

# Dijagnostički test frakturiranja i njegova primjena u dizajnu hidrauličke frakture

---

Juričić, Tin

Master's thesis / Diplomski rad

2016

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:201445>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

DIJAGNOSTIČKI TEST FRAKTURIRANJA I NJEGOVA  
PRIMJENA U DIZAJNU HIDRAULIČKE FRAKTURE

Diplomski rad

Tin Juričić

N 153

Zagreb, 2016.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se gospodinu Željku Habijanecu na pomoći i ustupljenim materijalima pri izradi ovog rada.

## Dijagnostički test frakturiranja i njegova primjena u dizajnu hidrauličke frakture

Tin Juričić

Rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Dijagnostički test frakturiranja (skr. *DFIT*) bitna je stavka prilikom planiranja frakture i izvođenja operacije hidrauličkog frakturiranja. Da bi se moglo razumjeti princip testa i kako on utječe na planiranje frakture, potrebno je proučiti režime protjecanja fluida kroz ležište i njihov utok u bušotinu, i fiziku hidrauličkog frakturiranja. U radu su obrađeni režimi protjecanja fluida kroz ležište i njegovog utjecanja u bušotinu, teorija hidrauličkog frakturiranja te fizika nastanka hidrauličke frakture, analiza dijagnostičkog testa frakturiranja (*DFIT*-a.) analitička metoda optimizacije geometrije frakture, te modeliranje frakture 3D simulatorom, s naglaskom na važnost *DFIT*-a pri modeliranju.

Ključne riječi: dijagnostički test frakturiranja, hidrauličko frakturiranje, UFD metoda ("Unfied fracture design"), režimi protjecanja kroz ležište

Završni rad sadrži: 54 stranice, 1 tablicu, 32 slike, 1 prilog, i 19 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Diagnostic fracture injection test and its use in hydraulic fracture design

Tin Juričić

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

Abstract

Diagnostic fracture injection test (abb. *DFIT*) is an important parameter in planning of hydraulic fracturing operations. In order to understand the principle of DFIT, and the way it affects the planning of hydraulic fracture, it is necessary to examine the flow regimes in porous media and fluid well flow, and the physics of hydraulic fracturing. In this work following topics are covered: flow regimes in porous media, and fluid well flow, principles of hydraulic fracturing and hydraulic fracturing physics, DFIT analysis, the analytical method of optimizing the fracture geometry and fracture modeling in 3D simulator, with an emphasis on the importance of DFIT in modeling.

Keywords: diagnostic fracture injection test, hydraulic fracturing, UFD method ("Unified fracture design"), flow regimes in porous media

Thesis contains: 54 pages, 1 table, 32 figures, 1 appendix, i 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA .....	IV
1. UVOD .....	6
2. REŽIMI PROTJECANJA FLUIDAKROZ LEŽIŠTE .....	7
2.1. Podrežimi protjecanja .....	8
2.1.1. Efekt bušotine .....	9
2.1.2. Linearni protok u pukotini .....	9
2.1.3. Bilinearni protok kroz pukotinu .....	10
2.1.4. Sferični protok .....	11
2.1.5. Radijalni protok .....	13
2.1.6. Protok kod nepropusne granica u ležištu .....	14
2.1.7. Protok u uskim ležištima .....	14
2.1.8. Pseudostacionarni protok .....	15
2.1.9. Ustaljeni protok .....	16
3. TEORIJA HIDRAULIČKOG FRAKTURIRANJA .....	17
3.1. Osnovni matematički modeli formiranja pukotina .....	18
3.1.1. PKN model .....	19
3.1.2. KGD model .....	20
3.1.3. Radijalni model .....	21
4. DIJAGNOSTIČKI TEST FRAKTURIRANJA .....	23
4.1. Parametri potrebni za izračun početka vremena pseudoradijalnog protjecanja .....	25
4.1.1. Polu-duljina frakture .....	25
4.1.2. Propusnost .....	27
5. ANALIZA DFIT-A .....	31
5.1. Analiza G funkcije .....	31
6. UFD METODA ODRAĐIVANJA OPTIMALNE GEOMETRIJE FRAKTURE .....	35
6.1. Podupirači .....	35
6.2. Optimalni geometrija frakture projektirana UFD metodom .....	36
6.2.1. Bezdimezionalna vodljivost frakture .....	37
6.2.2. Stopa penetracije u smjeru prodiranja frakture .....	37
6.2.3. Bezdimezionalni broj podupirača .....	38

6.2.4. Projektiranje frakturiranja UFD metodom.....	39
7. MODELIRANJE HIDRAULIČKE FRAKTURE 3D SIMULATOROM.....	40
7.1. Redosljed izvođenja operacija pri modeliranju frakture 3D simulatorom.....	40
8. ZAKLJUČAK .....	46
9. DODATAK .....	47
10. LITERATURA .....	52

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. - Režimi protjecanja fluida kroz ležište u bušotinu (Kurevija, 2016.) .....	7
Slika 2.2. - Linearni protok u pukotini .....	10
Slika 2.3. - Bilinearni protok kroz pukotinu.....	10
Slika 2.4. - Konvergencija strujnica fluida (Fekete, 2012).....	11
Slika 2.5. - RDT metoda testiranja ležišta .....	12
Slika 2.6. - Sferični protok (Fekete, 2012) .....	12
Slika 2.7. - Radijalni protok kroz ležište (Čikeš, 2013.) .....	13
Slika 2.8. - Ovisnot tipa protoka o radijusu ispitivanja (Fekete, 2012).....	14
Slika 2.9. - Protok kroz uska ležišta (Fekete, 2012).....	15
Slika 2.10. - Razlika između radijalnog protoka i protoka u uskim ležištima (Fekete, 2012) .....	15
Slika 3.1. - Shema operacije hidrauličkog frakutiranja.....	17
Slika 3.2. - Shematski prikaz frakture koja napreduje linearno prema PKN modelu (Kevrić, 1999.).....	20
Slika 3.3. - Shematski prikaz linearno napredujuće frakture prema KGD modelu (Kevrić, 1999).....	21
Slika 3.4. - Shematski prikaz frakture koja napreduje radijalno .....	22
Slika 4.1. - Tipični odaziv tlaka prilikom izvođenja DFIT-a (prema podacima iz Cramer i Nguyen, 2013) .....	23
Slika 4.2. - Polu-duljina frakture .....	26
Slika 4.3. - Linearni protok u pukotini prikazan na krivulji odaziva tlaka (Fekete, 2012.)	26
Slika 5.1. - DFIT u prvom intervala šejla (Cramer i Nguyen, 2013.).....	32
Slika 5.2. - DFIT u drugom intervala šejla (Cramer i Nguyen, 2013.).....	32
Slika 5.3. - G funkcija u prvom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.) .....	33
Slika 5.4. - G funkcija u drugom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.).....	33

Slika 5.5. - Određivanje početka pseudoradijalnog protjecanja u drugom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.) .....	34
Slika 6.1. - Podupirači unutar frakture .....	36
Slika 7.1. - Određivanje intervala pogodnog za frakturiranje (Pojednostavljeni rudarski projekt osvajanja i ispitivanja bušotine, Tehnička dokumentacija INA-e, 2013.) .....	40
Slika 7.2. - Odaziv tlaka prilikom testa izvedenog na terenu .....	41
Slika 7.3. - Podjela DFIT-a na cjeline .....	41
Slika 7.4. - Analiza G funkcije .....	42
Slika 7.5. - Usklađivanje predviđenih i stvarnih tlakova, vremena i volumena utiskivanja. ....	43
Slika 7.6. - Usklađeni predviđeni i stvarni tlakovi, vremena i volumen utiskivanja.....	43
Slika 7.7. - Veličine parametara tijekom frakturiranja .....	44
Slika 7.8. - Stvarna geometrija frakture.....	45
Slika 7.9. - Stvarna geometrija frakture 3D.....	45

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1 Podrežimi protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu.....	9
---	---



