

Hidrodinamički odnosi geotermalnog polja Zagreb

Martić, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:724120>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-20**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

HIDRODINAMIČKI ODNOSI GEOTERMALNOG POLJA ZAGREB

Diplomski rad

Zvonimir Martić

N-257

Zagreb, 2019.

Hidrodinamički odnosi geotermalnog polja Zagreb

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-nafti fakultet
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb
Zavod za naftno inženjerstvo

Sažetak

Nakon detaljnijeg opisa fizikalnih, geoloških i tehničkih karakteristika ležišta i bušotina na lokalitetima SRC Mladost i SRC Blato, u radu su prikazani i analizirani testovi porasta tlaka provedeni na proizvodno-utisnom paru bušotina na području nedovršene Kliničke bolnice Novi Zagreb. Testovi su obrađeni u softveru Saphir programskog paketa Ecrin (licenca #9643), a izračunate vrijednosti parametara uspoređene su s vrijednostima dobivenim u program Interpret/2 sredinom 80-ih godina, s naglaskom na propusnost, tj. propusnu moć ležišta, te skin faktor. Propusnost i radijus crpljenja također su dobiveni grafoanalitičkim putem pri čemu se koristio kalkulator Excel. Na temelju takve usporedbe, u posljednjem poglavlju rezerviranom za zaključnu riječ, potvrdit će se ili opovrgnuti vjerodostojnost rezultata unutar stručne dokumentacije Službe za razradu INA-Naftaplin kompanije, što ujedno i definira cilj samog Diplomskog rada.

Ključne riječi: Geotermalno polje Zagreb, Saphir, test porasta tlaka

Diplomski rad sadrži: 57 stranica, 33 slike, 13 tablica i 16 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, asistentica RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a

2. Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a

3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 18.01. 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Hydrodynamic relations of the Zagreb geothermal field

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb
Department of Petroleum Engineering

Abstract

After a detailed description of the physical, geological and technical characteristics of the reservoirs and wells at SRC Mladost and SRC Blato locality, pressure build-up tests performed at a production-injection pair of the wells in the field of the unfinished Clinical hospital Novi Zagreb are presented and elaborated in this thesis. The tests are analyzed using the Ecrin (Saphir) software suite(licence #9643), and calculated values of the parameters are compared to the values obtained by Interpret/2 software in the middle of the 1980s, with an emphasis on permeability, i.e. the capacity of the reservoirs, and the skin factor. Permeability and the radius of investigation are also calculated by grapho-analytical method using the Excel calculator. Based on this comparison, in the last chapter that is reserved for conclusion, credibility of the results within the professional documentation of the INA-Naftaplin reservoir engineering service will be confirmed or disproven, which also defines the goal of the Master's Thesis.

Keywords: Zagreb geothermal field, Saphir, pressure build-up test

Thesis contains: 57 pages, 33 figures, 13 tables and 16 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD

Technical support and assistance: Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD.

Reviewers: 1. Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD
2. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD
3. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defence: January 18th, 2019., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

Sadržaj

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED LITERATURE O HIDRODINAMIČKIM TESTOVIMA | 2 |
| 3. GEOTERMALNO POLJE ZAGREB | 4 |
| 3.1. Osnovne značajke i povijest pridobivanja | 4 |
| 3.2. Geološka građa | 7 |
| 3.3. Tehničke karakteristike bušotina | 10 |
| 3.4. Tehnološki proces eksploatacije geotermalne vode | 14 |
| 4. TEORIJA HIDRODINAMIČKIH MJERENJA..... | 16 |
| 4.1. Test porasta tlaka | 20 |
| 4.2. Test interferencije..... | 22 |
| 4.3. Reservoir limit test..... | 24 |
| 4.4. Programski paket Ecrin-Saphir | 25 |
| 5. HIDRODINAMIČKE KARAKTERISTIKE GEOTERMALNOG POLJA ZAGREB | 28 |
| 5.1. Fizikalna svojstva ležišnih stijena i fluida | 28 |
| 5.2. Propusnost i hidrodinamička svojstva ležišta | 31 |
| 5.3. Analiza mjerenja porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A | 34 |
| 5.4. Analiza drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A pomoću programa Saphir..... | 36 |
| 5.5. Grafoanalitičko određivanje propusnosti i radijusa ispitivanja na bušotini KBNZ-1A..... | 46 |
| 5.6. Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B | 50 |
| 6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK | 54 |
| 7. LITERATURA | 56 |

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 3-1. Geotermalno polje Zagreb | 5 |
| Slika 3-2. Geološka karta u području Geotermalnog polja Zagreb | 8 |
| Slika 3-3. Litološki stup u području Geotermalnog polja Zagreb | 9 |
| Slika 3-4. Tehnički profil bušotine Mla-3 | 12 |
| Slika 3-5. Tehnički profil bušotine KBNZ-1B | 13 |
| Slika 3-6. Tehničko-tehnološka shema SRC Blato | 15 |
| Slika 4-1. Element prostora za derivaciju jednadžbe kontinuiteta | 17 |
| Slika 4-2. Režimi protjecanja na semilogaritamskoj i linearnoj skali | 19 |
| Slika 4-3. Grafičko određivanje početnog tlaka pri testu porasta tlaka | 21 |
| Slika 4-4. Stvarni test porasta tlaka prikazan Hornerovim dijagramom. | 22 |
| Slika 4-5. Smanjenje tlaka na aktivnoj i opažajućoj bušotini prilikom testa interferencije | 23 |
| Slika 4-6. Ekstrapolacija pravca iz MTR period u LTR period radi utvrđivanja granice ležišta..... | 24 |
| Slika 4-7. Glavno sučelje programa Saphir. | 26 |
| Slika 4-8. Dijagnostički alati u programu Saphir | 27 |
| Slika 5-1. Grafički prikaz prijenosa topline u ležištu Geotermalnog polja Zagreb..... | 28 |
| Slika 5-2. Hornerov dijagram podešavanja s tipskim krivuljama. | 35 |
| Slika 5-3. Postavljanje osnovnih karakteristika ležišta i bušotine..... | 36 |
| Slika 5-4. Definiranje PVT parametara | 37 |
| Slika 5-5. Ulazni podaci o testu porasta tlaka | 38 |
| Slika 5-6. Učitavanje mjerenih tlakova | 38 |
| Slika 5-7. Ručno pomicanje krivulje porasta tlaka po x-osi..... | 39 |
| Slika 5-8. Pomak krivulje porasta za iznos pseudoproizvodnog vremena | 39 |
| Slika 5-9. Prozori ikone <i>Extract dP</i> | 40 |
| Slika 5-10. Izgled krivulja porasta nakon odabira opcije <i>Extract dP</i> | 41 |
| Slika 5-11. Prozor za modeliranje u programu Saphir | 42 |
| Slika 5-12. Odstupanje postavljenog modela od unesenih podataka..... | 42 |
| Slika 5-13. Izgled krivulja porasta nakon odabira opcije <i>Improve</i> | 43 |

| | |
|---|----|
| Slika 5-14. Log-log dijagram nakon odabira opcije <i>Improve</i> | 44 |
| Slika 5-15. Log-log dijagram nakon promjene modela granica ležišta | 45 |
| Slika 5-16. . Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A Hornerovom metodom pomoću kalkulatora Excel | 48 |
| Slika 5-17. 2D prikaz bušotine KBNZ-1A s radijusom crpljenja $r_i = 945,35$ m u programu Saphir..... | 49 |
| Slika 5-18. Log-log dijagram podešavanja s tipskim krivuljama u programu Saphir na primjeru bušotine KBNZ-1B..... | 51 |
| Slika 5-19. Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B Hornerovom metodom pomoću kalkulatora Excel | 52 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 3-1. Popis bušotina i njihova dubina unutar eksploatacijskog polja GTP Zagreb..... | 6 |
| Tablica 3-2. Redoslijed ugradnje kolone zaštitnih cijevi na bušotini Mla-3 | 11 |
| Tablica 3-3. Redoslijed ugradnje kolone zaštitnih cijevi na bušotini KBNZ-1B | 12 |
| Tablica 5-1. Fizikalna svojstva stijena savske depresije | 29 |
| Tablica 5-2. Fizikalno-kemijska i termodinamička svojstva geotermalne vode na lokalitetu Mladost | 30 |
| Tablica 5-3. Svojstva ležišta | 31 |
| Tablica 5-4. Prikaz rezultata hidrodinamičkih mjerenja i proizvodnih ispitivanja | 32 |
| Tablica 5-5. Rezultati analize drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A | 35 |
| Tablica 5-6. Rezultati analize drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A u programu Ecrin | 45 |
| Tablica 5-7. Ulazni podaci o bušotini KBNZ-1A..... | 46 |
| Tablica 5-8. Podaci dobiveni testom porasta tlaka | 46 |
| Tablica 5-9. Osnovni parametri ležišta i bušotine KBNZ-1B | 50 |
| Tablica 5-10. Usporedba rezultata testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B u programu Interpret/2 i Ecrin..... | 51 |

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih SI jedinica

A- utisno-drenažna površina ležišta (m^2)

B- volumni faktor (m^3/m^3)

B_{wi} - obujamski koeficijent vode u ležišnim uvjetima (m^3/m^3)

B_{wu} - obujamski koeficijent vode u standardnim uvjetima na ušću proizvodne bušotine (m^3/m^3)

u- volumetrijska brzina toka po jedinici površine poprečnog presjeka (m/s)

C- skladištivost u bušotini (m^3/Pa)

C_m - specifična toplina stijena (J/kgK)

c_T - ukupna stlačivost vode i ležišne stijene (Pa^{-1})

C_{wL} - specifična toplina vode kod ležišnih uvjeta (kJ/kgK)

C_{wu} - specifična toplina vode kod uvjeta ušća (kJ/kgK)

$(C_p)_m$ - obujamska specifična toplina stijena (J/m^3K)

$(C_p)_L$ - obujamska specifična toplina ležišta (J/m^3K)

$(C_p)_w$ - obujamska specifična toplina vode (J/m^3K)

$(C_p)_{wL}$ - obujamska specifična toplina vode za ležišne uvjete (J/m^3K)

$(C_p)_{wu}$ - obujamska specifična toplina vode za uvjete ušća (J/m^3K)

d- promjer (m)

h- debljina ležišta (m)

h_{ef} - efektivna debljina ležišta (m)

h_p - protočna debljina ležišta (m)

k- propusnost ležišta (m^2)

kh- propusna sposobnost ležišta (m^3)

L- udaljenost bušotine od granice ležišta (m)

m- nagib pravca MTR perioda (Pa/ciklus)

p- tlak (Pa)

p_i - početni tlak u ležištu (Pa)

p_r - ležišni tlak (Pa)

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine (Pa)

p_{ws} - statički tlak na dnu bušotine (Pa)

p_{1hr} - statički tlak na dnu bušotine nakon jednog sata

q- protok (m^3/s)

q_o - protok unutar pseudoproizvodnog vremena (m^3/s)

q_s - protok fluida na površini (m^3/s)

r- radijus (m)

r_e - radijus ležišta (m)

r_i - radijus crpljenja (m)

r_w - radijus bušotine (m)

s- skin faktor (bezdimezionalan)

t- vrijeme (s)

t_p - pseudoproizvodno vrijeme (s)

W_{pcT} - ukupna količina geotermalne vode pri stalnoj temperaturi (m^3)

Δt - vrijeme nakon zatvaranja bušotine (s)

- vrijeme početka LTR perioda (s)

ΔW_p - godišnja količina proizvedene geotermalne vode (m^3/god)

η - hidraulički difuzivitet (m^2/s)

λ - parametar međušupljikavog protjecanja (bezdimezionalan)

- toplinska vodljivost stijena (W/mK)

μ - viskoznost fluida (Pa·s)

μ_w - viskoznost vode (Pa·s)

ρ - gustoća fluida (kg/m^3)

ρ_{wL} - gustoća vode pri ležišnim uvjetima (kg/m^3)

ρ_{wu} - gustoća vode pri standardnim uvjetima na ušću proizvodne bušotine (kg/m^3)

τ_{const} - vrijeme konstantne temperature na ušću (god)

Φ - poroznost (dio cijeloga)

$\nabla\Phi$ - gradijent potencijala u smjeru toka ($Pa/kg/m^3$)

ω - odnos pohranjivosti (bezdimezionalan)

Popis korištenih kratica

ETR- engl. *early time region*- rani period

GP- geotermalno polje

LTR- engl. *late time region*- kasni period

MTR- engl. *middle time region*- srednji period

RLT- engl. *reservoir limit test*- test utvrđivanja granica ležišta

1. UVOD

Osnovna je svrha hidrodinamičkih ispitivanja utvrditi mogućnost pridobivanja fluida iz ležišta. Ukoliko je ispitivanje ležišta pravilno izvršeno i analizirano, mogu se dobiti precizni podaci o propusnosti, veličini i oštećenju te izvedenoj stimulaciji ležišta, ležišnom tlaku, granicama ležišta, kao i o heterogenosti. U osnovi, testovi se obavljaju ostvarivanjem depresije u kanalu bušotine, što dovodi do pritjecanja ležišnih fluida u bušotinu. Ono što se mjeri zapravo je posljedica koju taj utok ostvaruje na ponašanje ležišnog tlaka. Ako se mjere protok fluida i tlak tokom proizvodnje ili samo tlak nakon zatvaranja bušotine, mogu se dobiti podaci dovoljni da se okarakterizira dio ležišta u kome se ta testirana bušotina nalazi. Podaci o tlakovima iz bušotina mogu se koristiti za procjenu uspješnosti opremanja bušotine, utvrđivanje potrebe, metode, kao i rezultata obrade stijena u bušotinama te stupnja povezanosti između bušotina itd. Takvi podaci u kombinaciji s podacima o proizvodnji ugljikovodika i laboratorijskim podacima o svojstvima stijena i fluida, stvaraju temelj za procjenu početnih rezervi nafte u ležištu i pridobivanja ugljikovodika koje se može očekivati u različitim uvjetima eksploatacije. Analiza podataka dobivenih iz hidrodinamičkih testova bazira se na pretpostavci da se protok nafte i plina odvija u poroznoj sredini uz određena ograničenja, kao što su:

- homogena i izotropna sredina
- radijalna geometrija sustava
- mali gradijenti tlakova
- horizontalan protok
- vrijedi Darcyjev zakon protjecanja

2. PREGLED LITERATURE O HIDRODINAMIČKIM TESTOVIMA

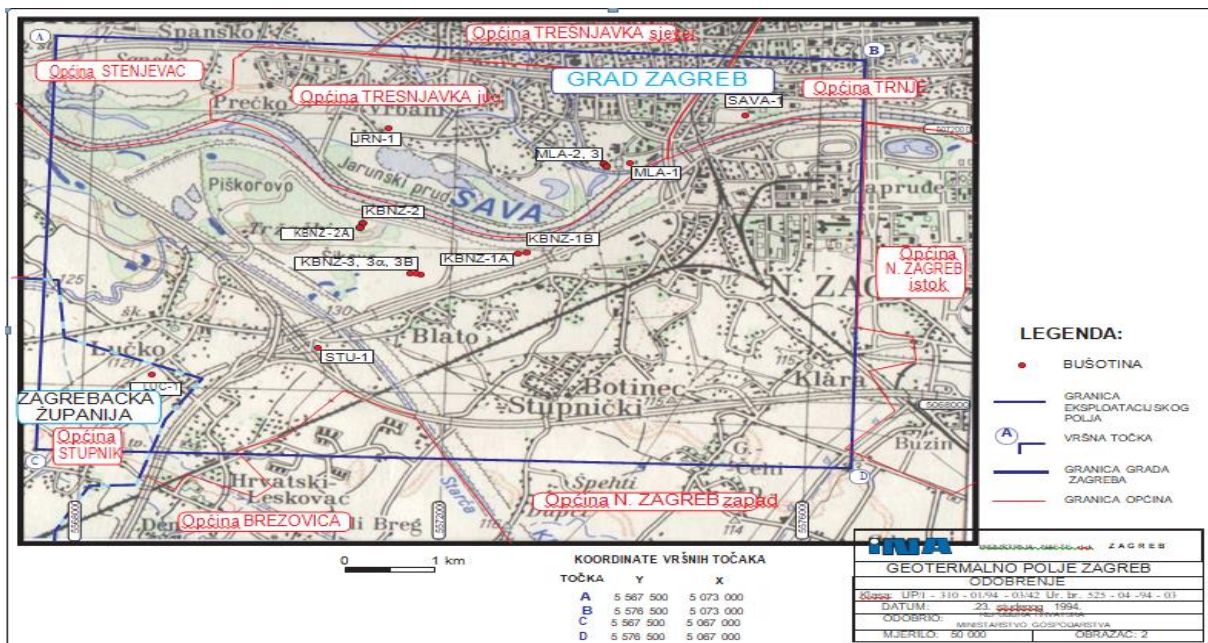
O važnosti testova u naftnim i plinskim bušotinama te o interpretaciji istih piše se već gotovo stotinu godina. Takva opsežna literatura s vremenom se sve više razvijala, prvenstveno zbog toga što se ponašanje tlaka u ležištu može brzo i lako izmjeriti te upotrijebiti za procjenu uspješnosti opremanja bušotine, stimulacije ležišta, potrebne metode obrade ležišta i dr. Još su 1928. godine Sclater i Stephenson objavili studiju u kojoj su pisali o primjeni uređaja za mjerenje tlaka, a godinu kasnije su Pierce i Rawlins uputili na vezu između tlaka na dnu bušotine i brzine proizvodnje. Međutim, prvi ozbiljniji pokušaj ostvarivanja veze između promjene tlaka s vremenom proizvodnje i ležišnih parametara prezentiran je 1937. godine od strane Morrisa Muskata, američkog naftnog inženjera latvijskih korijena. On je spomenute godine u svom djelu *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media* uveo metodu za ekstrapolaciju mjerenog ležišnog tlaka u statički tlak (Matthews et al., 1967). Bitno je napomenuti kako takva metoda nije uzimala u obzir kompresibilnost fluida. Potonje bitno svojstvo uzeto je u obzir tek 1950. godine kada su Miller, Dyes i Hutchinson razvili metodu analize testa porasta tlaka. Već je sljedeće godine Horner prezentirao ponešto drugačiji pristup istoj tematici. Upravo se ta dva posljednja spomenuta rada smatraju osnovama moderne teorije i analize ponašanja tlaka u ležištu (Matthews et al., 1967). Prvi opsežan pregled analize neustaljenog tlaka u bušotinama dao je Charles Sedwick Matthews 1967. godine u svojoj knjizi *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, u kojoj su razmotrena osnovna načela hidrodinamičkih ispitivanja. Također, Matthews se kritički osvrnuo na primjenu i ograničenja različitih tehnika ispitivanja koje je prikazao pomoću brojnih primjera. Teme pojedinih poglavlja u ovoj knjizi uključuju analizu porasta tlaka, određivanje prosječnog ležišnog tlaka, analizu protočnog testa s višestrukim brzinama protjecanja, analizu ponašanja tlaka u utisnim bušotinama, kao i utjecaj heterogenosti ležišta na ponašanje tlaka. Nadalje, 1981. profesor naftnog inženjerstva sa sveučilišta u Texasu, John Lee, objavio je knjigu pod naslovom *Well Testing* u kojoj naglašava osnovna načela upotrebe tlaka i protoka u bušotinama za vrednovanje formacije koja okružuje testiranu bušotinu. Knjiga počinje razmatranjem osnovnih jednadžbi koje opisuju neustaljeno stanje protoka fluida u poroznoj sredini. Nakon toga, opisuju se testovi porasta tlaka, kao i oni pri konstantnoj proizvodnji, testovi interferencije i puls testovi te ispitivanja bušotina i slojeva pomoću alatke spuštene na žici. U

knjizi su korištene i tipske krivulje za analizu testova u samim bušotinama. Jedna od vrlo bitnih knjiga vezana za ovo područje svakako je i *Well Testing: Interpretation Methods* koju je 1999. objavio Gilles Bourdarot. Za svaki ispitani slučaj, opisuje se najprikladnija metoda interpretacije, poput tradicionalnih metoda, tipskih krivulja, računalno-generiranih tipskih krivulja te interpretacije koja koristi derivacije. U knjizi se navode jednadžbe korištene za interpretaciju rezultata, a detaljne matematičke rasprave su izbjegnute. Također se spominju i uvjeti u kojima su različite metode korisne. Osim toga, Bourdarot je pokazao na koji način interpretacija testova u bušotinama varira s obzirom na tip granica ležišta (rasjedi, kanali, granice konstantnog tlaka, zatvorena ležišta), konfiguraciju bušotine i ležišta (parcijalna penetracija, inklinirane bušotine, umjetno frakturirana ležišta, horizontalne bušotine itd.), prirodu kompleksnih ležišta (raspuknuta ležišta, dvoslojna ležišta). Na samom kraju knjige, autor se bavi kombiniranim ispitivanjem bušotina testom interferencije i puls testom. Ovaj pregled literature o hidrodinamičkim ispitivanjima bit će zaključen knjigom iz 2003. godine naslovljenom *Pressure Transient Testing* koju je objavila skupina autora Lee, Rollins i Spivey. Ova knjiga predstavlja temelj analize neustaljenog tlaka i u njoj su objašnjene teoretske osnove komercijalnih softvera za analizu hidrodinamičkih testova. Tehnike analiza testova ilustrirane su pomoću potpunih i jasno napisanih primjera.

