ukupno odstupanje na 11 piezometara iznosi 60 cm. Maksimalno odstupanje je zabilježeno na piezometru radijusa 11,2 m i dubine 15,5 m koje iznosi 13 cm.

Dobiveni rezultati su pokazali veliku osjetljivost modela na ulazne parametre i daljnjom obradom se nije mogla dobiti bolja kalibracija rješenja izmjerenih i modelskih krivulja.

Najbolju kombinaciju parametara propusnosti, pri kojoj se gledalo ukupno i pojedinačno maksimalno odstupanje piezometara te vrijednosti sniženja tijekom vremena trajanja crpljenja svih piezometara, je pokazala kombinacija 2.

5. ZAKLJUČAK

Korišten je velik broj kombinacija za različite veličine horizontalne propusnosti, za različite stupnjeve anizotropije i za različite uslojenosti vodonosnika. Za konačne rezultate su uzete one kombinacije koje daju najbolju podudarnost izmjerenih sniženja i sniženja dobivenih oponašanjem u numeričkom modelu.

Uzevši to u obzir, najboljim isprobanim kalibriranim rješenjem se pokazala kombinacija 2. Ona je uspjela postići globalno najmanje odstupanje vrijednosti sniženja iz numeričkog modela s vrijednostima sniženja izmjerenih na terenu. Što znači da je ukupno odstupanje na 11 piezometara iznosilo 39 cm. Maksimalno odstupanje je zabilježeno na piezometru radijusa 24,7 m i dubine 4,5 m koje je iznosilo 11 cm. Pošto je sustav pod tlakom i debljina vodonosnog sloja iznosi 27m, maksimalno odstupanje mjerenja i modela iznosi 0,4% što je vrlo zadovoljavajući postotak odstupanja. Pritom treba uzeti u obzir i pogrešku očitavanja od strane aparature koja iznosi i do 3 cm. Ostale kombinacije nisu zadovoljile jer je maksimalno odstupanje bilo dosta veće, jer su imale veća ukupna odstupanja piezometara i jer su prekoračivala okvirne vrijednosti koeficijenata propusnosti za određeni materijal u tlu. Kod kombinacije 2, piezometri smješteni u najbližem radijusu od zdenca su odlično zadovoljili odstupanja koja praktički i ne postoje dok se kod piezometara s većim radijusom dolazilo do većih odstupanja. Pokazalo se da su slojevi slabo anizotropni i da je najveća anizotropija postignuta u trećem sloju (5).

	1.sloj	2.sloj	3.sloj	4.sloj
K_x	$4x10^{-4}$	$8x10^{-4}$	$3x10^{-5}$	$5x10^{-6}$
K_y	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	$6x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
K_x/ K_y	1	2	5	1

Tablica 5.1 – Koeficijenti propusnosti i anizotropija slojeva odabrane kombinacije 2

Dobivenim rezultatima u ovom radu se došlo do zaključka da postojeći fond podataka kao i numerički model "FiltraWell" u kojem su obrađeni ti podaci mogu utvrditi zadovoljavajuću prognozu utjecaja Vodne Stepenice Osijek na zaobalje. Ističu se dva problema pri dobivanju rezultata kalibracije u numeričkom modelu. To je značajna nehomogenost slojeva u horizontalnom i vertikalnom smjeru te različita anizotropija u slojevima tj. odnos između horizontalnog i vertikalnog koeficijenta propusnosti.

Ukupno gledajući rezultate kalibracije i odstupanja sniženja koja su zadovoljila (maksimalno odstupanje od 0,4%!), analiza istražnog crpljenja zdenca na području Belišća je odredila hidrološke i hidrogeološke parametre tla neophodne za analizu procjeđivanja podzemne vode u zaobalju rijeke Drave zbog gradnje akumulacije.

Literatura

[1] Elektroprojekt – Projekt VS Osijek – Obrada rezultata pokusnog crpljenja na bunarskom polju Belišće, 1989.

[2] Zlatko Pletikapić, Prijedlog tematike V.S. Osijek – Problematika utjecaja na podzemne vode u zaobalju akumulacije, 1989.

[3] Zlatko Pletikapić, Bilješka sa sastanka – Pristupi određivanju utjecaja akumulacije V.S. Osijek na režim podzemnih voda u zaobalju, 1989.

[4] Vinko Jović, FiltraWell Manual, 2013.

[5] Vinko Jović, Obrada istražnih zdenaca, 2013.

[6] Hrvoje Gotovac, Nastavni materijali iz kolegija Modeliranje toka i pronosa u podzemlju, 2013.

[7] Vinko Jović, Osnove hidromehanike, 2006.