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_s$	$m^2$	površina poprečnog presjeka
$B$	$m^3/m^3$	obujamski faktor nafte
$C_{fD}$	-	bezdimenzionalna vodljivost popunjene pukotine
$c_p$	$Pa^{-1}$	stlačivost pora stijene
$c_r$	$Pa^{-1}$	stlačivost matriksa stijene
$c_t$	$Pa^{-1}$	ukupna stlačivost sustava
$G$	-	bezdimenzionalna vremenska funkcija
$G$	Pa	modul smicanja
$h$	m	visina
$h_f$	m	visina frakture
$I_x$	-	stopa penetracije u smjeru prodiranja frakture
$k$	$m^2$	propusnost
$k_f$	$m^2$	propusnost podupiračem popunjene pukotine
$k_h$	$m^2$	horizontalna propusnost
$k_v$	$m^2$	vertikalna propusnost
$L$	m	dužina
$m'$	-	nagib pravca
$N_{prop}$	-	bezdimenzionalni broj podupirača
$p$	Pa	tlak
$p_e$	Pa	tlak na granici drenažnog radijusa
$p_f$	Pa	tlak u ishodištu pukotine
$p_w$	Pa	tlak u bušotini
$q$	$m^3/s$	protok
$r_e$	m	drenažni radijus bušotine
$r_w$	m	radijus bušotine
$t$	h,m	vrijeme
$V_f$	$m^3$	volumen drenažnog područja bušotine
$V_p$	-	obujam šupljina stijene
$V_p$	$m^3$	obujam pornog prostora stijene
$V_{prop}$	$m^3$	volumen frakture ispunjene podupiračem

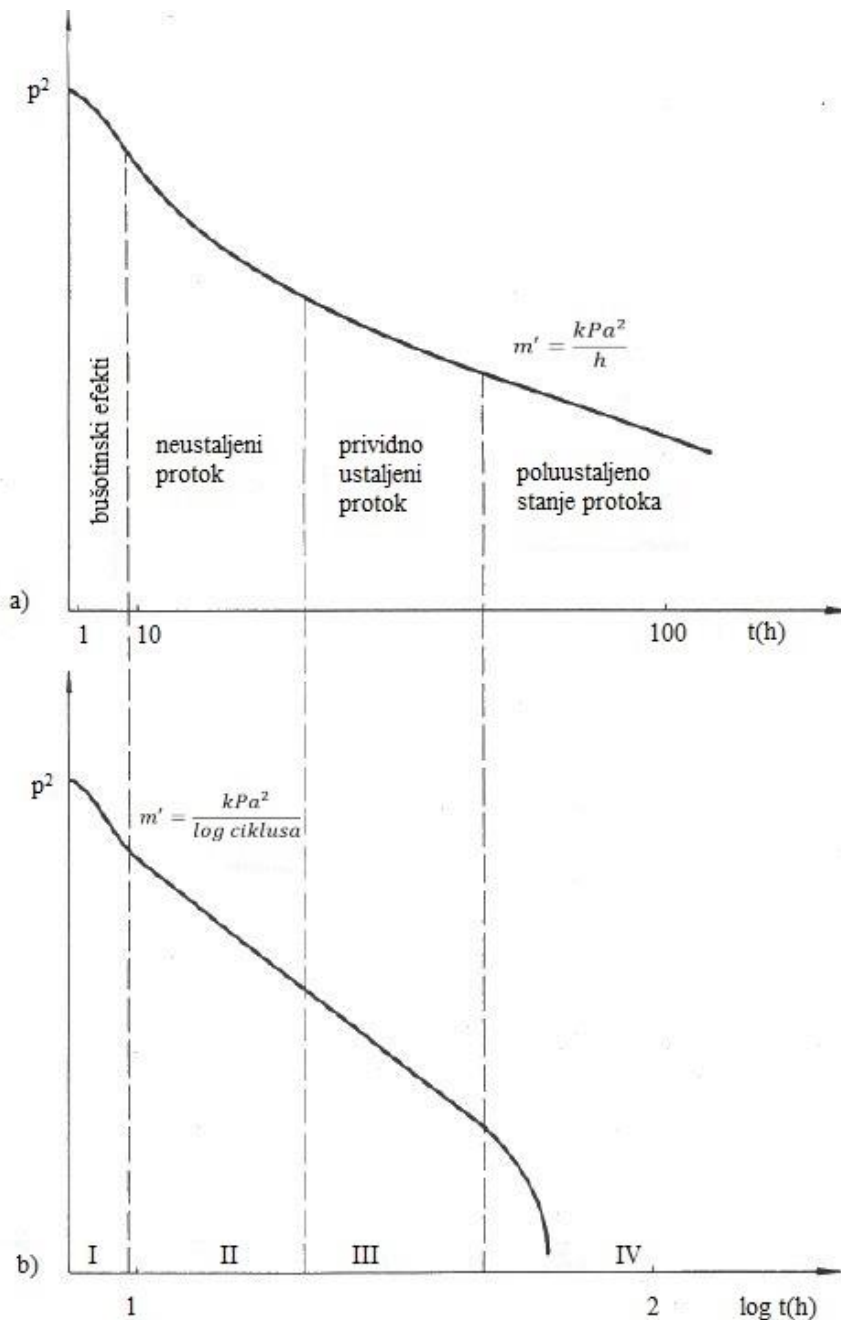
$V_r$	$m^3$	obujam krutog materijala stijene
$V_t$	-	ukupni obujam stijene
$w$	m	širina frakture
$x_e$	-	duljina drenažnog radijusa u smjeru pružanja pukotine
$x_f$	m	polu-duljina frakture
$z$	m	dubina pukotine
$\Delta p$	Pa	diferencijalni tlak
$\mu$	Pa $\times$ s	viskoznost
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\Phi$	-	poroznost

## 1. UVOD

U naftnom inženjerstvu, propusnost ležišne stijene jedan je od bitnijih parametara kod pridobivanja ležišnog fluida. Propusnost izravno utječe na indeks proizvodnosti bušotine te samu studiju isplativosti projekta. U hipotetskom slučaju kod dvije identične bušotine, sa istim drenažnim radijusom te istim ležišnim parametrima i parametrima ležišnog fluida (efektivna debljina, poroznost, viskoznost fluida), ona bušotina sa dva puta većom propusnosti, imati će dva puta veću proizvodnost, iz čega proizlazi da je proizvodnost bušotine proporcionalna propusnosti. Kako je stvarna propusnost ležišta često manja od pretpostavljene, što zbog oštećenja sloja i pribušotinske zone, čepljenja pora bušotine, i slično, na temelju tipa oštećenja sloja, donosi se odluka o stimulaciji ležišta. Jedan od načina stimulacije ležišta je i hidrauličko frakturiranje sloja kojim se stijena djelovanjem tlaka nestlačivog fluida hidraulički razbija, i stvara se protočna pukotina, kojom se povećava površina pritjecanja fluida u bušotinu, tj. povećava se kontaktna površina između bušotine i ležišta. Pri projektiranju operacije hidrauličkog frakturiranja, potrebno je odrediti ulazne parametre proračuna, od kojih važniju ulogu igraju tlak zatvaranja frakture (engl. *closure pressure*), efikasnost radnog fluida koji će se koristiti u operaciji frakturiranja, te tlaka loma stijene. Navedeni parametri mogu se dobiti iz dijagnostičkog testa frakturiranja (skr. *DFIT*), koji se vrši nekoliko dana prije izvođenja operacije hidrauličkog frakturiranja. Prilikom izvođenja dijagnostičkog testa frakturiranja, u ležištu se pojavljuju određeni režimi protjecanja fluida čije je razumjevanje i prepoznavanje bitno za interpretaciju testa, te nesmetan nastavak projektiranja optimalne hidrauličke frakture.

## 2. REŽIMI PROTJECANJA FLUIDAKROZ LEŽIŠTE

Prilikom protjecanja fluida kroz ležište uslijed razlike tlaka, javlja se nekoliko stanja protjecanja u ovisnosti o trajanju protoka i tlaku na vanjskoj granici ležišta. Kod interpretacije dobivenih parametara protoka, i tlakova, na temelju teorije protoka kroz poroznu sredinu, dobivaju se vrijednosti koje se iskorištavaju za utvrđivanje svojstava ležišta, veličine i granica ležišta, te protočnih karakteristika ležišta. Četiri režima koja se javljaju prilikom protjecanja fluida kroz ležište uslijed razlike tlaka, a koji se koriste kod hidrodinamičkih mjerenja prikazani su na slici 2.1.