3. GEOTERMALNO POLJE ZAGREB

3.1. Osnovne značajke i povijest pridobivanja

Istražna bušenja pokazala su da geotermalna voda obuhvaća cjelokupno područje grada Zagreba, od Resnika na istoku do Sv.Nedelje na zapadu. Međutim, geotermalnim ležištem smatra se samo onaj dio vodonosnika koji čini povezanu hidrodinamičku cjelinu, uz povoljna protočna svojstva. Tako Geotermalno polje Zagreb (u daljnjem tekstu GP Zagreb) obuhvaća površinu od otprilike 54 km² i proteže se od Lučkog, Jaruna, preko Blata, sportskog parka Mladost do Cvjetnog naselja. Rezerve geotermalne vode na GP Zagreb svrstane su u „B“ kategoriju te iznose 77,14 l/s. Pritom je važno naglasiti da se geotermalna voda, nakon što se iskoristi njena toplina, ponovno utiskuje u ležište. Analizom testa kojim se utvrđuju granice ležišta izračunat je obujam ležišta od $1,157 \times 10^9$ m³ geotermalne vode. Prosječna temperatura iznosi 57 °C, a dubina ležišta kreće se u rasponu od 830 do 1635 m. Samo polje otkriveno je 1977. godine hidrodinamičkim ispitivanjima, a nakon toga pristupilo se izradi bušotina Mladost-1 (1980.g.), a do kraja 1986. izrađeno je dodatnih trinaest bušotina. Na geotermalnom polju koristi se geotermalna energija kroz dva tehnološka sustava i jedan podsustav: tehnološki sustav „Mladost“, tehnološki sustav „Klinička bolnica Novi Zagreb“ i tehnološki podsustav na lokalitetu Lučko. Pod pojmom „tehnološki sustav“ podrazumijevaju se eksploatacijske i utisne bušotine, cjevovodi kojima teče sama geotermalna voda, izmjenjivači topline te utisne sisaljke. Dakle, GP Zagreb broji ukupno petnaest bušotina, od kojih su tri eksploatacijske (Mla-3, KBNZ-1B, Luč-1), dvije utisne (Mla-2, KBNZ-1A.), osam mjernih (Mla-1, KBNZ-2, KBNZ-2A, KBNZ-3 α , KBNZ-3B, Sava-1, Jrn-1, Stu-1) te dvije likvidirane (KBNZ-3, Stu-1). Pregled spomenutih bušotina unutar GP-a Zagreb prikazan je na slici 3-1.



Slika 3-1. Geotermalno polje Zagreb (Elaborat o rezervama geotermalne vode eksploatacijskog polja Zagreb, 2014)

Prvi je tehnološki sustav Mladost u kojem se toplina iz geotermalne vode na bušotini Mla-1 koristila za grijanje sportske dvorane i plivačkih bazena. Tek je 1986. godine na toj bušotini uočen pad tlaka od 3,5 bar što je rezultiralo ponovnim vraćanjem iskorištene vode natrag u ležište zbog podržavanja ležišnog tlaka. Za utisnu bušotinu određena je bušotina Mla-2, a za eksploatacijsku bušotina Mla-3. Nekoliko godina kasnije, točnije 1991., zbog organizacijskih i tehnoloških razloga, prestalo se s vraćanjem geotermalne vode u ležište te je ista ispuštena u rijeku Savu. Već je sljedeće godine obnovljeno utiskivanje vode u količinama do 20 l/s. Vrlo je važno naglasiti da je s vremenom počeo primjenjivati termosifonski način utiskivanja, tj. bez utisnih sisaljki. Kontrolnim mjerenjem 2007. godine utvrđeno je povećanje ležišnog tlaka od 2,6 bar u odnosu na 1999. godinu, što se pripisuje prirodnom napajanju ležišta. Maksimalno pridobivanje vode za potrebe tehnološkog sustava Mladost iznosi 12 l/s, ali nije ostvarena u proteklih 10-ak godina niti se predviđa u narednom razdoblju.

Tehnološki sustav Klinička bolnica Novi Zagreb inicijalno se sastojala se od dvije proizvodne bušotine; KBNZ-1A, koja je kasnije prenamijenjena u utisnu bušotinu i bušotine KBNZ-1B. Maksimalna teoretska mogućnost proizvodnje za ovaj tehnološki sustav iznosi 65 l/s. Bušotina KBNZ-1A dovršena je 1984. godine, a koristila se za grijanje pomoćnih objekata gradilišta

Sveučilišne bolnice. Prvotno se ohlađena voda ispuštala u Savu, ali od 2003. godine se utiskuje natrag u ležište kroz prenamijenjenu utisnu bušotinu KBNZ-1A, dok je za proizvodnu bušotinu određena bušotina KBNZ-1B.

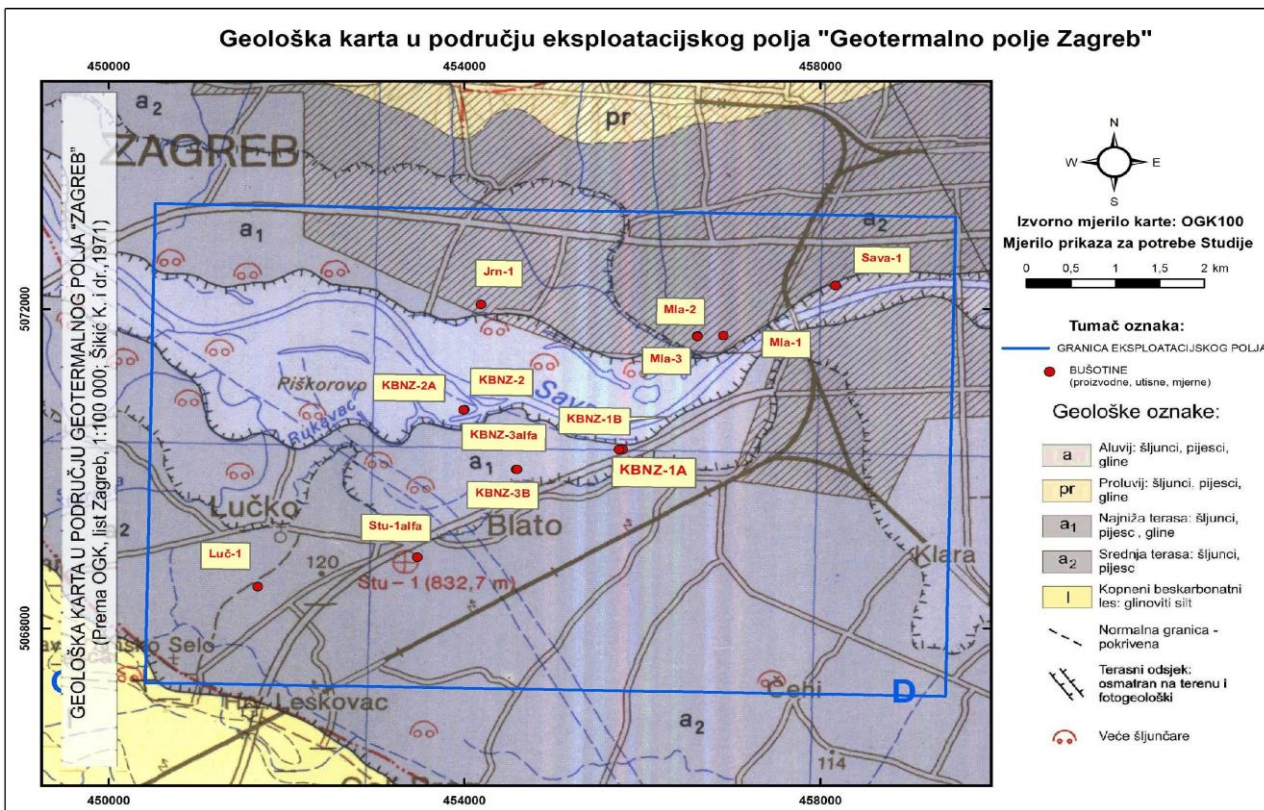
Osim spomenuta dva tehnološka sustava na GP Zagreb, postoji i tehnološki podsustav Lučko koji se sastoji od eksploatacijske bušotine Lučanka-1 (Luč-1). Geotermalna voda pridobivena iz te bušotine koristi se za grijanje pogona Tvornice preciznih alata. Pridobivena voda nakon predaje topline ne vraća se natrag u ležište, nego se ispušta u retencijski bazen, a nakon toga u odvodni kanal. Popis bušotina unutar GP Zagreb, kao i njihova dubina, dani su u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Popis bušotina i njihova dubina unutar eksploatacijskog polja GP Zagreb (Elaborat o rezervama geotermalne vode eksploatacijskog polja Zagreb, 2014)

| | Tehnološki sustav | Bušotina | Godina opremanja | Dubina (m) | Sadašnji status |
|-----|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| 1. | Mladost | Mla-1 | 1980. | 1057,0 | mjerna |
| 2. | | Mla-2 | 1985. | 911,7 | utisna |
| 3. | | Mla-3 | 1985. | 1362,2 | proizvodna |
| 4. | Blato | KBNZ-1A | 1984. | 1133,8 | utisna |
| 5. | | KBNZ-1B | 1986. | 1374,0 | proizvodna |
| 6. | | KBNZ-2 | 1984. | 1508,7 | mjerna |
| 7. | | KBNZ-2A | 1988. | 1267,0 | mjerna |
| 8. | | KBNZ-3 | 1985. | 1076,5 | likvidirana |
| 9. | | KBNZ-3 α | 1985. | 981,0 | mjerna |
| 10. | | KBNZ-3B | 1985. | 1378,7 | mjerna |
| 11. | Lučko | Luč-1 | 1986. | 950,0 | proizvodna |
| 12. | | Sava-1 | 1984. | 1594,3 | mjerna |
| 13. | | Jrn-1 | 1986. | 1635,1 | mjerna |
| 14. | | Stu-1 | 1964. | 832,7 | likvidirana |
| 15. | | Stu-1 α | 1979. | 830,0 | mjerna |

3.2. Geološka građa

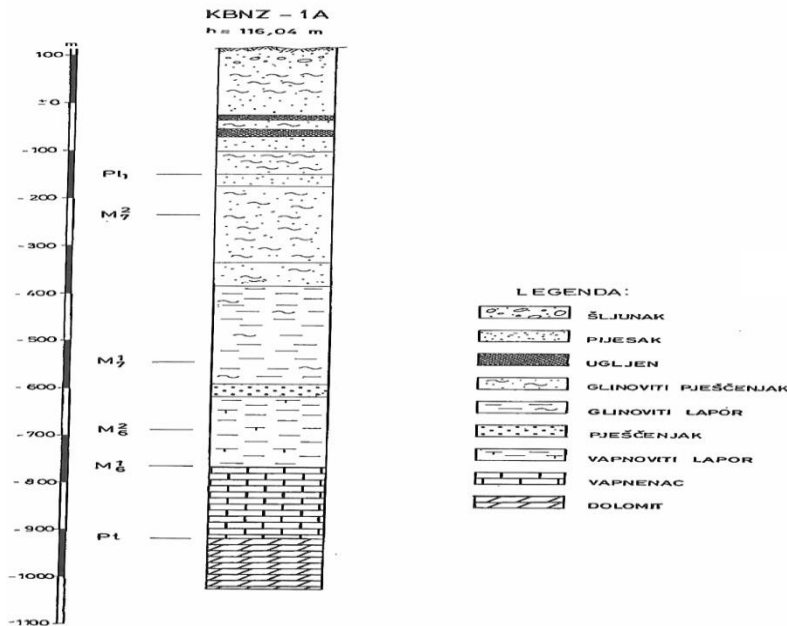
U području GP-a Zagreb razlikuje se površinska i dubinska geološka građa. Na površini su zastupljene pleistocenske (bezkarbonatni les) i holocenske (sedimenti savskih terasa, proluvijalni talozi i aluvijalni sedimenti) nevezane stijene. U jugozapadnom dijelu GP-a Zagreb prevladavaju lesni sedimenti koji sadrže male količine kalcijevog karbonata, a takvi talozi pretežito žute i žutosmeđe boje poznati su pod nazivom bezkarbonatni les. Takav les sastoji se od 50-70% silta i 10-30% čestica veličine gline, dok primjese sitnog pijeska variraju od 10 do 15%. Što se tiče mineralog sastava, prevladavaju epidot, granat i amfibol, a mogu se naći i cirkon, turmalin, apatit i dr. Nadalje, sjeverni i južni dio promatranog područja naziva se srednja ili druga savska terasa i u tom dijelu prevladavaju krupnozrnati pijesci i šljunci. Pritom, udio pijeska u odnosu na šljunak raste od zapada prema istoku, a petrografski sastav valutica proteže se od karbonatnih stijena, rožnjaka, preko kvarca i pješčenjaka do eruptiva. Najnižu, ili prvu savsku terasu, čine šljunci, pijesci i podređene gline prosječne debljine od 10 do 25 metara. Na krajnjem sjeveru nalaze se proluvijalni talozi zastupljeni krupnozrnatim, slabo zaobljenim šljuncima pomiješanim s pijeskom i glinom. Konačno, neposredno uz sam tok Save nalaze se aluvijalni nanosi šljunka, pijesaka i glina koji su terasnim odsjekom visine 1-1,5 metara odvojeni od prve savske terase s kojom dijele petrografski sastav. Geološka karta u području eksploatacijskog polja GP Zagreb prikazana je na slici 3-2.



Slika 3-2. Geološka karta u području Geotermalnog polja Zagreb (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

Podaci o dubinskoj geološkoj građi većinom su preuzeti iz Glavnog rudarskog projekta GP-a Zagreb iz 1995. godine. S obzirom na nedostatne paleontološke podatke, stratigrafski odnosi naslaga dobiveni su određivanjem kronostratigrafskih jedinica na temelju uzoraka sa vibracijskih sita i jezgri. Interpretacijom građe litoamnijskog facijesa nakon bušenja i seizmičkih mjerenja utvrđene su stijene Temelnog gorja, Podloge tercijara te stijene tercijarno-kvartarnog slijeda. Kao reprezentativan primjer takvih stratigrafskih odnosa izabran je litološki stup bušotine KBNZ-1A prikazan na slici 3-3.

LITOLOŠKI STUP BUŠOTINE KBNZ-1A



Slika 3-3. Litološki stup u području Geotermalnog polja Zagreb (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

Najstarije, nepropusne stijene, čine skupinu koja se naziva „Temeljno gorje“ (Tg), a izgrađene su od gnajseva, škriljavaca i šejlova. Sljedeća u nizu je tzv. „Podloga tercijar“ (Pt) koja je većinom zastupljena dolomitima koji, zbog svojih izrazito dobrih kolektorskih karakteristika, predstavljaju kvalitetnu vodonosnu formaciju. Stijene iz spomenute skupine dosegnute su u bušotinama KBNZ-1A, KBNZ-2 i Stu-1, kao i u bušotinama M1a-3, KBNZ-1B i KBNZ- 2A u kojima nije probušena cjelokupna debljina dolomitnih naslaga jer je zbog njihove značajne sekundarne poroznosti došlo do gubitaka cirkulacije tijekom bušenja. Sedimenti iz skupine „Tercijar“ (Tc) ističu se svojom značajnom debljinom, koja na nekim mjestima prelazi i 2000 m. Prema tipu kolektora, ali i litologiji, razlikuje se donji i srednji miocen od gornjeg miocena i pliocena. Stijene donjeg i srednjeg miocena (M5-M1) sačinjene su od litoamnijskih vapnenaca, pješčenjaka, breča, konglomerata, brečokonglomerata i lapora. Litoamnijski vapnenci s obzirom na svoj volumen čine glavni geotermalni vodonosnik, koji u zapadnom istražnom području zajedno s mezozojskim dolomitima čini jednu hidrodinamičku cjelinu. U području gornjeg miocena (M7-M6) nema vodonosnika, a ova skupina izgrađena je od

kalcitnih lapora Prkos formacije te od lapora s pjeskovitom komponentom Ivanić Grad formacije. Nadalje, zona „Pliocen“ (Pl) sačinjena je od sedimenata gline, lapora i pijeska koji imaju bolja izolatorska nego kolektorska svojstva. Opis dubinske geološke građe završava se kvartarnim naslagama (Q) u kojim je dominantan šljunak iz aluvija rijeke Save koji je izrazito dobar kolektor vode.

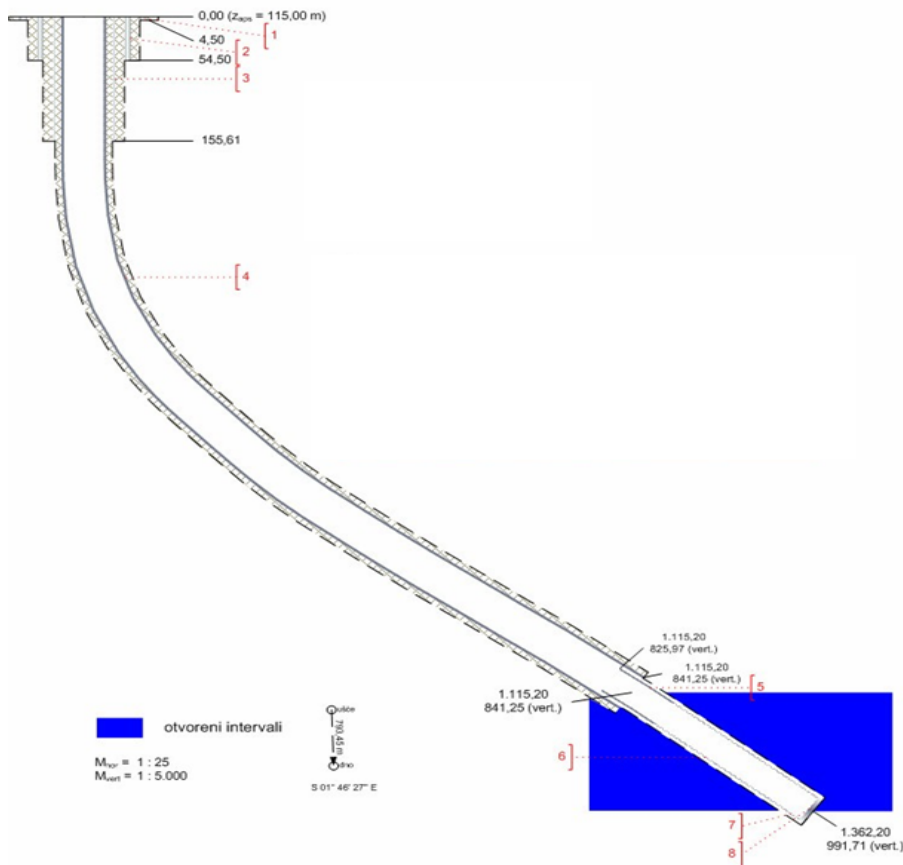
3.3 Tehničke karakteristike bušotina

Već je ranije spomenuto da se na GP-u Zagreb nalaze eksploatacijske, mjerne i utisne bušotine. U nadzemnu opremu svake pojedine bušotine spadaju bušotinska glava i erupcijski uređaji koji su predviđeni za radni tlak od 210 bar (3000 psi). Hermetičnost bušotina onemogućava negativan utjecaj geotermalne vode na podzemnu pitku vodu. Konstrukciju kanala bušotine čine kolone zaštitnih cijevi čiji promjer i kvaliteta čelika moraju zadovoljiti naprezanja koja se pojavljuju u nizu. Točna dubina ugradnje kolone zaštitnih cijevi određuje se na temelju Projektnog zadatka, geološkog praćenja bušotina, karotažnih mjerenja te pojava uočenih tokom izrade kanala bušotine. Uvodna kolona ima zadaću da prekrije površinske slojeve šljunaka i glina i spriječi zagađenje površinskih voda. Peta uvodne kolone zaštitnih cijevi ugrađuje se u kompaktnim naslagama. Zatim se ugrađuje tehnička, a nakon nje i proizvodna kolona do dubine krovine proizvodnog intervala. Nakon proizvodne kolone dolazi lajner nasuprot intervala zasićenog geotermalnom vodom te se pristupa cementiranju međuprostora između lajnera i prethodno ugrađene proizvodne kolone. Tehničke karakteristike i sastav kolona zaštitnih cijevi donesene su na temelju konstrukcijskih elemenata, bušotinskih uvjeta i tehnoloških zahtjeva koji su navedeni u projektu. Potrebno je još napomenuti kako otklon kanala bušotine nije smije biti veći od 2°, a mjeri se svakih 400 izbušenih metara, odnosno nakon svakog vađenja alata. Prilikom samog bušenja koristi se isplaka na bazi bentonitne suspenzije. Tokom izrade kanala bušotine ugrađuje se oprema za ispitivanje koja se sastoji od pakera i niza uzlaznih cijevi. U sljedećim primjerima dan je popis tehničkih karakteristika proizvodnih bušotina na lokalitetima „Mladost“ i „Klinička bolnica Novi Zagreb“. Za spomenute je bušotine, kao i za bušotinu Lučanka-1, u Glavnom rudarskom projektu proveden detaljan hidraulički i termodinamički proračun s obzirom na pad tlaka i gubitak topline, kako u proizvodnom, tako i u cjevovodnom sustavu. Na temelju tih proračuna

odabrane su duljine i promjer zaštitnih cijevi za pojedine bušotine. U tablici 3-2 nalazi se redosljed i dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi na proizvodnoj bušotini Mla-3, dok je na slici 3-4 prikazan tehnički profil spomenute bušotine.