Slika 2.1. - Režimi protjecanja fluida kroz ležište u bušotinu (Kurevija, 2016.)

Na slici 2.1. a) su prikazani režimi protjecanja u normalnom mjerilu gdje je na apscisi prikazano vrijeme u satima dok je na ordinati prikazan kvadrat tlaka,  $p$  (Pa ili bar). Na slici 2.1. b) su prikazani režimi protjecanja u polulogaritamskom mjerilu gdje je na apscisi prikazan logaritam vremena,  $t$  (h) dok je na ordinati prikazan kvadrat tlaka u Pa ili bar.

### **Prvi režim protjecanja fluida kroz ležište (bušotinski efekti)**

U prvom režimu protjecanja nakon otvaranja ili zatvaranja bušotine javljaju se bušotinski efekti punjenja ili pražnjenja bušotine koji u ovom režimu prevladavaju, te je zbog toga teško interpretirati podatke za druge podrežime koji se također javljaju u ovom režimu koji su opisani kasnije u radu.

### **Drugi režim protjecanja fluida kroz ležište (neustaljeni protok)**

Nakon prestanka utjecaja bušotinskog djelovanja, dolazi do režima koji je karakteriziran neustaljenim stanjem protjecanja fluida kroz ležište te se naziva "Neustaljeni protok". Karakterizira ga linearna ovisnost tlaka o logaritmu vremena, te se prilikom ovog režima protjecanja ne osjećaju granice ležišta.

### **Treći režim protjecanja fluida kroz ležište (prividno ustaljeni protok)**

U trećem režimu protjecanja dolazi do prividno ustaljenog režima protjecanja, a ono se javlja nakon drugog režima samo kada je dranažno područje bušotine nepravilnog oblika.

### **Četvrti režim protjecanja fluida kroz ležište (poluustaljeni protok)**

Nakon nekog vremena javlja se poluustaljeno režimu protjecanja gdje se javlja linearna ovisnost tlaka o vremenu, te se osjećaju granice ležišta i ustaljeni protok dugo traje. Isto tako kod ovog režim ne pojavljuje se protok na vanjskoj granici ležišta.

## **2.1. Podrežimi protjecanja**

Prilikom spomenuta četiri režima protjecanja, u svakom od njih se javljaju posebni podrežimi tijekom njihovog trajanja koji su prikazani u tablici 2.1.

**Tablica 2.1 Podrežimi protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu**

Prvi režim	Drugi režim	Treći režim	Četvrti režim
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efekt bušotine</li> <li>• Linearni protok u pukotini</li> <li>• Bilinearni protok u pukotini</li> <li>• Sferični protok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radijalni protok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protok kod nepropusne granice u ležištu</li> <li>• Protok u uskim ležištima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pseudostacionarni protok</li> <li>• Ustaljeni protok</li> </ul>

U nastavku rada kratko će biti opisan svaki od podrežima protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu.

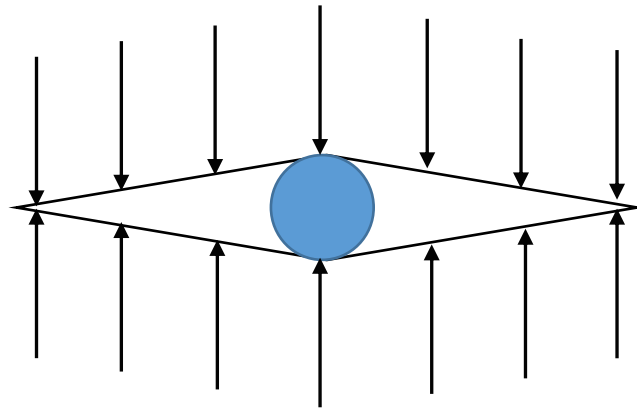
#### 2.1.1. Efekt bušotine

Efektom bušotine se smatra volumen slojnog fluida u kanalu bušotine koji se akumulirao u njemu pritjecanjem iz sloja nakon zatvaranja bušotine na površini do potpune ispunjenosti bušotine. Ta pojava uzrokuje da se promjene protoka (kapaciteta proizvodnje) na raskrivenoj površini sloja (stjenki kanala bušotine) događaju sporije nego promjene površinskog protoka. Kada je taj volumen znatan, njegov utjecaj se mora uzeti u obzir u analizama i interpretacijama ispitivanja bušotina u suprotnom može dovesti do pogrešnih i nepostojećih zaključaka o ležištu. Može se minimizirati zatvaranjem bušotine na dnu (engl. *Downhole shut-in*), gdje se prilikom izvođenja testa bušotina mehanički zatvori pakerom ili sličnom alatkom te se protok i tlakovi očitavaju u razini perforacija. (Cramer i Nguyen, 2013)

#### 2.1.2. Linearni protok u pukotini

Linearni protok u pukotini se javlja u hidraulički frakturiranim bušotinama kroz vrlo kratko vrijeme, u kojem je glavnina utoka radnog fluida u bušotinu posljedica ekspanzije fluida u pukotini, ali protok još nije razvijen po čitavoj duljini pukotine, pa ju se zbog toga može smatrati beskonačnom. Isto tako, propusnost frakture je dovoljno velika da je tlak u frakturi

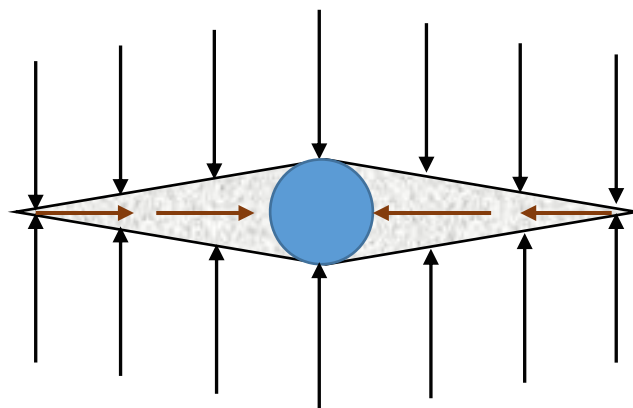
konstantan. Treba napomenuti da je trajanje linearnog protoka u pukotini vrlo kratko, te ga se često može zamijeniti utjecajem efekta bušotine. Shematski je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. - Linearni protok u pukotini

### 2.1.3. Bilinearni protok kroz pukotinu

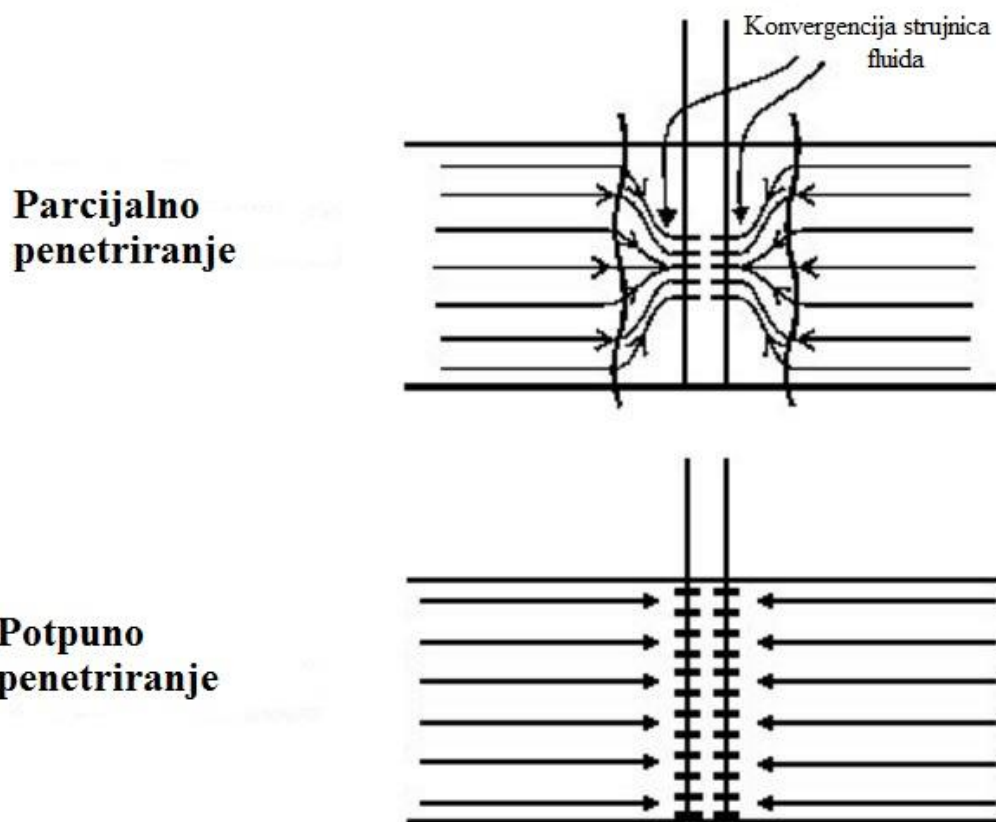
Bilinearni protok (slika 2.3.) u pukotini se javlja u hidraulički frakturiranim bušotinama kada je njena vodljivost konačna. U ovom podrežimu, javljaju se dva ista tipa protoka istodobno: linearni protok iz stijene u frakturu, te linearni protok iz frakture u bušotinu. Trajanje ovog protoka je određeno vremenom sve dok fluid koji utječe u bušotinu prispijeva iz ležišta, a efekt vrha frakture ne utječe na pad tlaka u bušotini.



Slika 2.3. - Bilinearni protok kroz pukotinu

#### 2.1.4. Sferični protok

Sferični protok nastaje kada vertikalna bušotina djelomično prodire kroz ležište, tj. kada bušotina u potpunosti ne prodire u formaciju, ili perforacije ne otvaraju cijelu formaciju. Ležišni fluid tada protiče vertikalno s linijama protoka konvergirajući prema dijelu bušotine koji je perforiran ili koji je djelomično u ležištu kao što je prikazano na slici 2.4. Sferični protok se također javlja prilikom testiranja bušotine metodom "na žici" sa raznim testerima gdje sonda testera penetrira u ležište te uzima uzorak fluida. Jedan od njih je "RDT tool" od Halliburtona koji je prikazan na slici 2.5. Kod sferičnog protoka, javlja se radijalni protok i u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. Shematski je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.4. - Konvergencija strujnica fluida (Fekete, 2012)

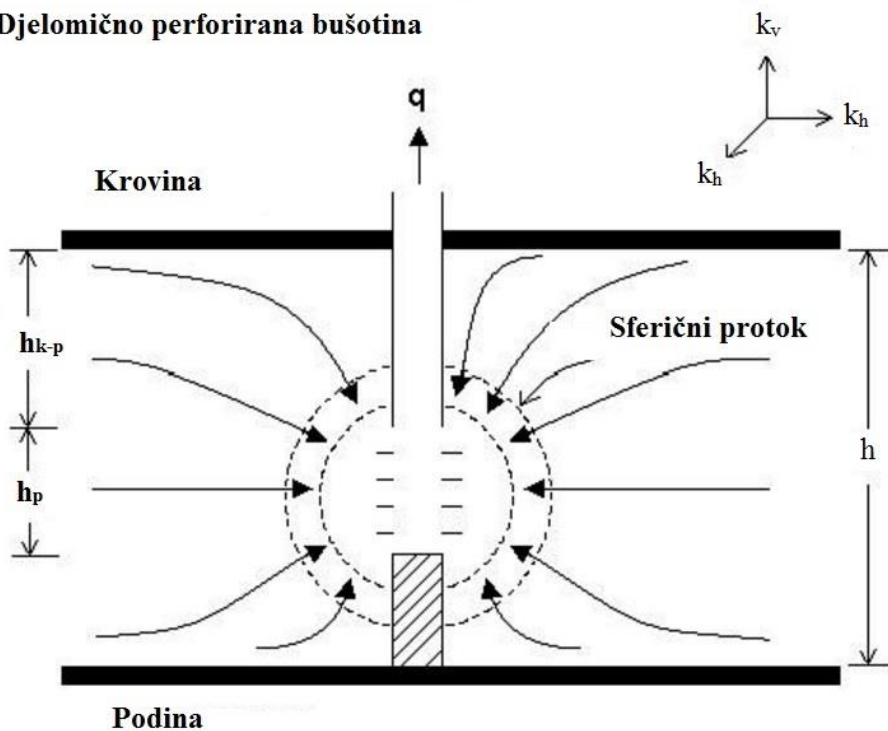




Slika 2.5. - RDT metoda testiranja ležišta

(URL:<https://i.ytimg.com/vi/Qd7F8T0IVXU/hqdefault.jpg>, 10/2016)

**Djelomično perforirana bušotina**

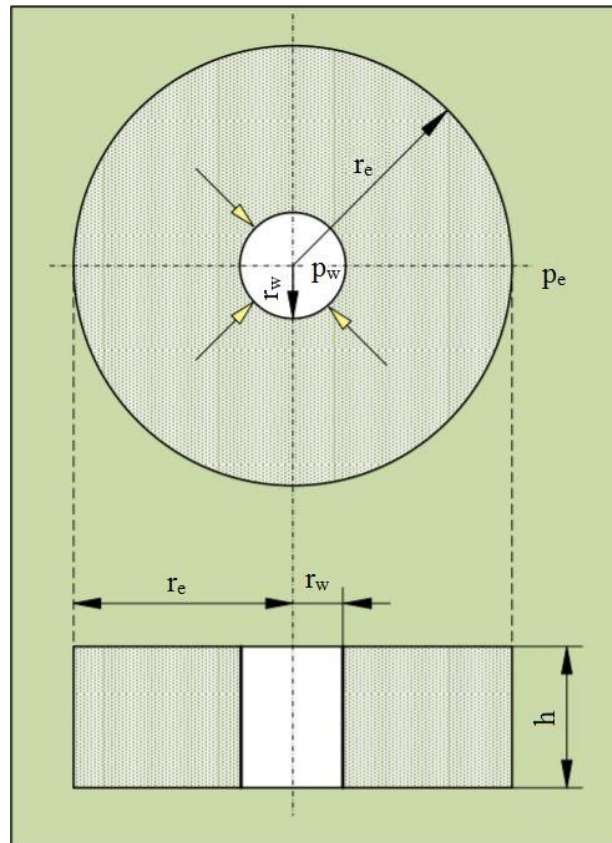


Slika 2.6. - Sferični protok (Fekete, 2012)

Kod drugog režima protjecanja iz tablice 2.1, podrežim koji se javlja je radijalni protok.

### 2.1.5. Radijalni protok

Prilikom radijalnog protoka, strujnice fluida su usmjerene horizontalno prema bušotini iz cilindričnog ležišta kako je prikazano na slici 2.7.. Ovaj tip protjecanja traje sve dok se ne dosegnu granice ležišta.



Slika 2.7. - Radijalni protok kroz ležište (Čikeš, 2013.)

Jednadžba stacionarnog radijalnog protoka za nestlačivi fluid glasi:

$$q = \frac{2\pi kh(p_e - p_w)}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad 2.1$$

Gdje su:

$q$  - obujamski protok fluida [ $m^3/s$ ]

$k$  - propusnost ležišta [ $m^2$ ]

$h$  - debljina ležišta [ $m$ ]

$p_e$  - tlak na vanjskoj granici ležišta [ $Pa$ ]

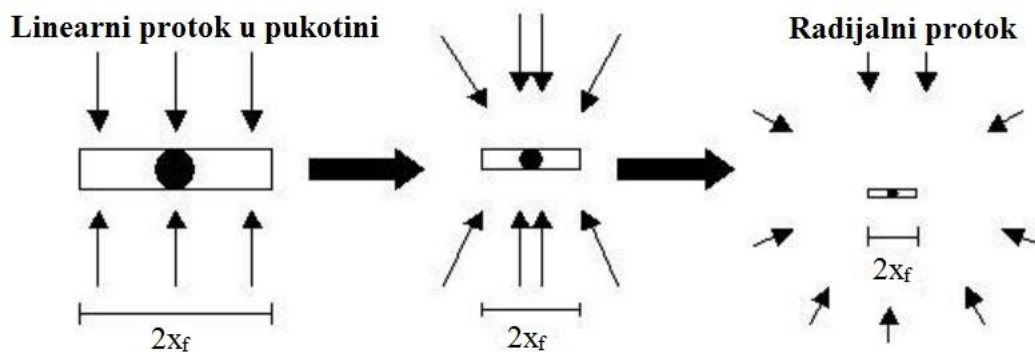
$p_w$  - tlak na unutarnjoj granici ležišta [ $Pa$ ]

$\mu$  – viskoznost fluida [ $Pa \times s$ ]

$r_e$  – drenažni radijus bušotine [ $m$ ]

$r_w$  – radijus bušotine [ $m$ ]

Radijalni protok se često promatra i kod drugih režima protjecanja. Za primjer se može uzeti linearni protok u pukotini. Ukoliko je radijus ispitivanja bušotine malen, promatrati će se linearni protok u pukotini, a kada radijus ispitivanja postane veći od polu-duljine frakture, protok postaje radijalan što je prikazano na slici 2.8.