Tablica 3-2. Redosljed ugradnje kolone zaštitnih cijevi na bušotini Mla-3 (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

| Pozicija | od (m) | do (m) | d (in) | d (mm) | Naziv kolone |
|-----------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------------|
| 1. | 0,00 | 4,50 | 27 ^{5/9} | 699,999 | iskop |
| 2. | 0,00 | 54,50 | 20 | 508,000 | uvodna |
| 3. | 0,00 | 155,61 | 13 ^{3/8} | 339,725 | I tehnička |
| 4. | 0,00 | 1115,20 | 9 ^{5/8} | 114,300 | II tehnička |
| 5. | 1087,51 | 1158,83 | 7 | 177,800 | nadfiltarska cijev |
| 6. | 1158,83 | 1337,30 | 7 | 177,800 | slotirani filter |
| 7. | 1337,30 | 1355,67 | 7 | 177,800 | bušena cijev |
| 8. | 1355,67 | 1362,20 | 7 | 177,800 | taložnik |

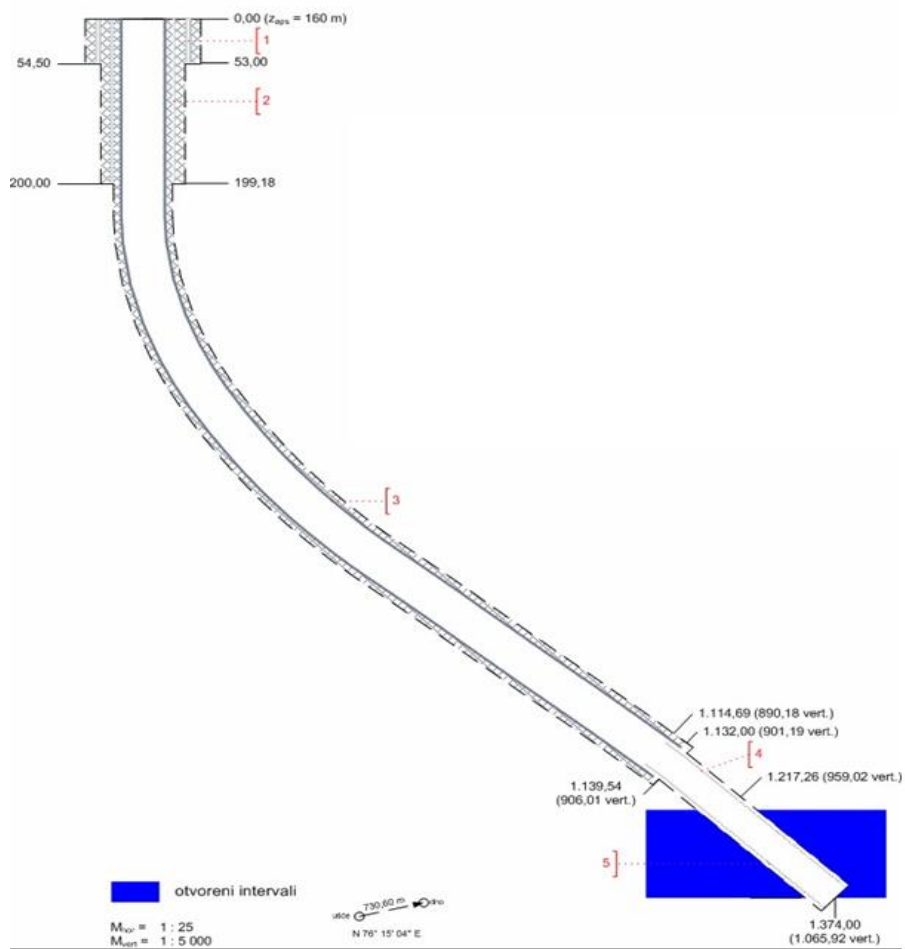


Slika 3-4. Tehnički profil bušotine Mla-3 (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

Naziv pojedinih kolona zaštitnih cijevi na bušotini KBNZ-1B i dubina njihove ugradnje prikazana je u tablici 3-3, a tehnički profil bušotine nalazi se na slici 3-5.

Tablica 3-3 Redosljed ugradnje kolone zaštitnih cijevi na bušotini KBNZ-1B (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

| Pozicija | od (m) | do (m) | d (in) | d (mm) | Naziv kolone |
|----------|---------|---------|--------------------------------|---------|-----------------|
| 1. | 0,00 | 53,00 | 20 | 508,00 | uvodna |
| 2. | 0,00 | 199,18 | 13 ³ / ₈ | 339,725 | tehnička |
| 3. | 0,00 | 1132,00 | 9 ⁵ / ₈ | 244,475 | proizvodna |
| 4. | 1114,69 | 1217,26 | 7 | 177,800 | lajner |
| 5. | 1217,26 | 1374,00 | | | filtar (lajner) |



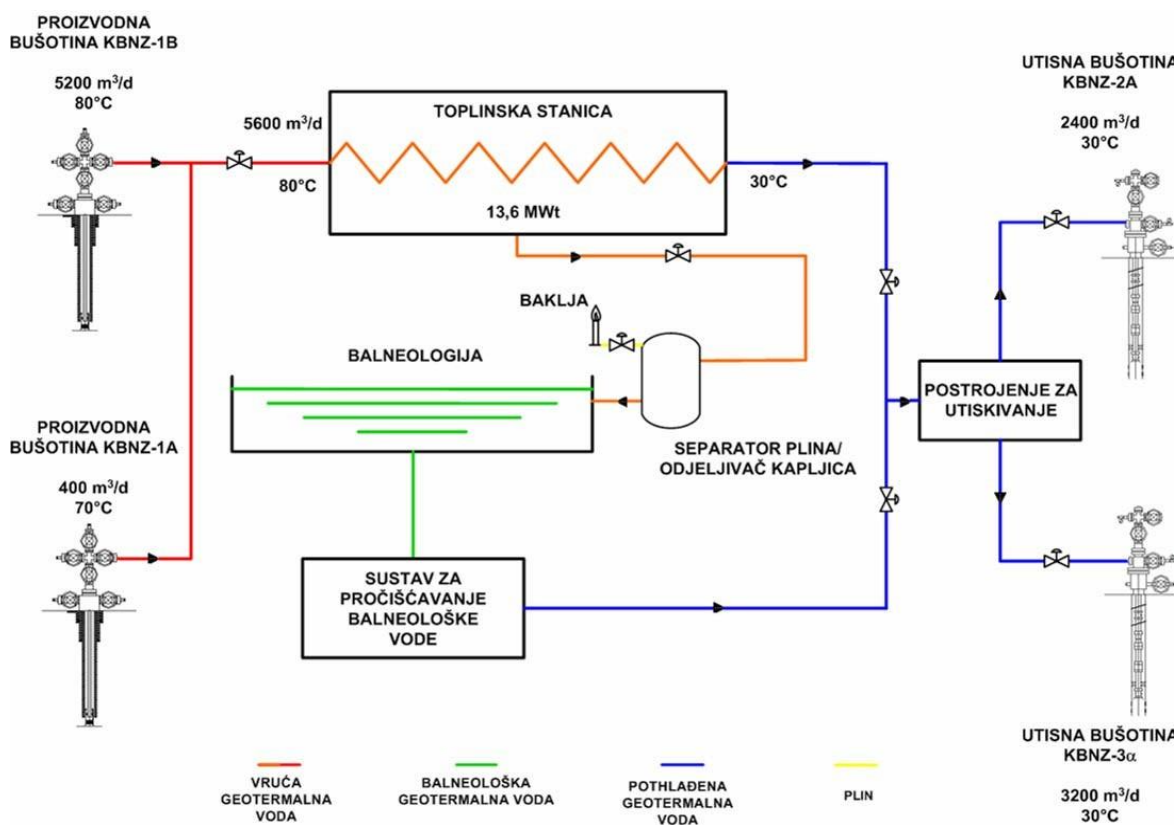
Slika 3-5. Tehnički profil bušotine KBNZ-1B (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

3.4. Tehnološki proces eksploatacije geotermalne vode

Na sve tri lokacije tehnoloških sustava GP-a Zagreb voda protječe od proizvodne do utisne bušotine ili odvodnog kanala (Lučanka-1), a toplina se predaje preko izmjenjivača topline. Kako bi se spriječilo prerano prodiranje hladne fronte do proizvodne bušotine, unutar lokaliteta Mladost primijenjeno je tehnološko rješenje koje se sastoji od povremenog crpljenja vode ljeti iz utisne bušotine Mla-2, iz koje dolazi do prodora hladne fronte. Pri prosječnoj eksploataciji od oko 800 m³/d, temperatura geotermalne vode iznosi 78 °C, što znači da dolazi do toplinskih gubitaka u bušotini koji iznose 2 °C. Pri proizvodnji većoj od 1500 m³/d gubici su zanemarivi pa temperatura vode iznosi 80 °C. U zimskom razdoblju prosječno crpljenje geotermalne vode na ovom tehnološkom sustavu iznosi 9 l/s, dok je u ljetnim mjesecima eksploatacija, naravno, puno manja i iznosi 3 l/s. Ispod bazena Sportskog parka Mladost nalazi se toplinska stanica u koju dolazi geotermalna voda koja se usmjerava u tri linije. Prvu liniju predstavlja izmjenjivač topline snage 2 MW, a na tu liniju otpada oko 33 % ukupnog protoka. Ta se toplina koristi za grijanje doma odbojke, doma stolnog tenisa, svlačionice i restorana. Voda ohlađena na temperaturu 50-56 °C odlazi prema utisnim pumpama. Na drugu liniju otpada oko 17 % od ukupnog pritoka, a predana toplina koristi se za zagrijavanje zraka u prostorijama zimskih bazena. Oduzimanje topline geotermalnoj vodi unutar treće linije (50% pritoka) odvija se pomoću nekoliko izmjenjivača topline spojenih u seriju. Izmjenjivač snage 0,4 MW opskrbljuje toplinom sekundarni krug za radijatore u glavnim i pomoćnim prostorima zimskog bazena. Zatim slijede izmjenjivači snage 0,4 MW i 1,8 MW za grijanje potrošne tople vode, odnosno vode za bazene. Nakon toga termalna voda odlazi na tri paralelna izmjenjivača koji se koriste za pregrijavanje potrošne tople vode, vode za nadopunjavanje bazena i svježeg zraka za ventilaciju. Ohlađena i iskorištena voda može otići direktno na usis utisnih pumpi ili prvo u utisno-mjerne spremnike, ukoliko je prtok manji od kapaciteta utisne pumpe. Kada se spremnici napune, uključuje se utisna pumpa. Međutim, u većem dijelu godine moguć je i tzv. termosifonski način utiskivanja na osnovu razlike u gustoćama proizvedene i utisne kapljevine.

Već je ranije spomenuto kako je unutar tehnološkog sustava „Klinička bolnica Novi Zagreb“ inicijalno proizvodna bušotina KBNZ-1A prenamijenjena u utisnu, a za proizvodnu je određena bušotina KBNZ-1B. Međutim, ukoliko dođe do povećanih energetske potreba, obje

se bušotine mogu koristiti kao proizvodne, dok bi se kao utisne koristile bušotine KBNZ-2A i KBNZ-3 α s količinom utiskivanja od 2400 m³/d, odnosno 3200 m³/d. Također, za vrijeme vršne potrošnje u pogon se može uključiti i centrifugalna pumpa. Temperatura geotermalne vode na izlazu iz bušotine KBNZ-1B iznosi 80 °C, dok je na bušotini KBNZ-1A njena temperatura 70 °C. Na ušću proizvodnih bušotina prilikom miješanja dobije se temperatura od oko 80 °C. Pad temperature iznosi oko 50 °C, što znači da se voda ohladi na oko 30 °C. Instalirana toplinska snaga na lokalitetu Blato u zatvorenom cirkulacijskom krugu iznosila bi do 13,5 MW (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Geotermalno polje Zagreb“, 2014). Dio geotermalne vode koristio bi se i u balneološke svrhe, a na ulazu u takav krug nalazio bi se separator plina te sustav za pročišćavanje balneološke vode, kako je i prikazano na slici 3-6. Nakon što je iskorištena, termalna voda utiskuje se natrag u ležište pomoću cirkulacijskih pumpi za utiskivanje.



Slika 3-6. Tehničko-tehnološka shema SRC Blato (Studija utjecaja na okoliš, Geotermalno polje Zagreb, lokalitet ŠRC Blato, 2006)

4. TEORIJA HIDRODINAMIČKIH MJERENJA

Kako bi se uopće započela analiza hidrodinamičkih ispitivanja bušotina, potrebno je izvesti nekoliko pojednostavljenih pretpostavki vezanih za bušotinu i ležište koje se modelira. Takve pretpostavke odnose se na zakon očuvanja mase, Darcyjev zakon i jednadžbu stanja. Darcyjev zakon izražava činjenicu da je volumetrijska brzina toka po jedinici površine poprečnog presjeka u bilo kojoj točki u homogenom poroznom mediju proporcionalna gradientu potencijala u smjeru toka u toj točki. Matematički se izražava kao:

$$u = -\frac{k \cdot \rho}{\mu} \nabla \Phi \quad (4-1)$$

gdje su:

u - volumetrijska brzina toka po jedinici površine poprečnog presjeka (m/s)

$\nabla \Phi$ - gradient potencijala u smjeru toka (Pa/kg/m³)

μ - viskoznost fluida (Pa·s)

k - propusnost medija (m²)

ρ - gustoća fluida (kg/m³)

Predznak minus u jednadžbi 4-1 označava da se protok pojavljuje u smjeru pada potencijala.

Za radijalni tok, zanemarujući težinu, Darcyjev zakon postaje:

$$u_r = \frac{-k_r}{\mu} \frac{\delta p}{\delta r} \quad (4-2)$$

pri čemu su:

r - radijus bušotine (m)

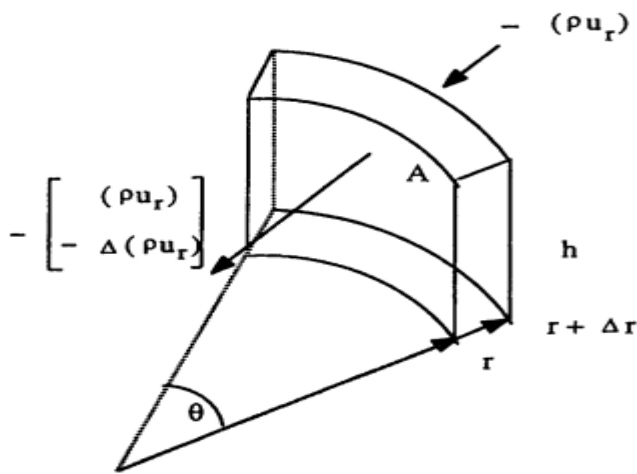
p - tlak (Pa)

Kada se govori o bilo kojem obliku toka (fluida, topline, elektriciteta), jedan od najkorisnijih zakona jest zakon o očuvanju mase. To je iskaz koji govori da je neka fizikalna veličina konzervirana, tj. ne može biti ni stvorena ni uništena. Može se iskazati sljedećim riječima: Iznos masenog utoka minus iznos masenog istoka jednak je ukupnoj promjeni mase. Ukoliko se razmatra element prostora prikazan na slici 4-1, zakon očuvanja mase može se matematički prikazati pomoću jednakosti koja je poznata kao jednačba kontinuiteta:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r \rho u_r) = \frac{-\delta}{\delta r} (\Phi \rho), \quad (4-3)$$

gdje je:

Φ - poroznost (dio cijeloga)



Slika 4-1 Element prostora za derivaciju jednačbe kontinuiteta (Lee et al., 2003)

Unutar ležišta cilindričnog oblika razmatra se radijalni protok fluida. Kombinacijom zakona očuvanja mase i Darcyjevog zakona za izotermalni tok fluida male i konstantne kompresibilnosti, dobiva se parcijalna diferencijalna jednačba koja se može pojednostaviti kao:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\Phi \mu c_t}{k} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4-4)$$

gdje je:

c_t - ukupna kompresibilnost (Pa⁻¹)

Ukoliko pretpostavimo da je ukupna kompresibilnost c_t mala i neovisna o tlaku, propusnost k konstantna i izotropna, viskoznost μ neovisna o tlaku, poroznost Φ konstantna i da su određeni članovi jednadžbe (uključujući kvadrate tlačnih gradijenata) zanemarivi. Takva jednadžba naziva se jednadžbom difuzije, a član $k/\Phi\mu c_t$ naziva se hidraulički difuzivitet (η). Za razvoj takve jednadžbe bilo je, kao što je već rečeno, potrebno uvesti određene pretpostavke: porozni medij je homogen i izotropan, jedinstvene debljine, svojstva stijene i fluida neovisna su o tlaku, tlačni gradijenti su mali, tok je radijalan, primjenjiv je Darcyjev zakon, a gravitacijske sile su zanemarive. Za jedinstveno rješenje ove jednadžbe moraju se specificirati unutarnji i vanjski granični uvjeti i jedan početni uvjet.

Kao unutarnji granični uvjet vrijedi da je protok na unutarnjoj granici ležišta konstantan i iznosi:

$$\left. \frac{\delta p}{\delta r} \right|_{r=r_w} = \frac{-q_s B \mu}{2\pi k h} \quad (4-5)$$

pri čemu su:

r_w - radijus bušotine (m)

q_s - protok fluida na površini (m³/s)

B - volumni faktor (m³/m³)

h - debljina ležišta (m)

Prije početka proizvodnje, ležište je pri početnom tlaku p_i .

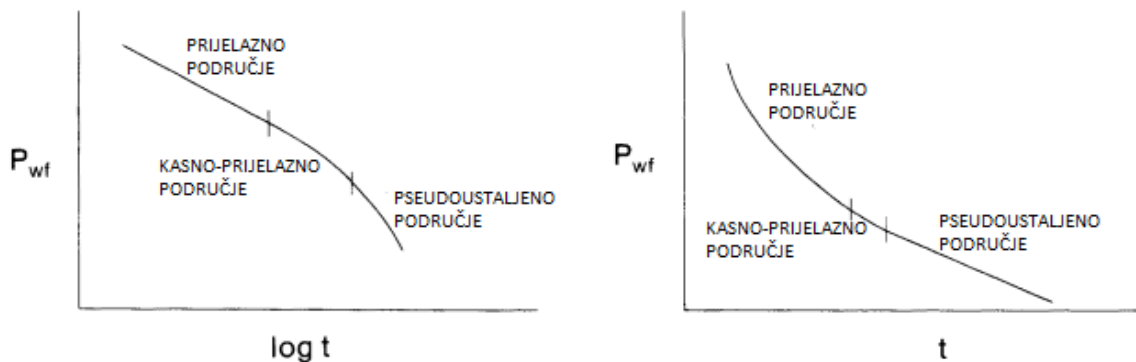
Što se tiče vanjskih graničnih uvjeta, javljaju se tri specifična slučaja:

(1) Neograničeno ležište- slučaj u kojem je bušotina smještena unutar poroznog medija neograničenog radijalnog proširenja ($p \rightarrow p_i$ kada $r \rightarrow \infty$);

(2) Ograničeno cilindrično ležište- bušotina, bušotinskog radijusa r_w , smještena je u centru cilindričnog radijusa r_e te nema toka izvan te vanjske granice ($\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r_w} = 0$);

(3) Konstantan tlak na vanjskoj granici ležišta ($p \rightarrow p_i$ kada $r \rightarrow r_e$)

U ovisnosti o trajanju protoka i uvjetima na vanjskoj granici ležišta razlikuju se tri osnovna stanja protjecanja. Na slici 4-2. prikazana je ovisnost dinamičkog tlaka na dnu bušotine o vremenu. U prijelaznom području, ležište se ponaša kao neograničeno, pri čemu je p_{wf} linearna funkcija logaritma vremena. U tom periodu mogu se provesti razni hidrodinamički testovi, poput testa pri stalnom obroku crpljenja, testa s dva obroka crpljenja, testa uz porast ili smanjenje tlaka, testa interferencije i puls testa. U pseudoustaljenom području postoji linearna ovisnost dinamičkog tlaka i vremena. Testovi karakteristični za ovaj period su test protokom, izokronalni i modificirani izokronalni test te reservoir limit test. U vremenu između kraja prijelaznog područja i početka pseudoustaljenog područja, postoji tzv. kasno-prijelazno područje. U tom razdoblju nemoguće je predvidjeti vezu između tlaka na dnu bušotine i vremena. Spomenuto stanje traje iznimno kratko ili se uzima kao nepostojeće zbog praktičnih razloga te vrijedi za bušotine centrirane unutar drenažne površine. S druge strane, za bušotine pomaknute izvan središta drenažne površine, kasno-prijelazno područje može obuhvatiti značajan vremenski period.



Slika 4-2. Režimi protjecanja na semilogaritamskoj i linearnoj skali (Lee, 1982)

U sljedećim poglavljima bit će prikazana teorijska osnova hidrodinamičkih testova koji su provedeni na GP-u Zagreb.