Slika 2.8. - Ovisnot tipa protoka o radijusu ispitivanja (Fekete, 2012)

Kod trećeg režima protjecanja iz tablice 2.1, podrežimi koji se javljaju su: protok kod nepropusne granica u ležištu (engl. *single no-flow boundary*) te protok u uskim ležištima (engl. *linear channel flow*).

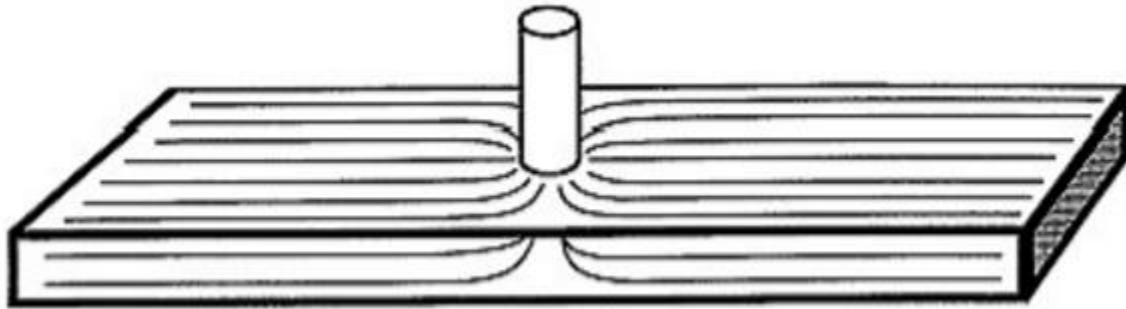
#### 2.1.6. Protok kod nepropusne granica u ležištu

Protok kod nepropusne granice u ležištu javlja se kada je bušotina smještena u blizini prepreke koja ne dopušta protjecanje. Prepreka može biti fizičke prirode kao rasjed, ili može biti uzrokovana kada su dvije proizvodne ili utisne bušotine neposredno jedna pokraj druge.

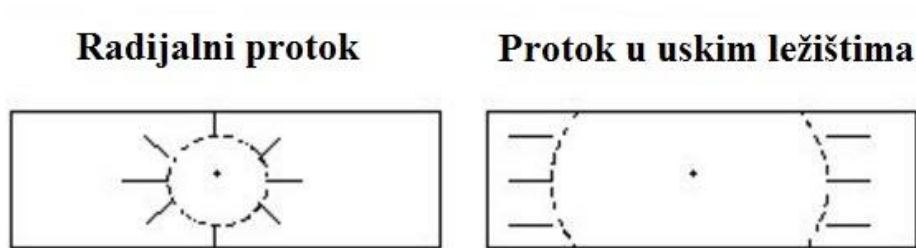
#### 2.1.7. Protok u uskim ležištima

Protok u uskim ležištima (engl. *linear channel flow*) javlja se u dugim, uskim ležištima ili u ležištima nepravilnog oblika (slika 2.9). Pri početku protjecanja kada radijus ispitivanja nije još dosegao granice ležišta, protok se smatra radijalnim. Kada se dosegne bliža granica

ležišta, a dalja još nije dosegnuta, protok se može smatrati protokom u uskom ležištu (slika 2.10.).



Slika 2.9. - Protok kroz uska ležišta (Fekete, 2012)



Slika 2.10. - Razlika između radijalnog protoka i protoka u uskim ležištima (Fekete, 2012)

Kod četvrtog režima protjecanja iz tablice 2.1, podrežimi koji se javljaju su: pseudostacionarni protok i ustaljeni protok.

#### 2.1.8. Pseudostacionarni protok

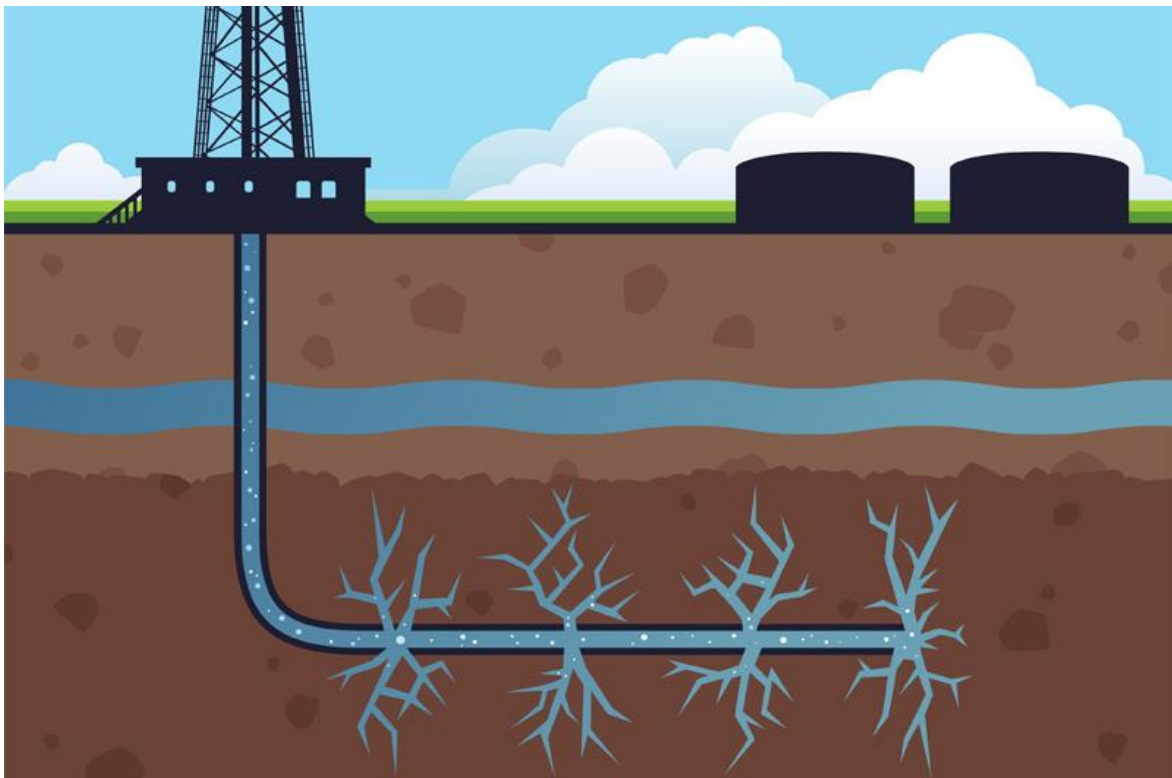
Pseudostacionarni protok je režim protjecanja u ležištu koji se pojavljuje u slučaju kada su uvjeti protjecanja takvi da prilikom proizvodnje, tlak pada linearno s vremenom ili direktno proporcionalno s proizvodnjom na bilo kojem mjestu u ležištu, te je vrijeme pada tlaka direktno proporcionalno kapacitetu proizvodnje iz ležišta i obratno proporcionalna drenažnom radijusu ležišta. Javlja se kada ležište proizvodi konstantnim kapacitetom tijekom dovoljno dugog razdoblja da se taj utjecaj prenese na cijelo ležište što uzrokuje konstantnu promjenu tlaka s vremenom na svim mjestima u ležištu, kod svih radijusa ležišta. Kada dinamički tlak na dnu bušotine postigne ravnotežu, ostaje konstantan za određeni kapacitet proizvodnje. U životnom ciklusu proizvodne bušotine, najveći dio proizvodnog vijeka bušotina proizvodi u režimu pseudostacionarnog protoka. (Slider 1966.; Collins; 1991.)