4.1. Test porasta tlaka

Test porasta tlaka (*engl. pressure buildup test*) najčešći je način ispitivanja bušotine pri neustaljenom stanju protjecanja. Provodi se tako da se bušotina zatvori, nakon što je prethodno proizvodila konstantnim protokom. Dozvoljava se porast tlaka u bušotini te se isti mjeri u funkciji vremena. Iz tih podataka moguće je odrediti propusnost formacije, trenutnu površinu dreniranja ležišta, okarakterizirati moguće oštećenje ili povećanu propusnost, heterogenost ležišta ili njegove granice. Ukoliko se radi o idealnom testu porasta tlaka, misli se na neograničeno, homogeno i izotropno ležište koje sadrži slabo stlačivi jednofazni fluid konstantnih svojstava. Prije svega, pretpostavlja se da bušotina proizvodi iz ležišta koje se ponaša kao beskonačno (granice ležišta ne osjećaju se ni tokom cijelog vremena proizvodnje, ni kasnije nakon zatvaranja bušotine), formacija i fluidi u njoj imaju uniformna svojstva (pojavljuje se E_i fukcija), a Hornerova aproksimacija pseudoproizvodnog vremena je primjenjiva. Ako je bušotina proizvodila tokom vremena t_p (pseudoproizvodno vrijeme) konstantnim protokom q prije zatvaranja bušotine, a vrijeme nakon zatvaranja bušotine označi se s Δt , promjena tlaka nakon zatvaranja bušotine može se opisati sljedećom jednažbom:

$$p_{ws} = p_i - 2149 \frac{qB\mu}{kh} \cdot \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (4-6)$$

gdje su:

p_{ws} - statički tlak na dnu bušotine (Pa)

p_i - početni tlak u ležištu (Pa)

q - protok (m^3/s)

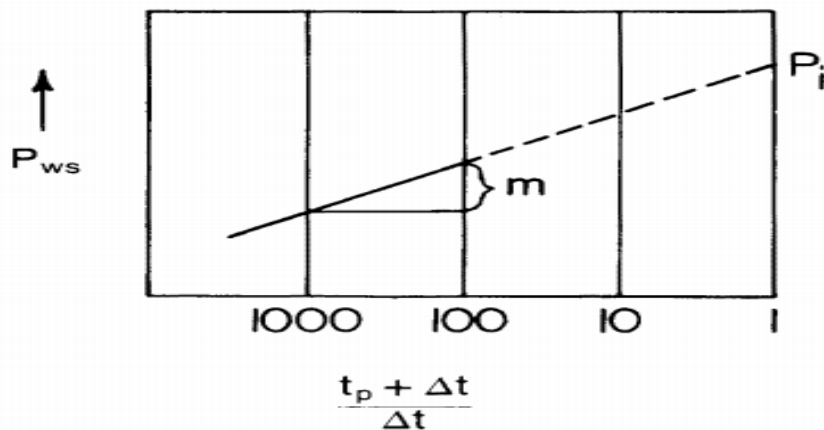
t_p - pseudoproizvodno vrijeme (s)

Δt - vrijeme nakon zatvaranja bušotine (s)

Jednadžba 4-6 pokazuje da je tlak zatvaranja, p_{ws} , linearna funkcija $\log((t_p + \Delta t) / \Delta t)$. Nagib tog pravca m izražava se kao:

$$m = 2149 \frac{qB\mu}{k \cdot h} \quad (4-7)$$

Dakle, propusnost k može se odrediti iz testa porasta tlaka mjerenjem nagiba m . Nadalje ako se pravac ekstrapolira do beskonačnog vremena zatvaranja $\log((t_p + \Delta t) / \Delta t = 1)$, može se dobiti početni ležišni tlak p_i (slika 4-3)



Slika 4-3. Grafičko određivanje početnog tlaka pri testu porasta tlaka (Lee, 1982)

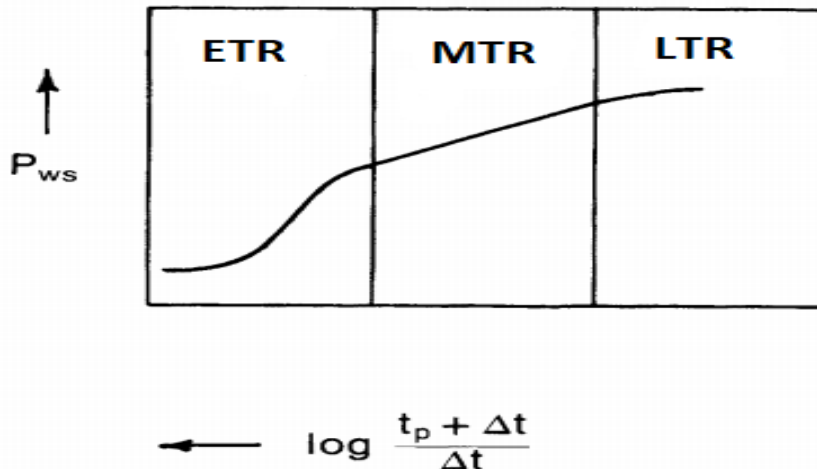
Također, može se odrediti i skin faktor, a za njegovo određivanje koristi se Δt od jednog sata, odnosno p_{1hr} :

$$s = 1,151 \left[\left(\frac{p_{1hr} - p_{wf}}{m} \right) - \log \left(\frac{k}{\Phi \mu c_t r_w^2} \right) + 5,10 \right] \quad (4-8)$$

pri čemu je:

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine (Pa)

Stvarni test porasta tlaka od idealnog u grafičkom prikazu razlikuje krivulja koja se pojavljuje umjesto ravne linije na semilogaritamskom dijagramu. Bazirajući se na koncept radijusa istraživanja, krivulja porasta tlaka može se podijeliti na tri dijela (slika 4-4.)



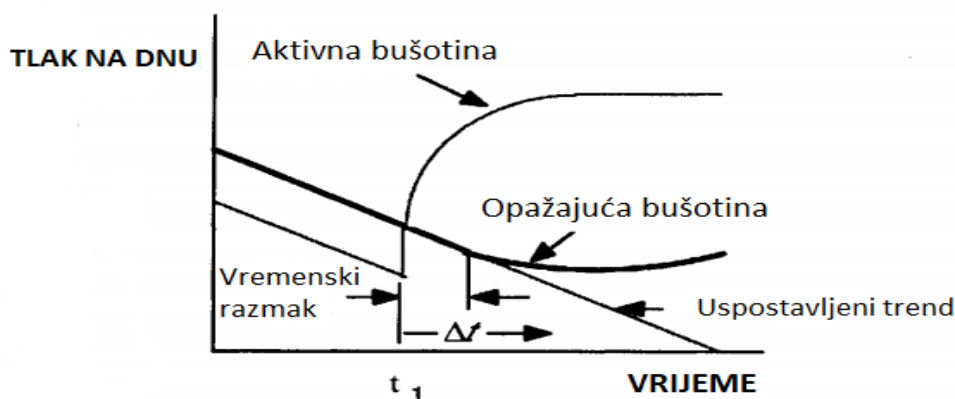
Slika 4-4. Stvarni test porasta tlaka prikazan Hornerovim dijagramom (Lee, 1982)

Prvi je ETR (engl. *Early-Time Region*) period tijekom kojeg se poremećaj tlaka širi kroz formaciju blizu same bušotine. U tom razdoblju vidljiv je utjecaj naknadnog dotoka iz ležišta koji iskrivljuje liniju porasta tlaka, budući da u trenutku zatvaranja bušotine protok nije odmah jednak nuli, već se nastavlja smanjenim intenzitetom dok ne dosegne spomenutu vrijednost. MTR (engl. *Middle-Time Region*) period nastupa onda kada se radijus ispitivanja proširi unutar cijele formacije, iza utjecaja izmijenjene zone. U tom je periodu vidljiva ravna linija na Hornerovom dijagramu čiji je nagib povezan s propusnosti formacije. Takav trend nastavlja se sve dok radijus ispitivanja ne dosegne granice ležišta, kada se javlja LTR (engl. *Late-Time Region*) period.

4.2. Test interferencije

Glavna namjera testa interferencije odnosi se na određivanje hidrodinamičke povezanosti između bušotina unutar istog ležišta, kao i procjenu propusnosti k te umnožak poroznosti i kompresibilnosti Φc_i u blizini testirane bušotine. Takav test uključuje stvaranje poremećaja u tlaku u najmanje jednoj bušotini (proizvodnoj ili utisnoj), koja se zove aktivna bušotina, te praćenje promjene tlaka u drugoj bušotini koja se, pak, zove opažajuća bušotina. Na slici 4-5 prikazano je kako u vremenu $t=1$ počinje utiskivanje u aktivnu bušotinu. Promjena tlaka na

opažajućoj bušotini na udaljenosti r počinje se osjećati nakon određenog vremena povezanog s vremenom potrebnim da radijus ispitivanja dosegne razmak između bušotina.



Slika 4-5. Smanjenje tlaka na aktivnoj i opažajućoj bušotini prilikom testa interferencije (Spivey-Rollins-Lee, 2003)

Veličina i vrijeme promjene tlaka na opažajućoj bušotini ovisi o svojstvima ležišne stijene i fluida u blizini aktivne i opažajuće bušotine. U homogenom, izotropnom ležištu koje se ponaša kao neograničeno, rješenje eksponencijalnog integrala (E_i funkcije) linijskog modela opisuje ponašanje tlaka na opažajućoj bušotini na sljedeći način :

$$p_i - p_r = -9,33 \cdot 10^2 \cdot E_i \left(\frac{-7,036 \cdot 10^4 \Phi \mu c_t r^2}{kt} \right) \quad (4-9)$$

gdje je:

p_r - tlak na opažajućoj bušotini lociranoj na udaljenosti r od aktivne bušotine (Pa)

4.3. Reservoir limit test

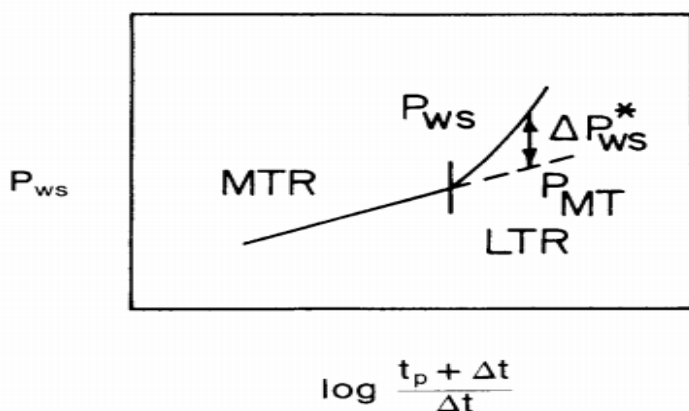
Reservoir limit test služi za određivanje veličine ležišta i udaljenosti od njegove granice. Bliska barijera uzrokuje dvostruki porast nagiba pravca m u odnosu na krivulju dobivenu testom porasta tlaka:

$$p_{ws} = p_i - 4298 \frac{qB\mu}{kh} \log \left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (4-10)$$

Dakle, u odnosu na jednadžbu vezanu za test porasta tlaka u kojoj je konstanta iznosila 2159, a u Reservoir limit testu ona je dvostruko veća i iznosi 4298. Hornerova metoda interpretacije Reservoir limit testa može se podijeliti u pet točaka:

- 1) ucrtava se dijagram p_{ws} vs $\log (t_p + \Delta t) / \Delta t$
- 2) odredi se MTR period
- 3) ekstrapolira se MTR period u LTR period pravcem p_{MT} (slika 4-6)
- 4) izračuna se razlika Δp^*_{ws} između krivulje porasta tlaka i ekstrapoliranog MTR-a za nekoliko točaka ($\Delta p^*_{ws} = p_{ws} - p_{MT}$)
- 5) odredi se udaljenost bušotine od granice ležišta L na osnovu jednadžbe:

$$L = \sqrt{\frac{1,944 \cdot 10^{-6} k \Delta t}{\Phi \mu c_t}} \quad (\text{m})$$



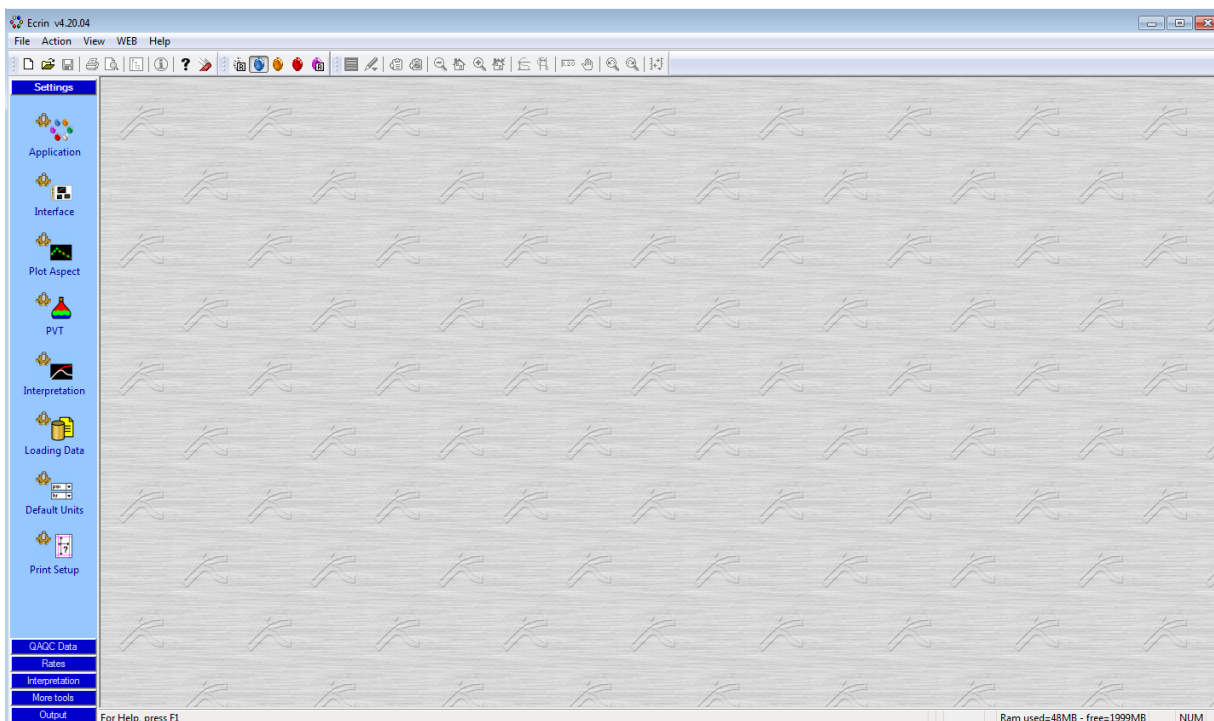
Slika 4-6. Ekstrapolacija pravca iz MTR period u LTR period radi utvrđivanja granice ležišta (Lee, 1982)

4.4. Programski paket Ecrin-Saphir

Sredinom 1980-ih došlo je do velikog razvoja računalnih softwera u području hidrodinamičkih ispitivanja. Danas na tržištu postoji veliki broj takvih komercijalnih softwera. Pars Welltest Analyser (PWA) opsežan je softwareski paket za analizu i simulacijsko usuglašavanje podataka o ispitivanju bušotine u neustaljenom režimu protjecanja. Primijenjene analitičke i numeričke metode u ovom programskom paketu pomažu u interpretaciji karakteristika ležišnog protjecanja te u procjeni buduće proizvodnje bazirane na analizi hidrodinamičkih testova. Glavne karakteristike ovog paketa uključuju: brzi i lagani ulaz u bazu podataka, opsežne korelacijske pakete svojstava stijena i fluida, skup alata za dijagnostičko analiziranje, analizu osjetljivosti, test projektiranja, istovremeni pogled na višestruke analize, mogućnost unosa i rukovanja podacima i brze i precizne rezultate koristeći snažan optimizacijski modul. Nadalje, bitno je spomenuti i program Paradigm Interpret koji se koristi za projektiranje i analizu tlaka pri neustaljenom stanju protjecanja. Pritom se potrebni podaci mogu dobiti iz same proizvodnje, tokom iskušavanja bušotine, ispitivanja sloja alatkom spušenom na žici ili testiranjem tokom bušenja. Zatim, PIE program koji se koristi za interpretaciju testova u neustaljenom stanju protjecanja za naftne i plinske bušotine koji ima mogućnost grafičke obrade podataka kako bi se smanjio ogroman skup vrijednosti tlaka na prikladnu i praktičnu veličinu.

Svakako jedan od najpoznatijih programskih paketa vezanih za analizu i obradu podataka dobivenih iz hidrodinamičkih testova jest Ecrin. Spomenuti modul zapravo objedinjuje nekoliko različitih softvera, a to su Saphir, Topaze i Diamant. Saphir se koristi za analizu testa porasta tlaka i broji više od tri tisuće aktivnih instalacija. U program se može unijeti beskonačan broj veličina, brzina, tlakova i ostalih podataka u gotovo bilo kojem formatu uključujući ASCII i Excel. Saphir se sastoji od šest glavnih okvira koji se nalaze na lijevoj strani sučelja. Kontrolni panel „Settings“ sastoji se od osam ikona. Ikona *Application* omogućuje automatsko pohranjivanje podataka, odabir jezika, modula te definiranje licenci. Sučelje (engl. *Interface*) se koristi za prilagodbu aplikacije u ovisnosti o preferencijama korisnika. Osim toga, moguće je kontrolirati izgled svih grafova uključujući stvorene modele. Pomoću „PVT“ opcije moguće je definirati aktivne PVT korelacije za naftu, plin i vodu pomoću prethodno definirane liste, kao i postaviti standardne uvjete. Ikona za interpretaciju

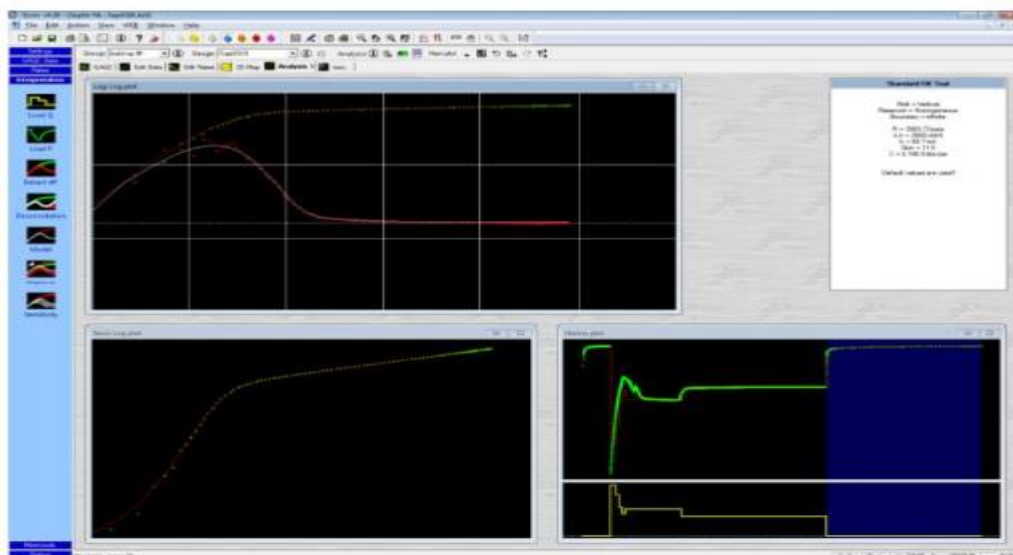
omogućuje prilagodbu različitih svojstava aplikacije. Ostatak čine ikona za odabir načina učitavanja podataka, ikona za postavljanje mjernih jedinica i ispis dokumenata. Glavno sučelje programa Saphir prikazano je na slici 4-7.



Slika 4-7. Glavno sučelje programa Saphir

Nadalje, „QAQC“ (engl. *Quality Assurance and Quality Control*) kontrolni panel uključuje sav sadržaj povezan s prikupljanjem podataka i kontrolu kvalitete. U ovom modulu moguće je učitavanje podataka iz različitih izvora, kao što je prethodno spomenuto, računanje razlike svih veličina unutar svakog pojedinog grafa, prikaz linearne derivacije tih veličina, analiza gradijenata itd. Okvir za interpretaciju spada svakako među najvažnije okvire u samom programu budući da sadrži glavni kontrolni panel s ključnim opcijama. Unutar tog okvira učitavaju se podaci o povijesti proizvodnje za testiranu bušotinu, kao i tlakovi. Postoji i opcija izvođenja derivacije za određene grupe veličina. Nadalje, dekonvolucija nastoji povećati područje istraživanja promatrano u relativno kratkom periodu povećanja tlaka pretvarajući cijelu povijest kretanja tlaka u ekvivalentno smanjenje pri konstantnoj proizvodnji.

Dijagnostički alati sastoje se od alata za log-log analizu, p-logt i ostalih specijaliziranih grafova (Slika 4-8.).