### 2.1.9. Ustaljeni protok

Ustaljeni protok se javlja u ležištu kada postoji konstantan tlak na vanjskoj granici ležišta. To se događa kod ležišta koja se napajaju energijom iz akvifera ili plinske kape. U ovom režimu protjecanja, pad tlaka ne ovisi o vremenu jer je protok fluida u jednoj točki sustava jednak protoku u bilo kojem dijelu sustava, tj. protok kroz cijeli sustav ostaje konstantan s vremenom. Dakle, neko ležište je pri ustaljenom režimu kada nema akumuliranja materijala niti u jednoj točki ležišta (protok u ležište mora biti jednak protoku iz ležišta)

### 3. TEORIJA HIDRAULIČKOG FRAKTURIRANJA

Operacija hidrauličkog frakturiranja je postupak pri kojem se u stijenama djelovanjem tlaka nestlačivog fluida stvara protočna pukotina, kojom se povećava površina pritjecanja fluida u bušotinu, tj. povećava se kontaktna površina između bušotine i ležišta (slika 3.1.). Time se prividno povećava efektivni polumjer bušotine, čime se smanjuje pad tlaka pri protjecanju fluida u ležištu. Zbog toga se frakturiranjem bušotine povećava indeks proizvodnosti te se povećava iscrpak ležišta.



Slika 3.1. - Shema operacije hidrauličkog frakturiranja

(URL: <http://crackerjackfinance.com/2014/04/time-to-go-global-with-hydraulic-fracturing-investments/>, 4/2014)

Tijekom hidrauličkog frakturiranja tlak radnog fluida u bušotini se povećava dok god naprezanja u stijenama oko bušotine ne prijeđu minimalnu granicu tečenja te dolazi do stvaranja pukotina. Radni fluid u sebi sadrži podupirače pukotina koji trebaju osigurati željenu propusnost nakon pada tlaka, tj. uklanjanja radnog fluida. Rezultati operacije frakturiranja mogu biti u rasponu od nemogućnosti dobivanja povećane proizvodnje, pa sve do izvanrednih uspjeha. U svim slučajevima međutim ostaje neizvjesno hoće li odabrane vrijednosti za

operativne parametre kao što su stopa utiskivanja radnog fluida, trajanje utiskivanja i viskoznost radnog fluida biti optimalni, te se zbog toga prije izvođenja operacije na terenu pristupa računalnim simulacijama, na način koji će biti prikazan u kasnijem poglavlju ovog rada.

Nakon tlaka loma stijene, visina frakture se formira okomito na smjer najmanjeg glavnog naprežanja stijene, a smjer njenog napredovanje je u smjeru najmanjeg glavnog naprežanja stijene (horizontalno). Nakon nastanka frakture, njena svojstva se mogu dobiti iz testova porasta tlaka (engl. *Build up pressure test*) ili pada tlaka (engl. *Drawdown pressure test*).

Prema Perkinsu i Kernu (1961.), u ranim fazama korištenja frakturiranja, najznačajniji parametar tijekom frakturiranja je bila rasprostranjenost frakture, tj. njena geometrija (visina, širina i duljina), a također je došlo do povećavanja trenda uporabe većih čestica podupirača pukotina (engl. *proppant*). Geometrija frakture usko je povezana s volumenom fluida za frakturiranje, tlakom frakturiranja, tempom utiskivanja fluida za frakturiranje, količinom podupirača koji se utiskuje i reološkim svojstvima fluida.

### 3.1. Osnovni matematički modeli formiranja pukotina

Prema Economidesu i Nolteu (1989), u linearno elastičnim stijenama, na temelju ravninskog stanja deformacije, u svim paralelnim ravninama deformacije su neovisne u susjednim ravninama. Iz toga su razvijeni dvodimenzionalni modeli formiranja pukotine za pukotine većih dimenzija iz razloga jer se osnovna teorija dvoosnog stanja naprežanja ne može primjeniti za frakture većih dimenzija. Osnovni dvodimenzionalni modeli su:

- PKN model (Perkins i Kern, 1961; Nordgen, 1972)
- KGD model (Kristijanovič-Geertsma-de Klerk, 1969.)
- Radijalni model.

Svaki od ovih modela se zasniva na određenim pretpostavkama koje su specifične za svaki model.

### 3.1.1. PKN model

Postoji 5 pretpostavki na kojima se zasniva PKN model vertikalne linearne frakture, a to su:

1. visina frakture je konstantna neovisno o njenoj duljini,
2. tlak fluida u pukotini konstantan je u vertikalnim poprečnim presjecima pukotine u smjeru njenog napredovanja,
3. vertikalni presjek frakture u bilo kojoj točki je eliptičnog oblika što proizlazi iz formule:

$$w(z) = \frac{(1-\nu)h_f\Delta p_f}{G} \times \sqrt{1 - \left(\frac{2z}{h_f}\right)^2} \quad 3.1$$

gdje su:

$w(z)$  – širina pukotine u smjeru z osi [m]

$\nu$  – Poissonov koeficijent

$h_f$  – visina pukotine [m]

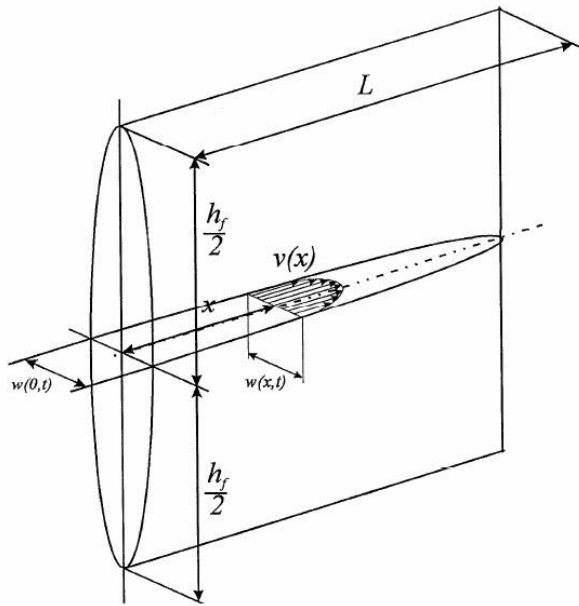
$\Delta p_f$  – razlika tlaka u ishodištu pukotine [Pa]

$G$  – Modul smicanja [Pa]

$z$  – dubina pukotine [m]

4. gradijent tlaka fluida u smjeru napredovanja frakture određen je otporom protjecanju fluida u uskom kanalu eliptičnog presjeka,
5. Gubitak fluida iz pukotine u ležište može se zanemariti, a ujedno se može zanemariti i utjecaj širenja pukotine na protok. Volumni protok fluida uzduž pukotine, tj. kroz poprečni presjek pukotine, tada je konstantan.





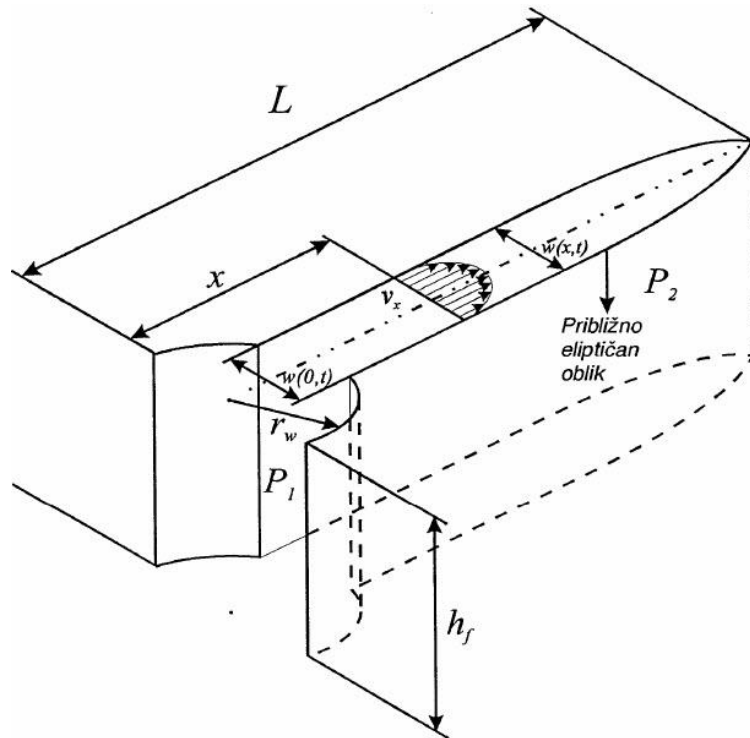
Slika 3.2. - Shematski prikaz frakture koja napreduje linearno prema PKN modelu (Kevrić, 1999.)