Slika 4-8. Dijagnostički alati u programu Saphir (Ecrin v4.30 Tutorial, 2011)

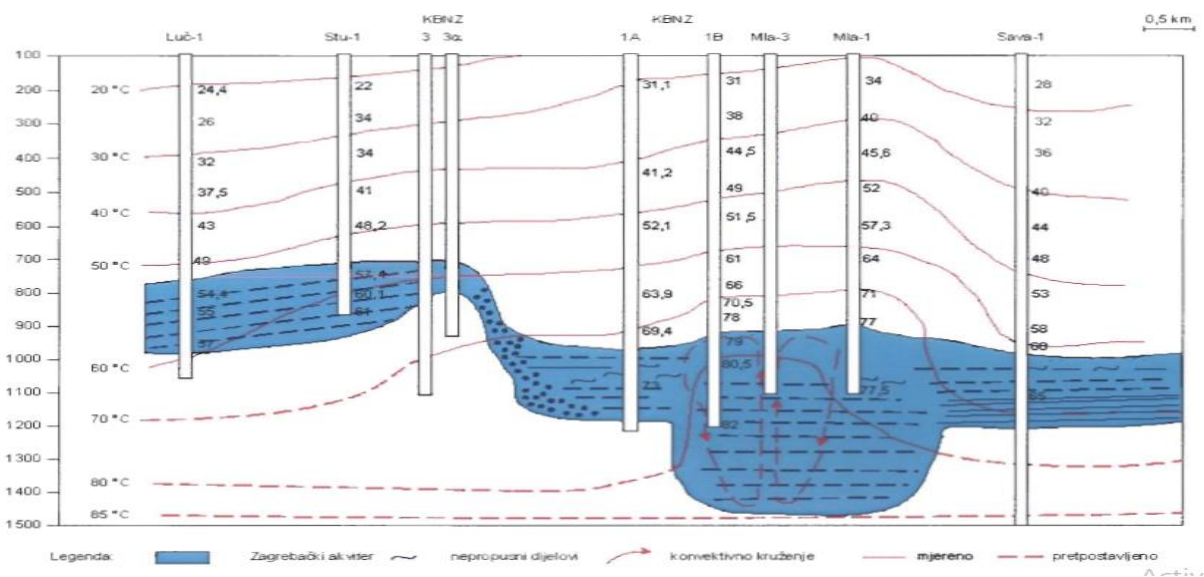
Saphir nudi opsežan analitički katalog koji kombinira modele bušotina, ležišta i njihovih granica, dopunjene vanjskim modelima. Različite bušotine, ležišta i granice mogu se kombinirati simulirajući širok raspon različitih ležišnih modela. Dodatne mogućnosti u ovoj opciji uključuju skin ovisan o brzini protoka (engl. *rate dependent skin*), promjenu bušotinskog uskladištenja, interferenciju s ostalim bušotinama, korekciju materijalnog balansa za plin, mijenjanje bušotinskog modela u vremenu te horizontalnu i vertikalnu izotropiju. U Saphiru je moguće modelirati vertikalne, horizontalne i kose bušotine, bušotine ograničenog ulaza te frakturirane i kompleksne bušotine. S druge strane, ležišta mogu biti homogena, dvostruke poroznosti, dvoslojna i kompozitna. S druge strane, numerički modeli koriste se za geometriju koja je izvan dosega analitičkih modela. Takvi modeli pretežno su 2D, uz mogućnost prerade u 3D model.

Uz test porasta tlaka, u programu Saphir NL moguće je provesti i ispitivanje bušotine metodom više protoka, test za višeslojna ležišta, test pomoću mini-fracova te test interferencije. Topaze u potpunosti je kompatibilan s programom Saphir te uz pomoć širokog spektra analitičkih modela i numeričkih mogućnosti omogućava pouzdano podudaranje povijesti proizvodnje, kao i predviđanje buduće proizvodnje.

5. HIDRODINAMIČKE KARAKTERISTIKE GEOTERMALNOG POLJA ZAGREB

5.1. Fizikalna svojstva ležišnih stijena i fluida

Prosječni geotermalni gradijent u području Savske potoline iznosi $0,048 \text{ }^\circ\text{C/m}$, a u središnjem dijelu GP-a Zagreb zna dosegnuti vrijednost i od $0,0781 \text{ }^\circ\text{C/m}$. Uzrok takvog povećanog gradijenta leži u visokoj vertikalnoj propusnosti zbog čega se toplina znatno brže prenosi spontanom konvekcijom nego što je to slučaj u ležištima slabe vertikalne propusnosti i konduktivnog načina prijenosa toplinske energije. Početni ležišni tlak i temperatura izmjereni su na temelju mjerenja u bušotini Mla-1 1981.godine, a kao referentna dubina uzeta je srednja dubina raskrivenog dijela ležišta u istoj bušotini koja iznosi 979 m. Na toj dubini početni tlak je iznosio 104 bar, a početna ležišna temperatura $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Međutim, na bušotinama KBNZ-1B i Mla-3 opaženo je povećanje temperature na preko $80 \text{ }^\circ\text{C}$, zbog spomenute povećane vertikalne propusnosti, pa je usvojena srednja vrijednost temperature od $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Grafički prikaz prijenosa topline prikazan je na slici 5-1.



Slika 5-1. Grafički prikaz prijenosa topline u ležištu Geotermalnog polja Zagreb (Elaborat o rezervama eksploatacijskog polja „Geotermalno polje Zagreb“, 2008)

Podaci o kolektorskim karakteristikama unutar GP-a Zagreb izrazito su malobrojni, i to prvenstveno zbog slabe raskrivenosti ležišta. Međutim, kod kolektora s primarnom i sekundarnom poroznošću hidrodinamička mjerenja omogućila su kvalitetnu interpretaciju fizikalnih osobina koje su dobivene karotažnim mjerenjima. Fizikalna svojstva stijena za savsku depresiju prikazana su u tablici 5-1, dok su u tablici 5-2 prikazane karakteristike ležišnih fluida na lokalitetu Mladost.

Tablica 5-1. Fizikalna svojstva stijena savske depresije (Elaborat o rezervama eksploatacijskog polja „Geotermalno polje Zagreb“, 2008)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Srednja šupljikavost ležišnih stijena | Litoamnijski vapnenci I: $\Phi_1 = 0,0613$ |
| | Litoamnijski vapnenci II: $\Phi_2 = 0,145$ |
| | Dolomiti: $\Phi_3 = 0,0819$ |
| Gustoća ležišne stijene | $\rho_s = 2330 \text{ kg/m}^3$ |
| Specifična toplina stijena | $C_m = 1088,18 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| Obujamska specifična toplina stijena | $(C\rho_s)_m = 2,535 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ |
| Obujamska specifična toplina ležišta | $(C\rho)_L = 2,6808 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ |
| Toplinska vodljivost stijena | $\lambda = 1,595 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ |

Tablica 5-2. Fizikalno-kemijska i termodinamička svojstva geotermalne vode na lokalitetu Mladost (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

| | |
|---|--|
| Obujamski koeficijent vode u ležišnim uvjetima | $B_{wi} = 1,029$ |
| Obujamski koeficijent vode u standardnim uvjetima na ušću proizvodne bušotine | $B_{wu} = 1,0305$ |
| Gustoća vode pri ležišnim uvjetima | $\rho_{wL} = 973,56 \text{ kg/m}^3$ |
| Gustoća vode pri standardnim uvjetima na ušću proizvodne bušotine | $\rho_{wu} = 972,15 \text{ kg/m}^3$ |
| Specifična toplina vode kod ležišnih uvjeta | $C_{wL} = 4,164 \text{ kJ/kgK}$ |
| Specifična toplina vode kod uvjeta ušća | $C_{wu} = 4,199 \text{ kJ/kgK}$ |
| Obujamska specifična toplina vode za ležišne uvjete | $(Cp)_{wL} = 4,0539 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ |
| Obujamska specifična toplina vode za uvjete ušća | $(Cp)_{wu} = 4,0820 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ |
| Viskoznost vode u ležišnim i proizvodnim uvjetima | $\mu_w = 0,00038 \text{ Pas}$ |
| Viskoznost vode pri srednjim uvjetima tlaka i temperature u utisnoj bušotini | $\mu_w = 0,00055 \text{ Pas}$ |
| Ukupna stlačivost vode i ležišne stijene | $c_T = 12 \times 10^{-10} \text{ bar}^{-1}$ |

5.2. Propusnost i hidrodinamička svojstva ležišta

Zbog složene geološke građe ležišta izvršen je veliki broj hidrodinamičkih mjerenja s ciljem određivanja hidrodinamičke povezanosti ležišta. Nakon prvog mjerenja statičkog tlaka na bušotini Mla-1, na ostalim bušotinama registrirani su manji gradijenti ležišnog tlaka, i to manji što je bušotina kasnije izgrađena. To je potvrda dobre hidrodinamičke veze između bušotina u polju. Debljina ležišta (h) dobivena je testom interferencije, a tako dobivena debljina manja je od ukupnih debljina jer pojedini slabo propusni dijelovi neadekvatno reagiraju na promjene tlaka. U tablici 5-3 prikazani su rezultati analize hidrodinamičkih mjerenja, kao i veličine protočnih debljina (h_p).

Tablica 5-3. Svojstva ležišta (Glavni rudarski projekt Geotermalnog polja Zagreb, 1995)

| Područje | kh/μ (m^3/Pas) | kh (m^3) | h (m) | k (m^2) | h_p (m) |
|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------|
| Mla-1, Mla-3 | 2×10^{-7} | $8,01 \times 10^{-11}$ | 90 | $8,9 \times 10^{-13}$ | 70-37 |
| Mla-2, Mla-3 | 5×10^{-7} | 2×10^{-10} | 42 | $4,76 \times 10^{-12}$ | 4-37 |
| Mla-3, KBNZ-1B | $1,38 \times 10^{-6}$ | $5,5 \times 10^{-10}$ | 118 | $4,66 \times 10^{-12}$ | 37-36 |
| KBNZ-1B, Mla-2 | 10^{-6} | 4×10^{-10} | 47 | $8,51 \times 10^{-12}$ | 36-4 |
| KBNZ-1A, KBNZ-1B | $1,25 \times 10^{-8}$ | $5,04 \times 10^{-12}$ | 18 | $2,8 \times 10^{-13}$ | 16-36 |
| KBNZ-3 α , KBNZ-1B | 7×10^{-9} | $8,39 \times 10^{-11}$ | 36 | $2,33 \times 10^{-12}$ | 36 |
| KBNZ-2A, Mla-2 | $1,25 \times 10^{-9}$ | $5,1 \times 10^{-13}$ | 30 | $1,7 \times 10^{-14}$ | 56-4 |

Na osnovu testova porasta tlaka i interferencije koji su provedeni na eksploatacijskom polju Zagreb, može se zaključiti da ležište posjeduje veliku protočnu sposobnost, i to naročito u središnjem dijelu (Mla-3, KBNZ-1B), izrazitu heterogenost u vertikalnom i arealnom smjeru, indicira barijere (uglavnom u jednom smjeru) te ima vrlo dobru hidrodinamičku povezanost među bušotinama, osim u slučaju bušotine KBNZ-2A.

Takvim hidrodinamičkim mjerenjima, ali i proizvodnim ispitivanjima dobiveni su podaci korišteni za proračun indeksa injektivnosti koji odgovara indeksu proizvodnosti. Indeks proizvodnosti pojedinih bušotina prikazan je u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Prikaz rezultata hidrodinamičkih mjerenja i proizvodnih ispitivanja (Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Geotermalno polje Zagreb, 2014)

| Bušotina | Indeks proizvodnosti/injektivnosti m ³ /s/Pa |
|------------------|---|
| Mla-2 (utisna) | 1226,85 |
| Mla-3 | 1412,04 |
| KBNZ-1A (utisna) | 115,74 |
| KBNZ-1B | 1504,63 |
| KBNZ-2A | 636,57 |
| KBNZ-3α | 104,17 |

Tako dobivene količine, prikazane u tablici, veće su od planiranih. Osim toga, hidrodinamičkim ispitivanjima utvrđena je i utisno-drenažna površina ležišta za lokalitet Mladost koja iznosi 800 000 m² te za lokalitet Blato vrijednosti 1 800 000 m². Nadalje, kako bi se održala što duža proizvodnja vode uz konstantnu temperaturu na ušću, određeno je da proizvodnja geotermalne vode na spomenutim lokalitetima ne prelazi vrijednost 77,1 l/s. Općenito, količina geotermalne vode koja se može proizvesti pri konstantnoj temperaturi računa se prema formuli:

$$\tau_{CT} = \frac{Ah_p(C\rho)_L}{\Delta W_p(C\rho)_w} \text{ (god)} \quad (5-1)$$

gdje su:

A- utisno-drenažna površina ležišta (m²)

h_p - protočna debljina ležišta (m)

$(C\rho)_L$ - obujamska specifična toplota ležišta (J/m³K)

$(C\rho)_w$ - objamska specifična toplina vode (J/m^3K)

ΔW_p - godišnja količina proizvedene geotermalne vode (m^3/god)

Budući da je: $W_{pcT} = \Delta W_p \cdot \tau_{cT}$, ukupna količina geotermalne vode pri stalnoj temperaturi bit će:

$$W_{pcT} = \frac{Ah_p(C\rho)_L}{(C\rho)_w} \quad (m^3) \quad (5-2)$$

Za tehnološki sustav Mladost:

$$W_{pcT} = \frac{800\,000 \cdot 37 \cdot 2,6808 \cdot 10^6}{4,0539 \cdot 10^6} = 19\,574\,158 \text{ m}^3$$

Za tehnološki sustav KBNZ:

$$W_{pcT} = \frac{1\,800\,000 \cdot 36 \cdot 2,6808 \cdot 10^6}{4,0539 \cdot 10^6} = 42\,851\,536 \text{ m}^3$$

Tempo proizvodnje određuje vremensko razdoblje unutar kojeg će temperatura vode biti konstantna. Proračun je napravljen za slučaj da polje radi 330 dana u godini uzevši maksimalnu godišnju eksploataciju koja za Mladost iznosi $342\,144 \text{ m}^3/god$, dok je za KBNZ ona $1\,857\,273 \text{ m}^3/god$. Vrijeme konstantne temperature na ušću računa se prema jednostavnoj formuli:

$$\tau_{const} = \frac{W_{pcT}}{\Delta W_p} \quad (5-3)$$

Za tehnološki sustav Mladost:

$$\tau_{const} = \frac{19\,574\,158}{342\,144} = 57,2 \text{ god}$$

Za tehnološki sustav KBNZ:

$$\tau_{const} = \frac{42\,851\,536}{1\,857\,273} = 23,1 \text{ god}$$

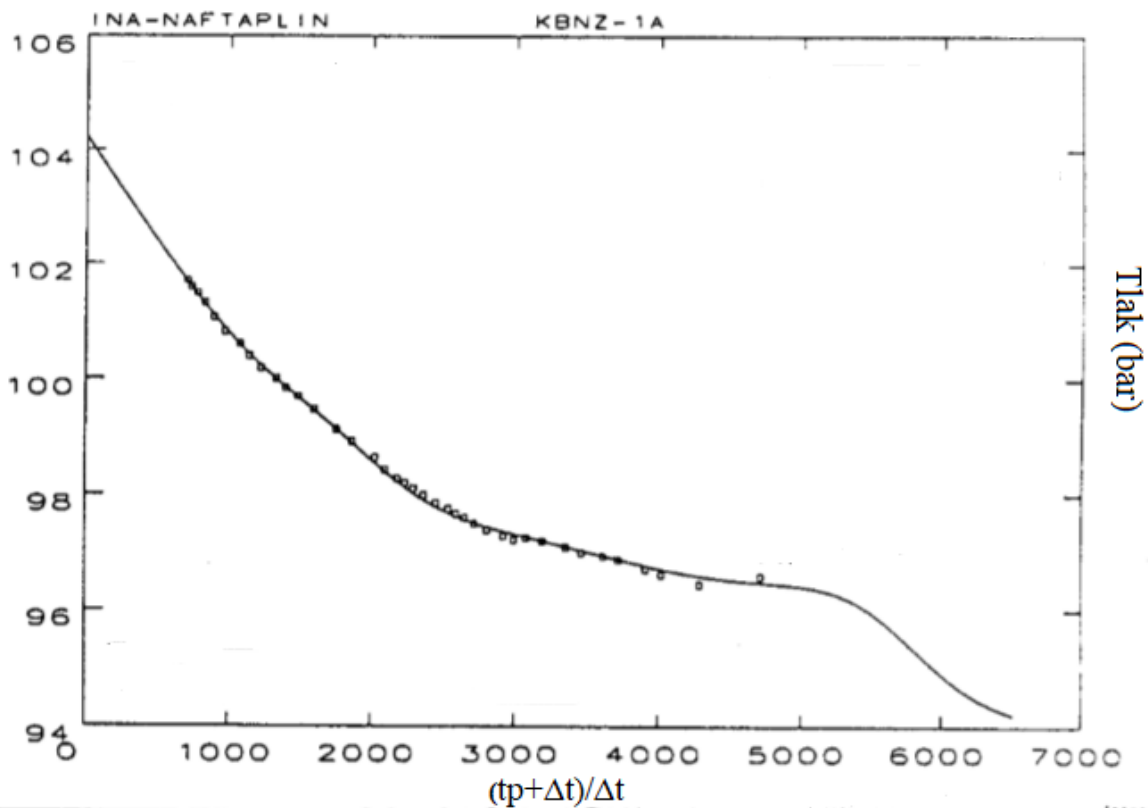
5.3. Analiza mjerenja porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A

U daljnjem tekstu obrađeni su testovi porasta tlaka na lokalitetu SRC Blato, s naglaskom na utisnu bušotinu KBNZ-1A. Na spomenutoj bušotini prvo se pristupilo mjerenju statičkog gradijenta tlaka i temperature dubinskim manometrom, a mjerenja su vršena na dubini od 1120 m. Iz gradijenta tlaka dobiven je statički tlak od 115,99 bar koji se može smatrati i slojnim tlakom, budući da je bušotina dugo vremena bila zatvorena. Ubrzo je ista otvorena za proizvodnju radi mjerenja dinamičkog gradijenta tlaka pri čemu je prosječna proizvodnja iznosila 1100 m³/dan u trajanju od 26 sati. Nakon toga, bušotina je zatvorena za mjerenje porasta tlaka. Zatim se pristupilo testu „protok za protokom“ pri čemu je mjeren indeks proizvodnosti koji je izveden na pet uvjeta u trajanju od 128 sati. Uslijedio je i drugi test porasta tlaka koji je trajao 35 h, a koji će biti detaljnije opisan u nastavku rada. Konačno, po završetku potonjeg testa, izmjeren je profil produktivnosti bušotine i temperature karotaže.

Analiza rezultata testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A provedena je programom Interpret/2 i opisana u stručnoj dokumentaciji Službe za razradu. Radi se o modelu naknadnog dotoka i skin efekta u ležištu dvojne šupljikavosti s ograničenim protokom između dva tipa poroziteta. Srednji ležišni tlak na dubini mjerenja od 979 m iznosio je 104,025 bar. Izračunati parametri su propusnost za vodu (k), propusna sposobnost (kh), skladištivost u bušotini (C), koeficijent oštećenja u bušotini, tj. skin efekt (s) te koeficijenti λ i ω . Koeficijent λ označava parametar međušupljikavog protjecanja koji predstavlja omjer propusnosti matriksa i fraktura. S druge strane, koeficijent ω unutar dvojne poroznosti predstavlja odnos pohranjivosti, tj. udio volumena pukotina u ukupnom poroznom volumenu. Usporedbe radi, u odnosu na prvi test porasta tlaka, vrijednosti spomenutih parametara ostale su gotovo iste. Rezultati analize testa porasta tlaka prikazani su u tablici 5-5, dok se na slici 5-2 nalazi Hornerov prikaz testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A.

Tablica 5-5. Rezultati analize drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A

| Parametar | Rezultati |
|--|---|
| Skin efekt- s | - 6,2 |
| Propusnost za vodu- k | $1,833 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ |
| Propusna sposobnost- kh | $1,833 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ |
| Skladištivost u bušotini- C | $1,29 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa}$ |
| Parametar međušupljikavog protjecanja- λ | $5,97 \times 10^{-5}$ |
| Odnos pohranjivosti- ω | 0,0017 |



Slika 5-2. Hornerov dijagram podešavanja s tipskim krivuljama (Analiza HD mjerenja KBNZ-1B, Služba za razradu, 1986.)

5.4. Analiza drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A pomoću programa Saphir

Za interpretaciju testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B korišten je softver Saphir. Nakon provedbe testa u ovom programu bit će izračunati parametri s , k , kh , C , λ i ω i uspoređeni s rezultatima dobivenim u programu Interpret/ 2. Nakon odabira SI sustava mjernih jedinica potrebno je navesti osnovne karakteristike bušotine i ležišta, a to su radijus bušotine, efektivna debljina ležišta i poroznost. Budući da se radi o geotermalnoj bušotini, kao referentni fluid odabire se voda, kao što je i prikazano na slici 5-3.

The screenshot shows the 'Main options' dialog box in the Saphir software. The window title is 'New document - page 1/2 - Main options'. The dialog has four tabs: 'Main options', 'Information', 'Units', and 'Comments'. The 'Main options' tab is selected. The 'Test type' section has 'Standard' selected. The 'Well Radius' is 0.079 m, 'Pay Zone' is 10 m, and 'Porosity' is 0.2. The 'Fluid type' section has 'Reference phase' set to 'Water' and 'Available rates' with 'Water' checked. The 'Reference time (t=0)' is set to '11.12.2018.' and '0:00:00'. The 'Start with analysis' section has 'Standard' selected, with 'shale gas' and 'coalbed methane' unchecked, and 'Multi-Layer', 'Formation Test', and 'Slug-Pulse' also unchecked. At the bottom are buttons for 'Help', '<< Back', 'Next >>', and 'Cancel'.