### 3.1.2. KGD model

Pretpostavke na kojima se temelji KGD model su:

1. visina frakture je konstantna, sa pravokutnim uzdužnim presjekom te ne ovisi o duljini frakture,
2. širina frakture je neovisna o njevoj visini, osim za slučaj kada je definiran utok fluida, te je tada širina frakture funkcija omjera protoka i visine,
3. gradijent tlaka, o kojem ovisi napredovanje frakture, određen je otporom protjecanja newtonskog fluida u uskom kanalu, pravokutnog poprečnog presjeka, čija se širina mijenja u smjeru napredovanja frakture.

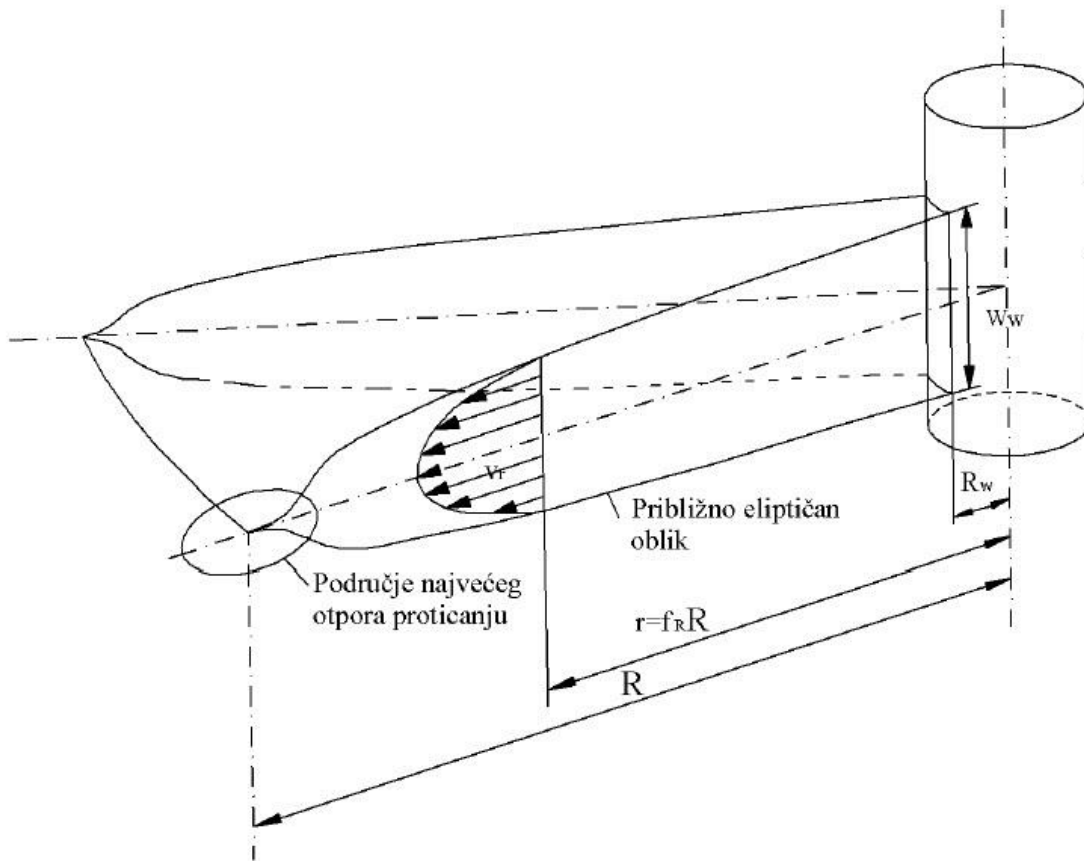
KGD model je razvijen na temelju koncepta mobilne ravnoteže pukotine gdje fluid koji se utiskuje u frakturu nikad ne dotiče njen vrh. Ukoliko tome pridodamo izraz za širinu frakture koji su iznijeli England i Green dolazimo do KGD modela koji je shematski prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3. - Shematski prikaz linearno napredujuće frakture prema KGD modelu (Kevrić, 1999)

### 3.1.3. Radijalni model

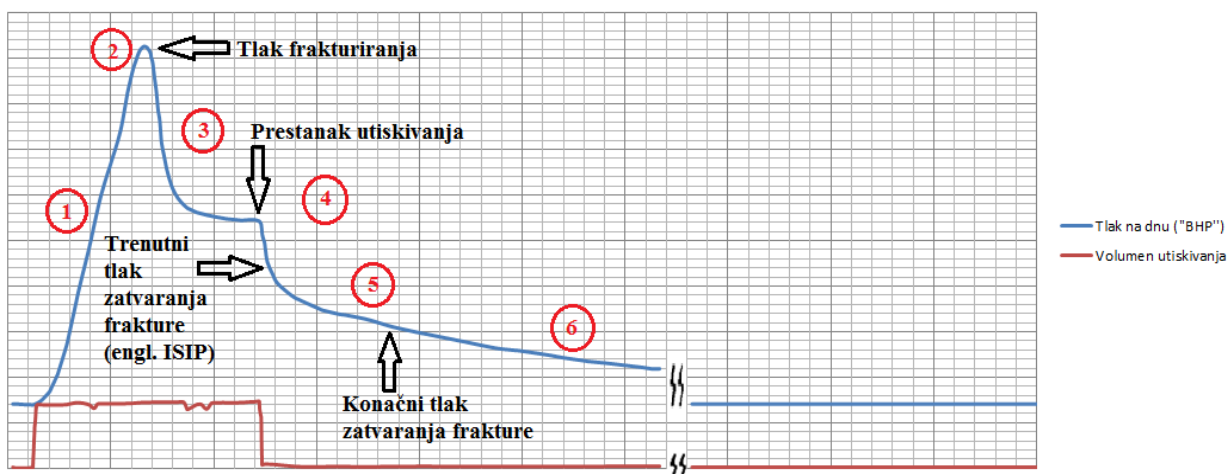
Kod radijalnog modela, tj. u slučaju kad vertikalnih barijera uopće nema, raspodjela tlaka u osnovi je ista kao i kod KGD modela, te nema granica koje određuju visinu frakture.



Slika 3.4. - Shematski prikaz frakture koja napreduje radijalno

#### 4. DIJAGNOSTIČKI TEST FRAKTURIRANJA

Dijagnostički test frakturiranja (engl. *Diagnostic Fracture Injection Test*) u daljnjem tekstu DFIT, je hidrodinamički test koji se provodi u konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima kada je potrebno odrediti ležišne parametre koji su usko vezani uz operaciju hidrauličkog frakturiranja. DFIT se u konvencionalnim ležištima izvodi kako bi se na relativno brz i jednostavan način odredili parametri ležišta, od kojih je najbitniji tlak zatvaranja frakture (engl. *fracture closing pressure*'), koji u operacijama frakturiranja u konvencionalnim ležištima igraju bitnu ulogu u projektiranju istog. Test je valjan ukoliko se izvodi u bušotini ispunjenoj vodom ili nekim drugim radnim fluidom, bez prisutnog plina. Tipični redoslijed ispitivanja prilikom izvođenja DFIT-a je prikazan na slici 4.1. (Cramer i Nguyen, 2013)



Slika 4.1. - Tipični odaziv tlaka prilikom izvođenja DFIT-a (prema podacima iz Cramer i Nguyen, 2013)

Opis izvođenja testa:

1. Površinska pumpa uspostavlja konstantni protočni kapacitet prilikom čega tlak na formaciju raste.
2. Nakon određenog vremena, doseže se tlak loma stijene prilikom kojega dolazi do stvaranja i širenja frakture u ležištu.
3. Utiskivanje s konstantnim količinama radnog fluida se nastavlja dok se ne postigne stabilizacija tlaka na bušotinskoj glavi (preko koje se utiskuje fluid), to jest dok se očitani tlak na bušotinskoj glavi mijenja jako sporo i ne oscilira.
4. Prestaje se s utiskivanjem, što rezultira trenutnim tlakom zatvaranja frakture (engl. *instantaneous shut-in pressure*; ISIP), koji je jednak padovima tlaka uzrokovanih trenjem između fluida i stjenki bušotine i fluida i stjenki frakture.