Slika 5-3. Postavljanje osnovnih karakteristika ležišta i bušotine

Nakon toga, unose se podaci vezani za volumni faktor formacije, viskoznost vode te ukupnu kompresibilnost, pazeći pritom na mjerne jedinice. Odabirom opcije *Create* završava se s unosom podataka osnovnih karakteristika ležišta i fluida.

New document - page 2/2 - PVT parameters


Formation Volume Factor B: 1.05 (m³/stm³)

Viscosity μ : 0.0005 (Pa.sec)

Total compressibility ct: 5E-10 (Pa-1)

This PVT window does not apply for NL and Rubis sector analyses, where specific PVT settings are accessed from the analysis control panel tab.


Advanced

 Calculate from correlations

So: 0 co: N/A

Sg: 0 cg: N/A

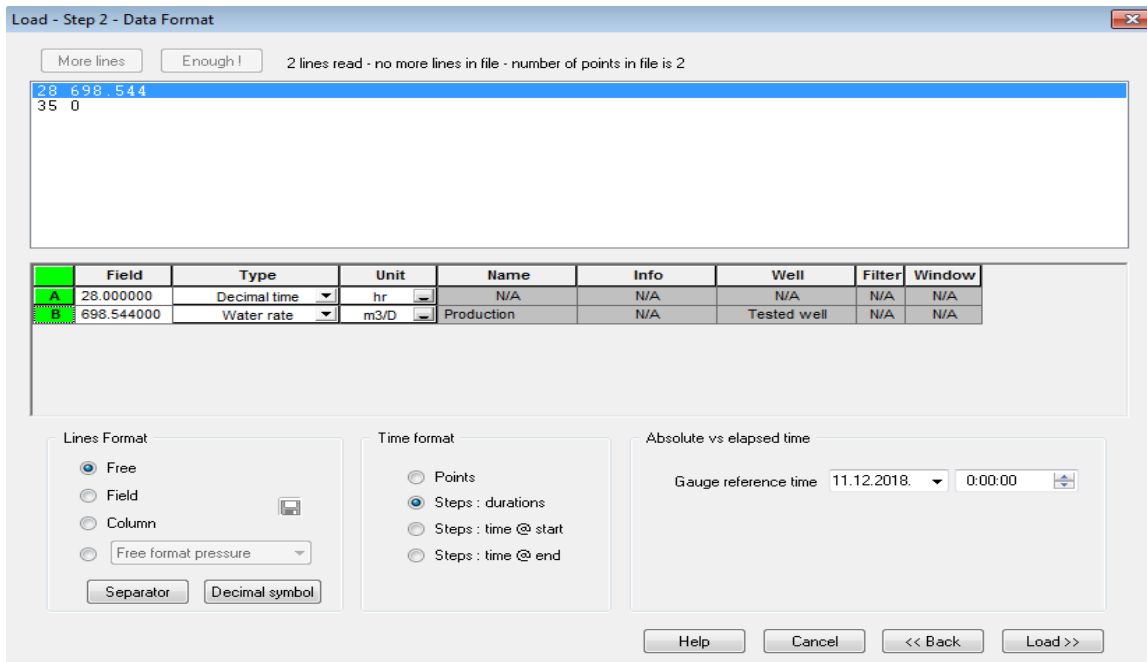
Sw: 1 cw: N/A (Pa-1)

So and Sg from Flash  cf: 4.35113E-10

Help << Back Create >> Cancel

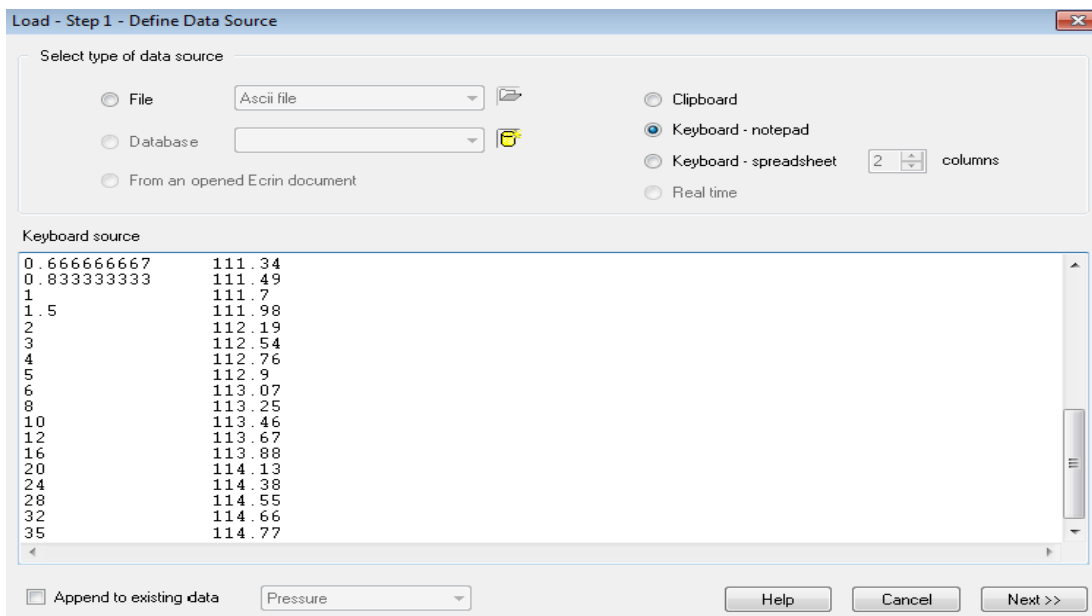
Slika 5-4. Definiranje PVT parametara

Zatim se nastavlja s unosom podataka vezanih za proizvodnju. Pritom, odabire se opcija *Keyboard-spreadsheet* nakon čega se otvori tablica s dva stupca pri čemu se u prvi stupac unose pseudoproizvodno vrijeme (t_p) i vrijeme trajanja testa porasta tlaka, i to u satima, dok se u drugi stupac unosi proizvodnja u m³/d pridodana tim vremenima. Pseudoproizvodno vrijeme u slučaju drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A iznosilo je 28 h. Kao što je već rečeno, ovom testu prethodilo je mjerenje izdašnosti bušotine pri kojem se proizvodnja ustalila na 698,544 m³/d. Nakon toga, bušotina je zatvorena radi pristupa testu porasta tlaka koji je trajao 35 h. Proizvodnja je, naravno, u tom periodu iznosila 0 m³/d. Ulazni podaci o testu porasta tlaka prikazani su na slici 5-5.



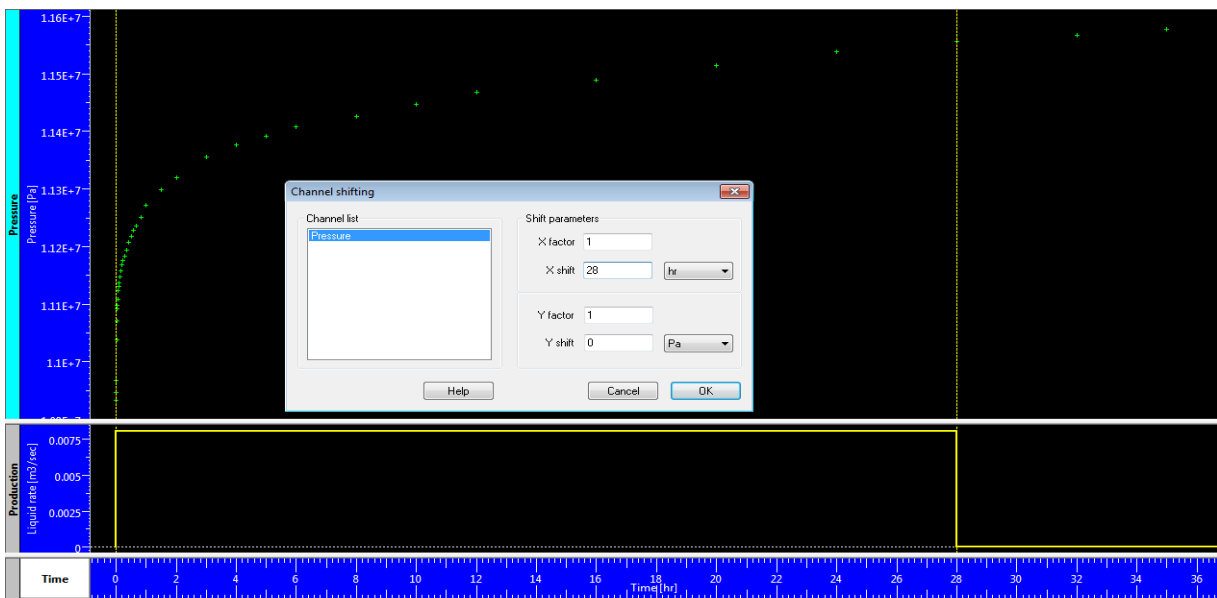
Slika 5-5. Ulazni podaci o testu porasta tlaka

Nakon što je definirana proizvodnja, nastavljamo s učitavanjem podataka o tlaku. Točnije, učitava se tablica vremena nakon zatvaranja bušotine i pripadajućeg tlaka, tj $\Delta t-p$. Vrijeme je ponovno izraženo u satima, dok je tlak u barima. U ovom je slučaju početni tlak iznosio 108,31 bar, da bi na kraju testa on porastao na 114,77 bar (slika 5-6).

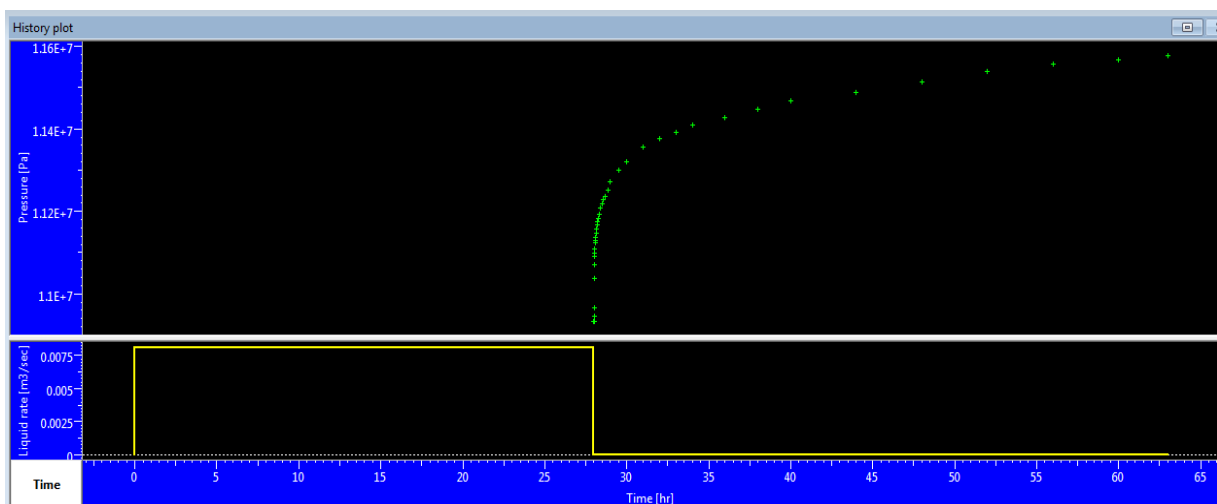


Slika 5-6. Učitavanje mjerenih tlakova

Tako se dobije krivulja porasta tlaka na grafu $p-\Delta t$. Međutim, budući da ta krivulja ima ishodište u vremenu $t=0$ h, potrebno ju je pomaknuti po x-osi za iznos pseudoproizvodnog vremena koje iznosi 28 h. Potrebni pomak dobije se odabirom opcije *Edit data*, zatim *Shift data* te se odabire opcija ručnog unosa željenog podatka (slika 5-7.) nakon čega se i krivulja pomakne za taj tp (Slika 5-8.)



Slika 5-7. Ručno pomicanje krivulje porasta tlaka po x-osi

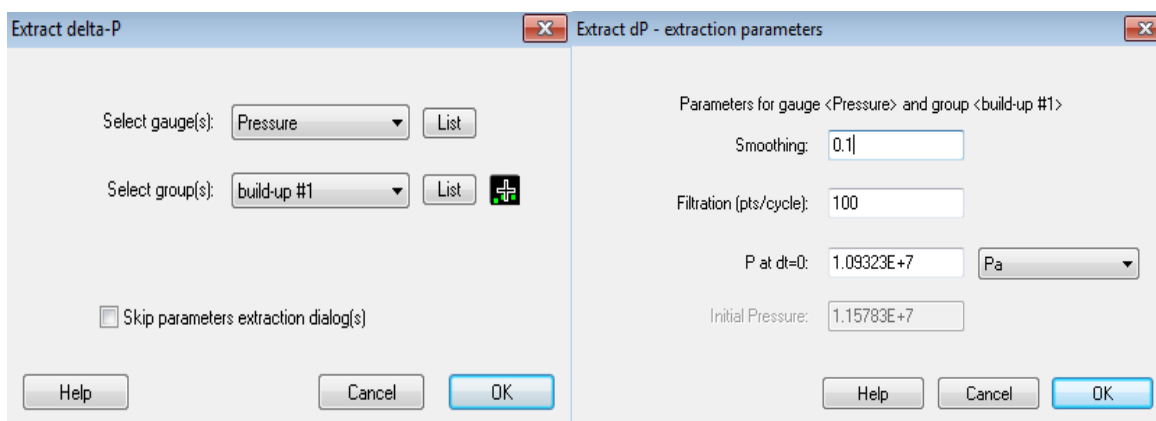


Slika 5-8. Pomak krivulje porasta za iznos pseudoproizvodnog vremena

Kada su proizvodnja i tlakovi učitani, sljedeći je korak izvesti derivaciju krivulje $\Delta t-p$ što se postiže odlaskom na ikonu *Extract dP* unutar *Interpretation* okvira. Prije svega odabiremo veličinu i grupu za koju se izvodi dP , a to su u ovom primjeru tlak i test porasta tlaka. Nakon spomenutog odabira, otvara se prozor s tri parametra kojima je pridodana određena vrijednost koja se ne mijenja:

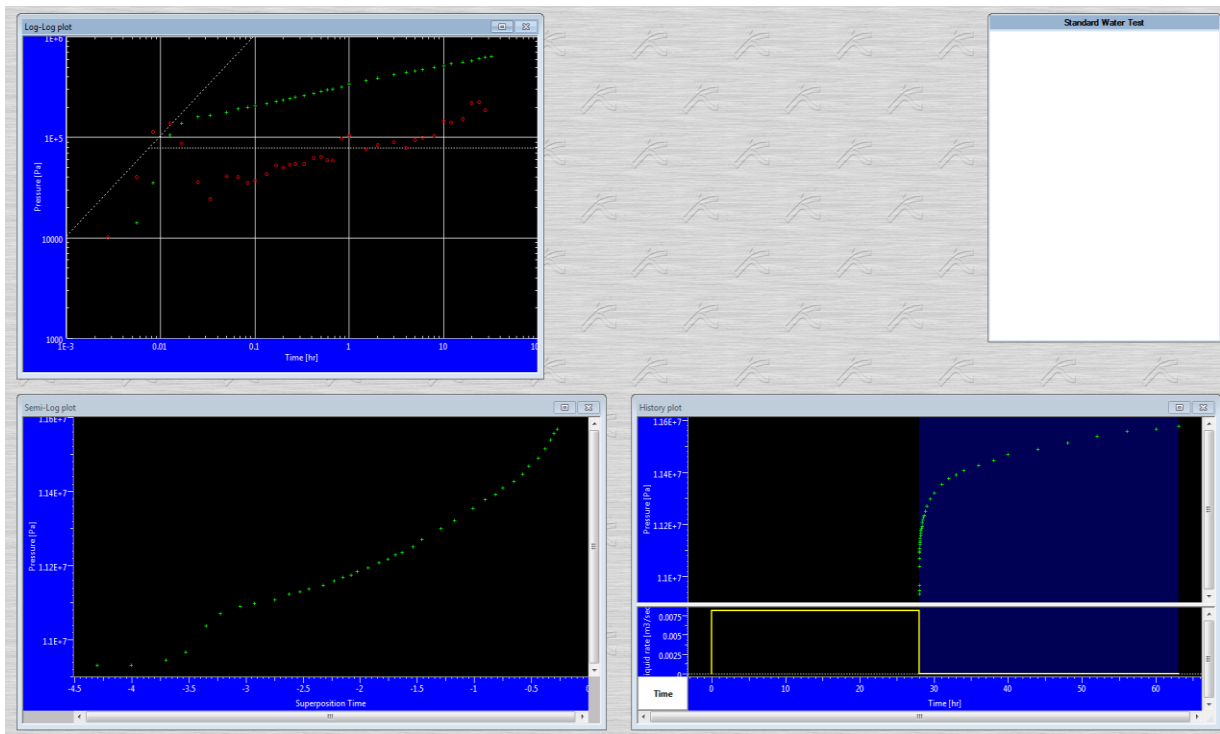
- *Smoothing* – predstavlja izravnanje derivacijske krivulje (0,1)
- *Filtration* – broj točaka po logaritamskom ciklusu (100 pts/cycle)
- *P at dt= 0* – početna točka u derivacijskoj grupi (108,31)

Prozori ikone *Extract dP* prikazani su na slici 5-9.



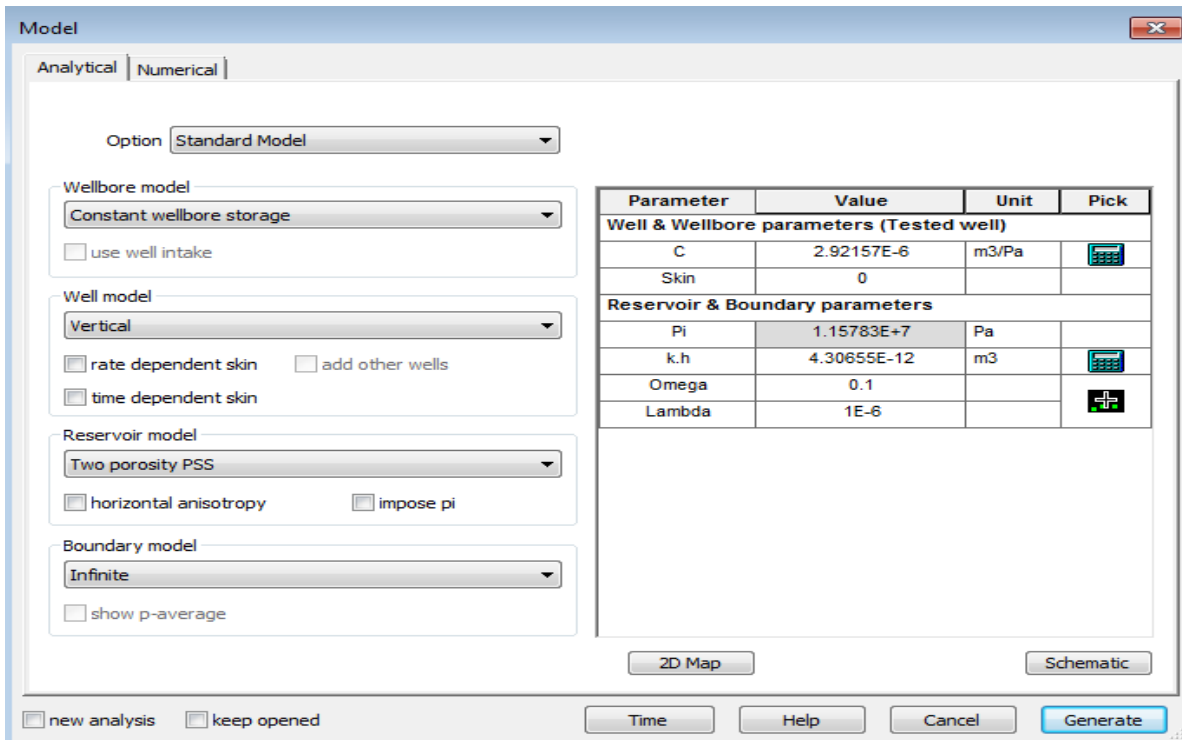
Slika 5-9. Prozori ikone *Extract dP*

Na zaslonu Saphira tada se pojave dva nova dijagrama; dijagram ovisnosti tlaka i derivacije tlaka o vremenu te semi-log dijagram (slika 5-10).



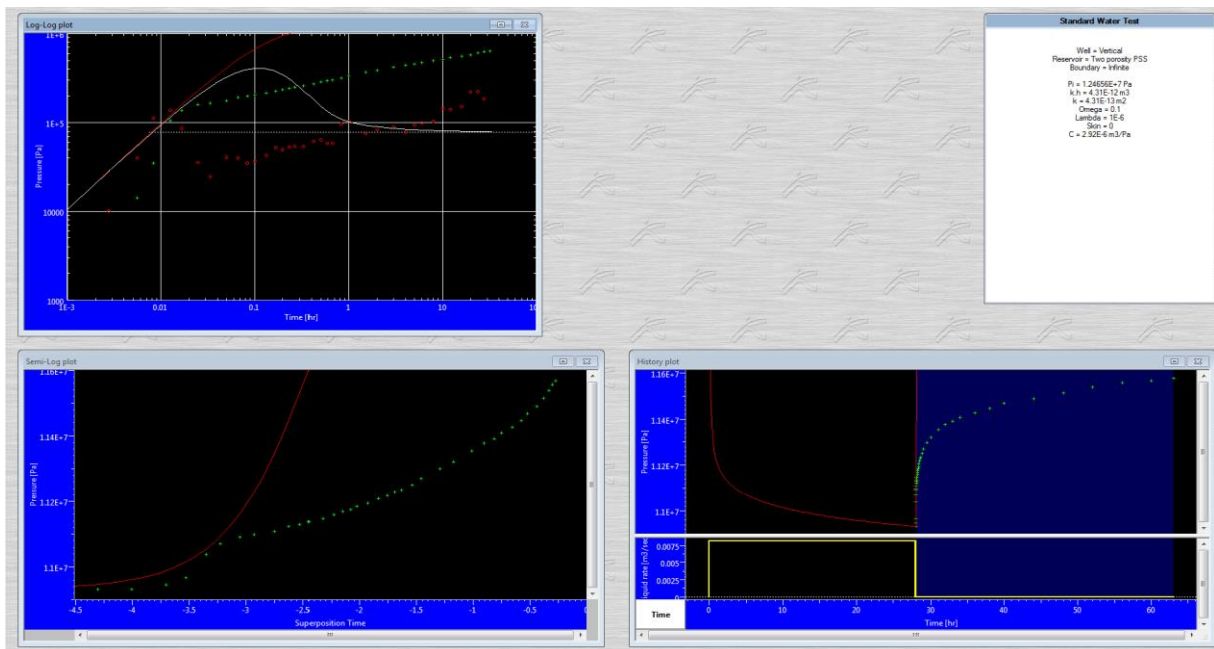
Slika 5-10. Izgled krivulja porasta nakon odabira opcije *Extract dP*

Nadalje, potrebno je definirati analitički model ležišta i bušotine. Nakon što se odabere opcija standardnog modela, potrebno je odabrati bušotinski model kao vertikalni s konstantnim bušotinskim skladištenjem, dok se za ležišni model uzima ležište dvojne šupljikavosti. Što se utjecaja granica tiče, postavljen je model neograničenog ležišta. Definiranje upravo opisanog modela u Ecrinu prikazano je na slici 5-11.



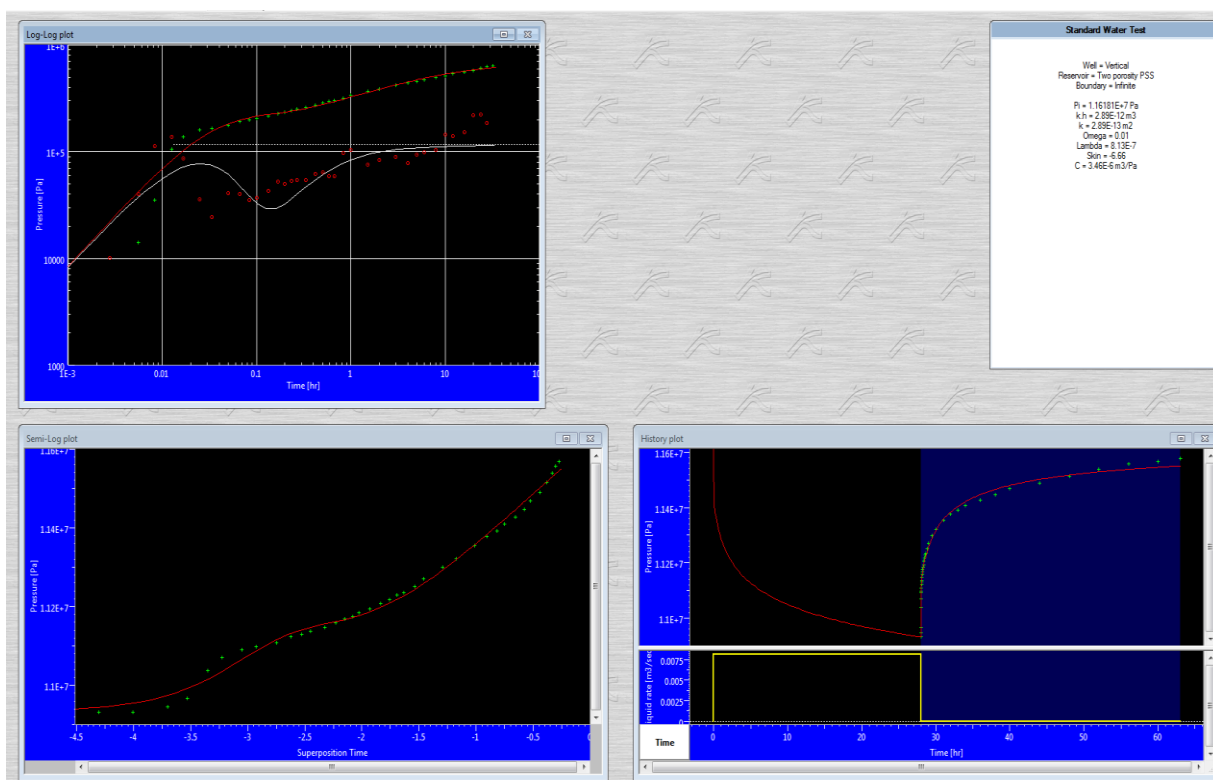
Slika 5-11. Prozor za modeliranje u programu Saphir

Klikom na opciju *Generate* dobiva se potrebni model. Međutim, na slici 5-12 vidljivo je značajno neslaganje između postavljenog modela i prethodno unesenih podataka.

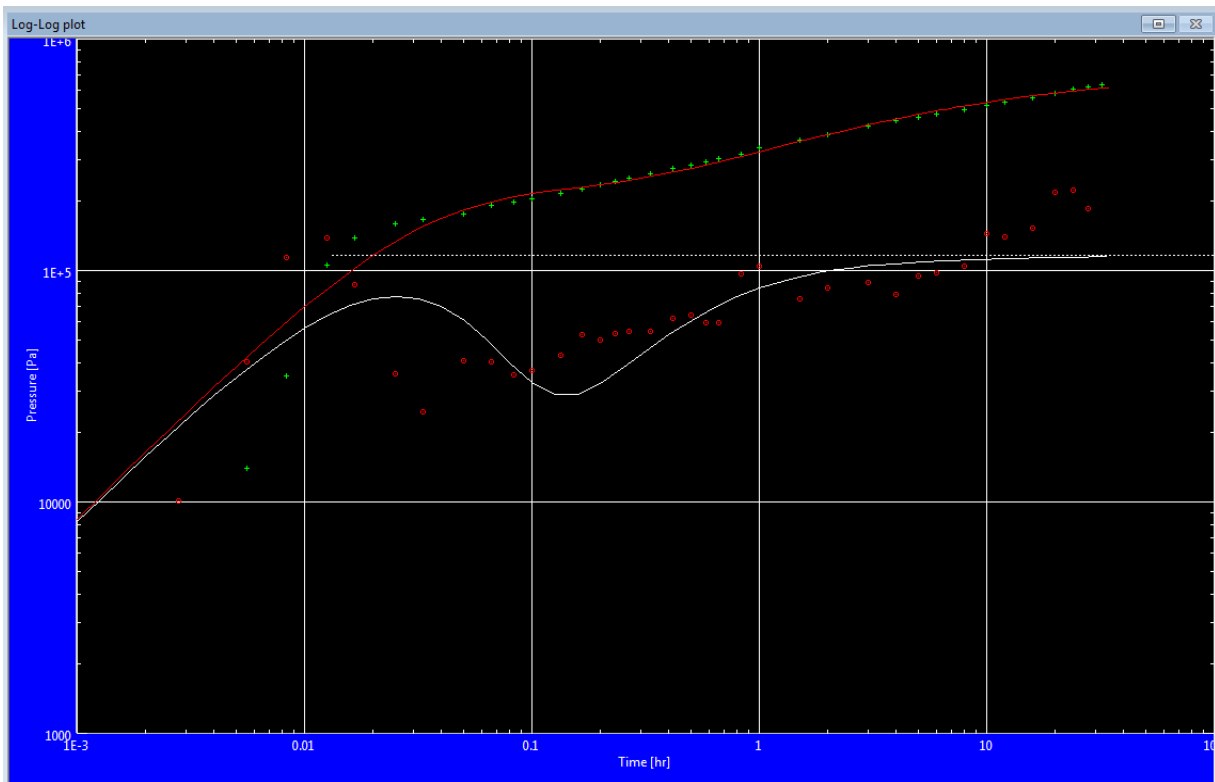


Slika 5-12. Odstupanje postavljenog modela od unesenih podataka

Takvo neslaganje uzrokovano je neadekvatnim skin faktorom. Uzastopnim pozivanjem prozora za modeliranje te ručnim mijenjanjem skin faktora, moguće je dobiti bolje preklapanje. Međutim, zbog netočne vrijednosti koeficijenta skladištivosti u bušotini i dalje je prisutan taj problem neusklađenosti između modela i podataka. Nakon što je stvoren model, spomenuti problem rješava se klikom na ikonu *Improve* čime se uspostavlja rutinska operacija prilagođavanja vrijednosti parametara modela kako bi se minimizirala razlika između teoretskog modela i unesenih podataka. Potrebno je odabrati opciju „Log-log“ te kliknuti na *Run* čime je prilagođavanje završeno. Postupak se može nekoliko puta ponavljati sve dok se ne dobije najbolje preklapanje. Izgled log-log, odnosno Hornerovog dijagrama nakon prethodno provedenog postupka prikazan je na sljedećim slikama.

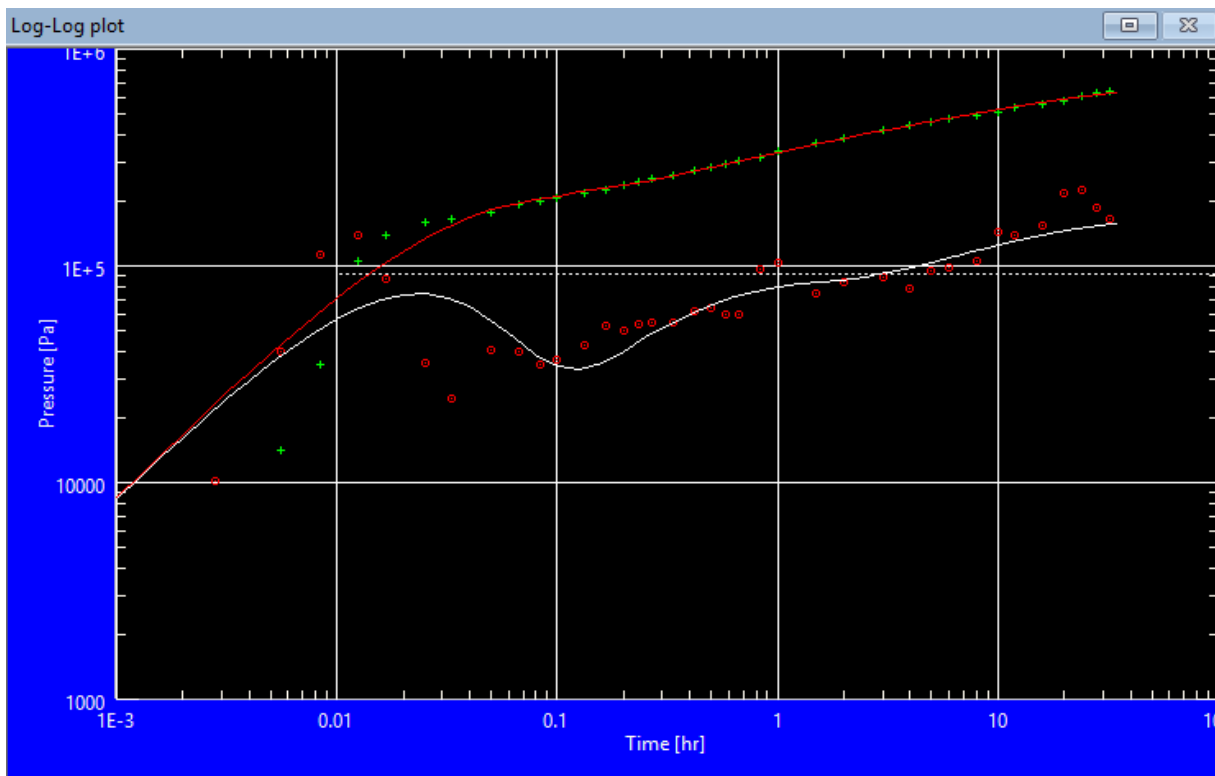


Slika 5-13. Izgled krivulja porasta nakon odabira opcije *Improve*



Slika 5-14. Log-log dijagram nakon odabira opcije *Improve*

Kao što je vidljivo na slici 5-14, i dalje postoji značajno odstupanje izgleda krivulje od teoretskog modela, što može sugerirati na grešku u postavljanju utjecaja granica ležišta koje je inicijalno postavljeno kao neograničeno. Sam izgled krivulje porasta tlaka, kako je i naznačeno u izvještaju u službenoj dokumentaciji upućuje na prisutnost rasjeda ili bliske barijere. Ponovnim odabirom opcije *Model* promijenjen je utjecaj granica ležišta iz neograničenog u ležište s jednim rasjedom. Nakon što je proveden opisani postupak, ponovno se nekoliko puta odabire opcija *Improve* nakon čega se dobije nešto bolje slaganje teoretskog modela s modelom baziranim na unesenim podacima (slika 5-15). Rezultati analize testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A u programu Ecrin prikazani su u tablici 5-6.



Slika 5-15. Log-log dijagram nakon promjene modela granica ležišta

Tablica 5-6. Rezultati analize drugog testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A u programu Ecrin

| Parametar | Rezultati |
|--|---|
| Skin efekt- s | - 6,23 |
| Propusnost za vodu- k | $3,69 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ |
| Propusna sposobnost- kh | $3,69 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ |
| Skladištivost u bušotini- C | $3,48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$ |
| Parametar međušupljikavog protjecanja- λ | $1,03 \times 10^{-6}$ |
| Odnos pohranjivosti- ω | $\omega = 0,00101$ |

5.5. Grafoanalitičko određivanje propusnosti i radijusa ispitivanja na bušotini KBNZ-1A

Na temelju ulaznih podataka o bušotini KBNZ-1A (tablica 5-7) te podataka o vremenu i tlaku nakon zatvaranja bušotine (tablica 5-8), moguće je odrediti propusnost formacije te, posljedično, i radijus ispitivanja.

Tablica 5-7. Ulazni podaci o bušotini KBNZ-1A (Izveštaj o mjeranju na bušotini KBN Zg-1A, 1984.)

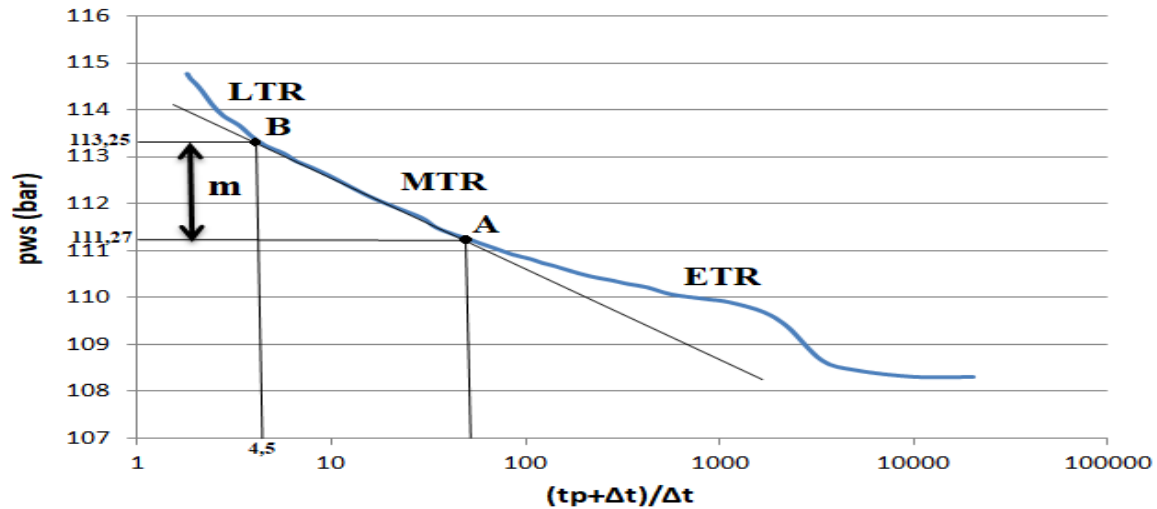
| | |
|----------|--|
| c_t | $5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ |
| Φ | 0,2 |
| B_w | 1,05 |
| μ_w | $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ |
| h_{ef} | 10 m |
| r_w | 0,079 |
| q_o | $0,00809 \text{ m}^3/\text{s}$ |

Tablica 5-8. Podaci dobiveni testom porasta tlaka 1-A (Izveštaj o mjeranju na bušotini KBN Zg-1A, 1984.)

| Δt (sati) | $(tp+\Delta t)/\Delta t$ | p_{ws} (bar) |
|-------------------|--------------------------|----------------|
| 0,001389 | 20160,998 | 108,31 |
| 0,002778 | 10080,999 | 108,31 |
| 0,005556 | 5040,9996 | 108,45 |
| 0,008333 | 3361,0001 | 108,66 |
| 0,0125 | 2241 | 109,37 |
| 0,016667 | 1681 | 109,69 |
| 0,025 | 1121 | 109,9 |
| 0,033333 | 841,00001 | 109,97 |
| 0,05 | 561 | 110,07 |
| 0,066667 | 421 | 110,22 |
| 0,083333 | 337 | 110,29 |
| 0,1 | 281 | 110,36 |
| 0,133333 | 211 | 110,46 |
| 0,166667 | 169 | 110,57 |
| 0,2 | 141 | 110,67 |
| 0,233333 | 121 | 110,74 |

| Δt (sati) | $(tp+\Delta t)/\Delta t$ | p_{ws} (bar) |
|-------------------|--------------------------|----------------|
| 0,266667 | 106 | 110,82 |
| 0,333333 | 85 | 110,92 |
| 0,416667 | 68,2 | 111,06 |
| 0,5 | 57 | 111,17 |
| 0,583333 | 49 | 111,27 |
| 0,666667 | 43 | 111,34 |
| 0,833333 | 34,6 | 111,49 |
| 1 | 29 | 111,7 |
| 1,5 | 19,666667 | 111,98 |
| 2 | 15 | 112,19 |
| 3 | 10,333333 | 112,54 |
| 4 | 8 | 112,76 |
| 5 | 6,6 | 112,9 |
| 6 | 5,666667 | 113,07 |
| 8 | 4,5 | 113,25 |
| 10 | 3,8 | 113,46 |
| 12 | 3,333333 | 113,67 |
| 16 | 2,75 | 113,88 |
| 20 | 2,4 | 114,13 |
| 24 | 2,166667 | 114,38 |
| 28 | 2 | 114,55 |
| 32 | 1,875 | 114,66 |
| 35 | 1,8 | 114,77 |

Kao što je vidljivo na slici 5-16, krivulju porasta tlaka u MTR području moguće je aproksimirati pravcem, pri čemu se odabiru dvije točke. Točka A, označena na krivulji, predstavlja prestanak naknadnog dotoka fluida u bušotinu, dok točka B označava točku u kojoj se počinje osjećati utjecaj granica ležišta.



Slika 5-16. Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1A Hornerovom metodom pomoću kalkulatora Excel

Jednostavnim očitanjem pripadajućih vrijednosti na ordinati spomenutih točaka moguće je odrediti razliku vrijednosti koja ujedno i označava nagib pravca:

$$m = 113,25 - 111,27 = 1,98 \frac{\text{bar}}{\text{ciklus}} = 1,98 \cdot 10^5 \text{ Pa/ciklus}$$

Već je ranije u radu prilikom teorijskog osvrt na test porasta tlaka rečeno da se iz spomenutog nagiba pravca m može odrediti propusnost formacije k :

$$k = 0,183234 \cdot \frac{q_o \cdot B_w \cdot \mu_w}{m \cdot h_{ef}} = 0,183234 \cdot \frac{0,0081 \cdot 1,05 \cdot 0,0005}{1,98 \cdot 10^5 \cdot 10} = 3,93 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \quad (5-4)$$

gdje su:

q_o - proizvodnja unutar pseudoproizvodnog vremena (m^3/s)

B_w - volumni faktor vode (m^3/m^3)

μ_w -viskoznost vode ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

h_{ef} - efektivna debiljina ležišta

Za određivanje radijusa istraživanja potrebno je na apscisi Hornerovog dijagrama očitati vrijedost točke u kojoj počinje LTR period, a to je točka $(t_p + \Delta t) / \Delta t = 4,5$. Jednostavnom računicom dobije se i vrijeme Δt nakon kojeg se počinju osjećati granice ležišta:

$$\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = 4,5 \quad (5-5)$$

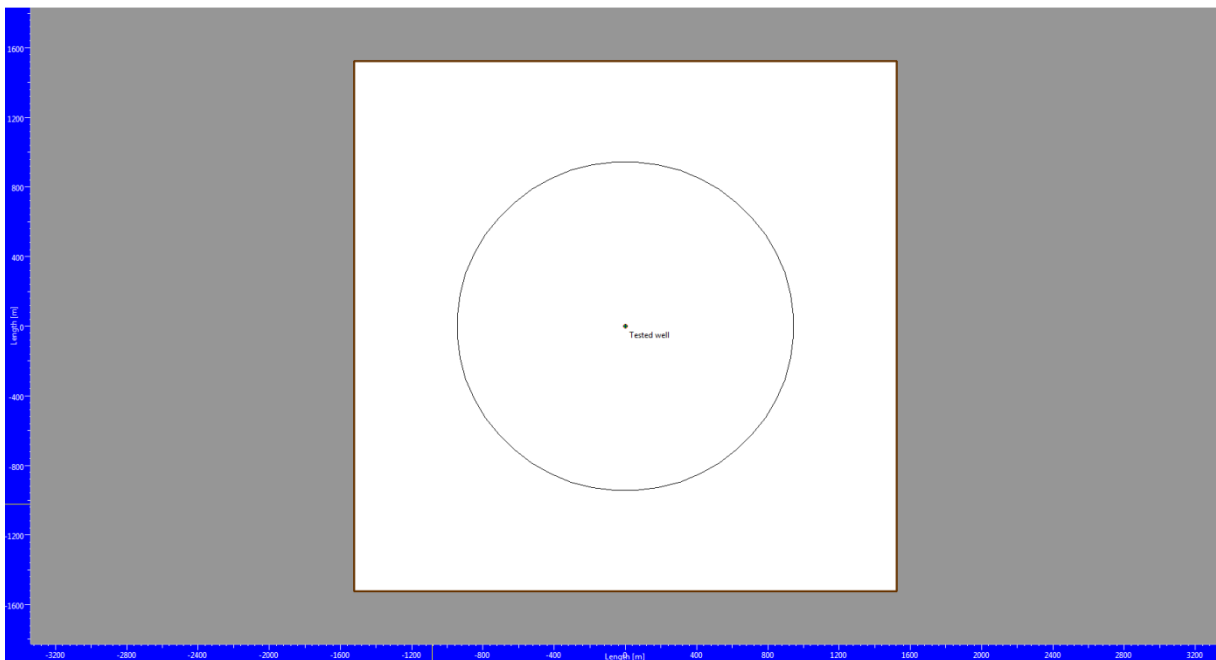
$$28 = 3,5\Delta t$$

$$\Delta t = 8 \text{ h} = 28\,800 \text{ s}$$

Konačno, na temelju vremena Δt i ranije izračunate propusnosti k , radijus ispitivanja r_i određuje se na sljedeći način:

$$r_i = 1,9869 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot \Delta t}{\Phi \mu c_t}} = 1,9869 \cdot \sqrt{\frac{3,93 \cdot 10^{-13} \cdot 28\,800}{0,2 \cdot 0,0005 \cdot 5 \cdot 10^{-10}}} = 945,35 \text{ m} \quad (5-6)$$

U programskom paketu Ecrin moguće prikazati radijus crpljenja testirane bušotine KBNZ-1A 2D modelom (slika 5-17).



Slika 5-17. 2D prikaz bušotine KBNZ-1A s radijusom crpljenja $r_i = 945,35 \text{ m}$ u programu Saphir

5.6. Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B

Na proizvodnoj bušotini KBNZ-1B provedena su četiri hidrodinamička mjerenja. Osnovni parametri ležišta i bušotine KBNZ-1B dani su u tablici 5-9.

Tablica 5-9. Osnovni parametri ležišta i bušotine KBNZ-1B (Analiza HD mjerenja KBNZ-1B, Služba za razradu, 1986.)

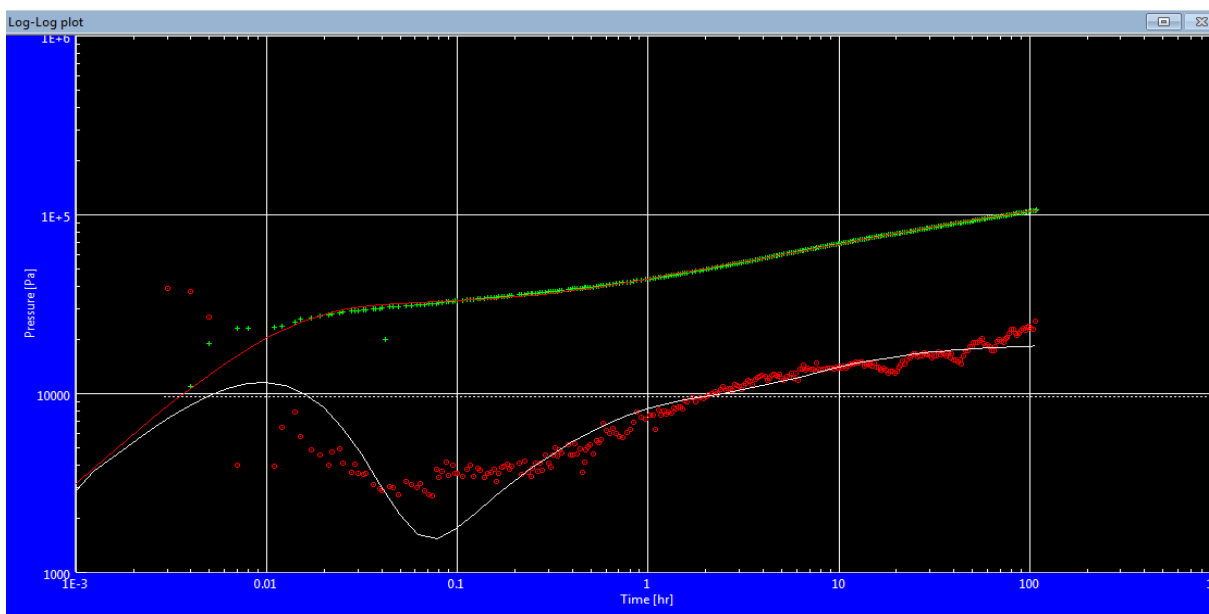
| | |
|----------|-------------------------|
| r_w | 0,108 m |
| h_{ef} | 47 m |
| Φ | 0,2 |
| B_w | 1,02 |
| μ_w | 0,0004 Pas |
| c_t | 12×10^{-10} Pa |

Bušotina je prvo otvorena za interferenciju s bušotinama KBNZ-1A i Mla-3. Prilikom tog testa proizvodnja je iznosila $7\,500 \text{ m}^3/\text{d}$, a za 23.8 sati pad tlaka na opažajućoj bušotini KBNZ-1A iznosio je 0,044 bar. Sljedeći je dan bušotina zatvorena kako bi se proveo test porasta tlaka koji je trajao 61,12 sati, da bi se nakon toga ponovno otvorila za mjerenje RLT-a (engl. *Reservoir limit test*) radi utvrđivanja obujma pora, tj. granica ležišta. Prilikom toga testa zahvaćene su granice ležišta, odnosno postignuto je polu-ustaljeno stanje protjecanja. Ukupni volumen pora dobiven RLT-om iznosi $1,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Mjerenje je trajalo 423 sata, a proizvodnja je iznosila $3000 \text{ m}^3/\text{d}$. Prilikom toga opažen je značajan pad tlaka od 48,4 bar što govori da je potrebno održavanje tlaka. Nakon mjerenja RLT-a uslijedio je novi test porasta tlaka koji je ovoga puta trajao gotovo 109 sati. Upravo je taj drugi test porasta tlaka obrađen u programskom paketu Ecrin, na identičan način kao i u prethodnom slučaju bušotine KBNZ-1A, a dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima obrađenim u programu Interpret/2 unutar stručne dokumentacije službe za razradu. Kao i u prethodnom primjeru, odabran je vertikalni bušotinski model s konstantnim skladištenjem te ležišni model dvostruke poroznosti. Potrebno je naglasiti da je u Glavnom rudarskom projektu spomenuto kako su prilikom RLT-a, koji je prethodio ovom testu porasta tlaka, zahvaćene sve granice ležišta, iz čega slijedi da se ono ponaša kao ograničeno. U skladu s tim, kao i u ranijem slučaju, potrebno je u samom

programu prilikom odabira modela postaviti ležišni model s barijerom, a u ovom slučaju odabrana je rasjedna barijera. Pregled rezultata testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B u programu Ecrin, odnosno Interpret/2, nalazi se u tablici 5-10. Na slici 5-18 prikazano je podešavanje s tipskim krivuljama u programskom paketu Ecrin na primjeru iste bušotine.

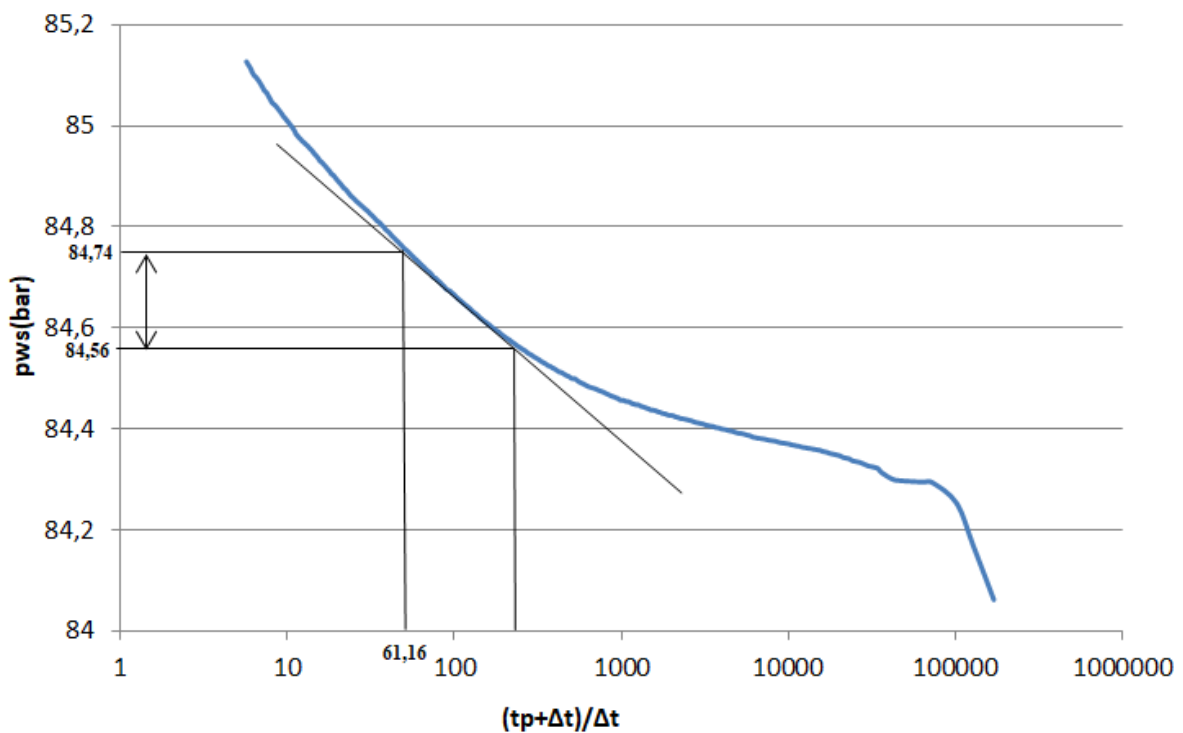
Tablica 5-10. Usporedba rezultata testa porasta tlaka na bušotini KBNZ- 1B u programu Interpret/2 i Ecrin

| Parametar | Interpret/2 | Ecrin |
|---------------------------------------|---|---|
| Skin efekt | $s = -9,7$ | $s = -6,11$ |
| Propusnost za vodu | $k = 1,65 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ | $k = 2,50 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ |
| Propusna sposobnost | $kh = 7,75 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ | $kh = 1,18 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ |
| Skladištivost u bušotini | $C = 2,42 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{Pa}$ | $C = 3,84 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{Pa}$ |
| Parametar međušupljikavog protjecanja | $\lambda = 4,6 \times 10^{-3}$ | $\lambda = 3,11 \times 10^{-7}$ |
| Odnos pohranjivosti | $\omega = 0,0725$ | $\omega = 0,001$ |



Slika 5-18. Log-log dijagram podešavanja s tipskim krivuljama u programu Saphir na primjeru bušotine KBNZ-1B

Postupak grafoanalitičkog određivanja propusnosti k i radijusa crpljenja r_i već je opisan na prošlom primjeru. Podaci dobiveni testom porasta tlaka, Δt i p_{ws} , uneseni su u kalkulator excel nakon čega je izračunato superponirano vrijeme $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ koje se nalazi na apscisi Hornerovog dijagrama. Pseudoproizvodno vrijeme t_p u ovom slučaju iznosi 510 h, dok je proizvodnja u tom periodu bila 3000 m³/d. Na osnovu tih podataka moguće je prikazati krivulju porasta tlaka pomoću koje se veoma jednostavno očita nagib pravca MTR perioda, kao i točka kada počinje utjecaj granica ležišta (slika 5-20).



Slika 5-20. Analiza testa porasta tlaka na bušotini KBNZ-1B Hornerovom metodom pomoću kalkulatora Excel

Nagib pravca m na temelju slike iznosi:

$$m = 84,74 - 84,56 = 0,18 \text{ bar/ciklus} = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Pa/ciklus}$$

Iz toga slijedi da je propusnost k :

$$k=0,183234 \cdot \frac{q_o \cdot B_w \cdot \mu_w}{m \cdot h_{ef}} = 0,183234 \cdot \frac{0,035 \cdot 1,02 \cdot 0,0004}{1,8 \cdot 10^4 \cdot 47} = 3,09 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \quad (5-7)$$

Na slici 5-20. također je vidljivo i da LTR period počinje u točki $(t_p + \Delta t) / \Delta t = 61,16$. Iz toga, i iz poznatog pseudoproizvodnog vremena, dobije se Δt u iznosu od 8,48 h.

Prema tome, radijus ispitivanja iznosi:

$$r_i = 1,9869 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot \Delta t}{\Phi \mu c_t}} = 1,9869 \cdot \sqrt{\frac{3,09 \cdot 10^{-12} \cdot 30\,528}{0,2 \cdot 0,0004 \cdot 12 \cdot 10^{-10}}} = 1998,11 \text{ m} \quad (5-8)$$

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Na području Panonskog bazena geotermalni potencijal otkriven je još početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća, a odnosi se na lokalitete SRC Mladost, Lučko, Jarun i SRC Blato (Sveučilišna bolnica). Geotermalna voda isprva se koristila u balneološke i rekreacijske svrhe, ali se kasnije počela upotrebljavati i unutar sustava grijanja i hlađenja. Na lokalitetu Sportsko- rekreativnog centra Mladost voda iz podzemlja koristi se za grijanje vanjskih objekata, zagrijavanje zraka te za grijanje svih glavnih i pomoćnih prostora zimskog bazena. S druge strane, projekt izgradnje Kliničke bolnice Novi Zagreb stao je još 1992. godine, iako su se ispitivanja na postojećim bušotinama i dalje nastavila. Međutim, projekt je na neki način revitaliziran 2014. godine kada je objavljena i detaljna studija utjecaja na okoliš, a smatra se da bi isti trebao biti realiziran u sljedećih nekoliko godina zajedno s implementacijom geotermalne vode za grijanje prostorija same bolnice. S obzirom na sve veće i postrožene zahtjeve vezane za zaštitu okoliša i ispuštanje štetnih tvari u atmosferu, kao i veliki potencijal koji posjeduje grad Zagreb, geotermalna energija svakako bi trebala zauzimati jedno od glavnih mjesta u budućoj strategiji energetskog i gospodarskog razvoja Republike Hrvatske. Okosnica postepenog prijelaza na geotermalnu energiju kao alternativni oblik izvora energije svakako leži u spomenutim lokalitetima Mladost i Blato koji čine jedinstvenu hidrodinamičku cjelinu na području geotermalnog polja Zagreb. Ležišta koja sačinjavaju te lokalitete spadaju u red visokopropusnih, niskotemperaturnih ležišta. Na njima je, nakon temeljite geološke analize, provedeno nekoliko hidrodinamičkih ispitivanja, prije svega s ciljem određivanja propusnosti i propusne moći ležišta, oštećenja ili stimulacije pribušotinske zone, tj. skin efekta, te ostalih parametara potrebnih za daljnje tretiranje bušotine. Važnost određivanja propusnosti ponajviše leži u određivanju protočnih karakteristika ležišnog fluida i radijusa crpljenja, dok skin faktor može uputiti na eventualnu potrebu obrade stijena u bušotinama. Vrijednosti skin faktora dobivene u programu Saphir bliske su onima dobivenim u programu Interpret/2 , što je posebno vidljivo na primjeru bušotine KBNZ-1A. U oba slučaja ukupan skin je negativan, a to govori da je bušotina stimulirana. Značajna negativna vrijednost skin faktora na bušotini KBNZ-1B objašnjiva je RLT-om koji je na toj bušotini proveden prije testa porasta tlaka. Proizvodnja je prilikom tog testa trajala 423 h te je uslijed takve dugotrajnije proizvodnje došlo do efekta čišćenja bušotine. Na bušotini KBNZ-1A izrazito negativni iznos skin efekta objašnjava se

mjerenjem izdašnosti bušotine koje je obavljeno prije testa porasta tlaka, pri čemu je došlo do identičnog efekta. Vrijednosti ostalih parametara dobivenih u Saphiru pokazuju značajno odstupanje od vrijednosti tih istih parametara izračunatih programom Interpret/2. Jako male vrijednosti koeficijenta međušupljikavog protjecanja λ upućuju na slabu povezanost između dvije zone unutar ležišta dvojne šupljikavosti. Također, vrijednosti odnosa pohranjivosti ω u oba testa govore da matriks prevladava u ukupnom pornom volumenu. Isto tako, primjećuje se da je efekt bušotinskog skladištenja nešto izraženiji kod bušotine KBNZ-1B. Uspoređujući rezultate testova porasta tlaka provedenih na bušotinama KBNZ-1A i KBNZ-1B, vidljivo je da se najveće odstupanje unutar tih rezultata odnosi na vrijednosti parametra propusnosti. Neslaganje je, najvećim dijelom, uzrokovano razlikom u postavljanju ležišnog modela, koji je u programu Interpret/2 postavljen kao neograničeni, dok je u Saphiru promijenjen u ležište s rasjednom barijerom, pri čemu se dobije bolje podešavanje s tipskim krivuljama. Uspoređujući dvije testirane bušotine, jasno je da je propusna sposobnost kh na bušotini KBNZ-1B preko 200 puta veća od propusne moći prenamijenjene utisne bušotine KBNZ-1A. Grafoanalitičkom metodom, koja je uslijedila nakon obavljenog testa porasta tlaka, izračunate su vrijednosti propusnosti koje su bliske onima dobivenim u programskom paketu Ecrin, što upućuju na vjerodostojnost rezultata koje spomenuti softver prikazuje, kao i posljedičnu nužnost revizije hidrodinamičkih mjerenja na obrađenim bušotinama.

7. LITERATURA

1. Analiza HD mjerenja KBNZ-1B, 1986., Zagreb, Služba za razradu, INA-Industrija nafte
2. Elaborat o rezervama geotermalne vode eksploatacijskog polja „Geotermalno polje Zagreb“, 2008., Zagreb, INA-Industrija nafte
3. Elaborat o rezervama geotermalne vode Eksploatacijskog polja Zagreb, 2014., Zagreb, Terme Zagreb.
4. Glavni rudarski projekt geotermalnog polja Zagreb, 1995., Zagreb, INA-Industrija nafte
5. Izvještaj o mjerenju na bušotini KBN Zg-1A, 1984., Ivanić Grad, OOUR Remont, Odjel za H.D.M, INA-Naftaplin
6. LEE, J., 1982., Well Testing, New York: Society of Petroleum Engineers
7. LEE, J., ROLLINS, J.B., SPIVEY, J.P., 2003., Pressure Transient Testing, Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers
8. MATTHEWS, C.S., RUSSELL, D.G., 1967., Pressure Buildup and Flow Tests in Wells, Dallas: Society of Petroleum Engineers
9. Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Geotermalno polje Zagreb“, 2014., Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
10. Studija utjecaja na okoliš, „Geotermalno polje Zagreb“, Lokalitet ŠRC Blato, 2006., Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagreb

Web izvori:

11. Ecrin v4.30 Tutorial, 2011., Schlumberger

URL: https://www.kappaeng.com/documents/flip/ecrin_430_tutorials/files/assets/basic-html/index.html#page1 (16.5.2018.)

12. Google books, Well Testing: Interpretation Methods

URL:

https://books.google.hr/books/about/Well_Testing.html?id=zhX3ngEACAAJ&redir_esc=y
(25.4.2018.)

13. Kappa engineering overview

URL: <https://www.kappaeng.com/software/saphir/overview> (14.5.2018.)

14. Oil and Gas Directory, Petroleum software directory, Reservoir-engineering-software, Well-test-analysis-software, PIE

URL: <https://www.petromehras.com/petroleum-software-directory/reservoir-engineering-software/well-test-analysis-software/pie> (14.5.2018.)

15. Oil and Gas Directory, Petroleum Software Technology, Technical articles, Pars WellTest Analyser

URL: <https://www.petromehras.com/petroleum-software-articles/technical-articles/pars-welltest-analyser-pwa> (14.5.2018.)

16. Paradigm- E&P Subsurface Software Solutions, Products

URL: <http://www.pdgm.com/products/interpret/> (14.5.2018.)

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Zvonimir Martić