5. Zatim se pad tlaka promatra kako bi se uočili znakovi zatvaranja frakture koje se javlja kod tlaka koji se uzima jednakim minimalnom glavnom tlaku naprezanja stijene ( $Sh_{min}$ ). Treba napomenuti kako se iz prikazanog dijagrama ne može automatski utvrditi tlak zatvaranja frakture već ga se može iščitati iz nekog od nastalih dijagrama iz podataka dobivenih iz DFIT-a, ovisno koja se metoda analize podataka koristi. U ovom radu će se pobliže opisati bezdimenzionalna "G-funkcija" koja služi kako bi se linearizirao odaziv tlaka tijekom prodora radnog fluida iz frakture. Tlak zatvaranja frakture, može se iščitati iz analize "G-funkcije", te samo je jedna od metoda analize tlaka i vremena zatvaranja frakture.
6. Period nakon zatvaranja frakture se analizira kako bi se uočili znakovi pseudolinearnog protjecanja i pseudoradikalnog protjecanja da bi se iz njihovih vrijednosti mogle izračunati potrebni parametri (hidraulička provodnost i početni ležišni tlak), koji se razlikuju od testa do testa.

Prilikom planiranja DFIT-a, osnovna pitanja na koja treba odgovoriti su:

1. Koji fluid će se koristiti prilikom izvođenja testa?
2. Kojim protočnim kapacitetom pumpe će se vršiti utiskivanje?
3. Koliko dugo će se utiskivati?
4. Koliko dugo treba čekati nakon prestanka utiskivanja?

Da bi se mogli dobiti odgovori na ova pitanje, treba se ustvrditi svrha provođenja ispitivanja.

Prema Crameru i Nguyenu, kod DFIT-a postoje dva cilja ispitivanja:

1. Parametri potrebni za projektiranje izvođenja operacije hidrauličkog frakturiranja: tlak zatvaranja frakture, koeficijent "curenja" (engl. *Leak-off coefficient*) radnog fluida te efektivnost radnog fluida.

Ova tri parametra karakteriziraju napredovanje frakture isto kao i njeno zatvaranje te su čitljivi iz testa do trenutka zatvaranja frakture (engl. *Pre-Closure Analysis*). U svrhu što točnijeg planiranja operacije frakturiranja, fluid korišten u DFIT-u bi se trebao koristiti i u operaciji frakturiranja.

2. Parametri ležišta: propusnost ležišta i početni ležišni tlak.

Ovi parametri se mogu koristiti u brojnim, ako ne i u svim situacijama i ostalim proračunima vezanim za ležišno i proizvodno inženjerstvo, s obzirom da su to isti parametri koji se koriste u Darcy-jevoj jednadžbi. U svrhu njihovog dobivanja, ponašanje tlaka poslije tlaka zatvaranja frakture trebalo bi se pomno pratiti i analizirati.

Fluid koji se koristi prilikom ovog ispitivanja ne utječe na rezultate ispitivanja, ali djeluje na vrijeme potrebno za postizanje radijalnog protoka bez kojega nije moguće izračunati dobivene parametre, te se ukoliko su potrebni samo parametri ležišta, obično koristi slana voda (engl. *Brine*).

Kod izvođenja DFIT-a, početak pseudoradijalnog protoka može se predočiti sljedećom jednažbom (Cramer i Nguyen, 2013.)

$$t = \frac{\phi \times c_t \times \mu \times x_f^2}{0.000264 \times k} \quad 4.1$$

gdje je:

$t$  - vrijeme [s]

$k$  - propusnost, [ $m^2$ ]

$\mu$  - viskoznost utisnog fluida, [ $Pa \times s$ ]

$\phi$  - poroznost [—]

$c_t$  - ukupna stlačivost sustava [ $Pa^{-1}$ ]

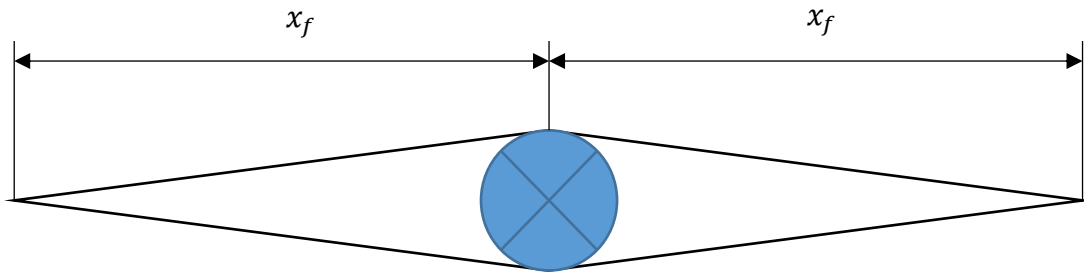
$x_f$  - polu-duljina frakture [ $m$ ]

#### 4.1. Parametri potrebni za izračun početka vremena pseudoradijalnog protjecanja

Za izračun vremena početka pseudoradijalnog protoka, što može u većini slučajeva značajno skratiti vrijeme testiranja (čekanje na početak pseudoradijalnog protoka), a samim time i donijeti značajne uštede, parametre iz jednažbe 4.1 potrebno je procijeniti na različite načine.

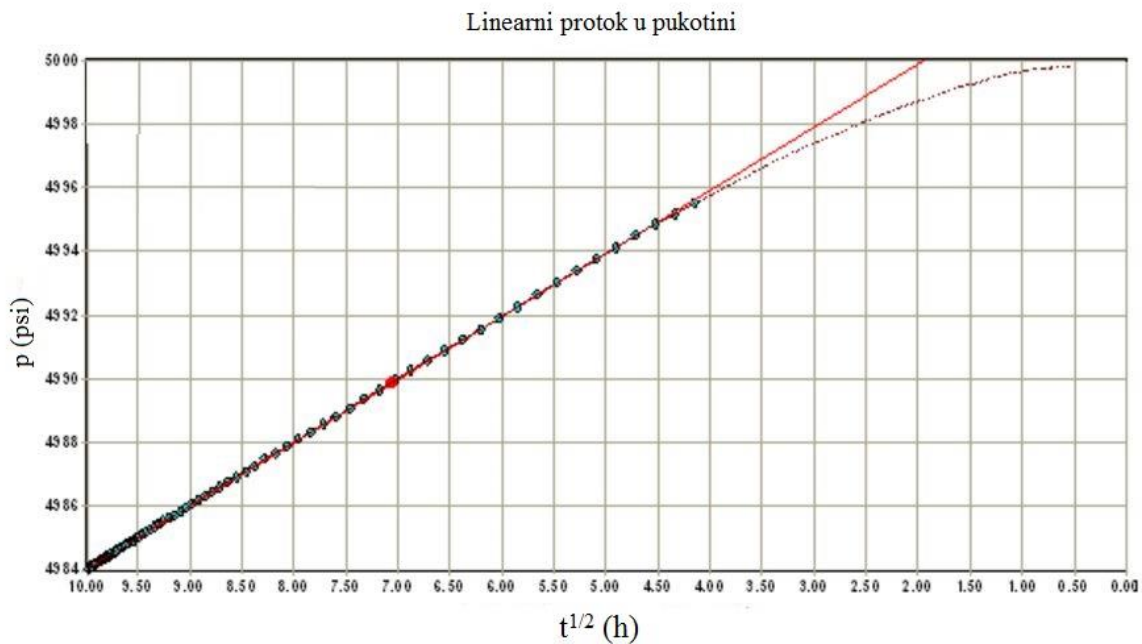
##### 4.1.1. Polu-duljina frakture

Hidraulički stvorena fraktura najčešće se modelira uz pretpostavku da se proteže pravocrtno podjednako na svakoj strani bušotine, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 4.2. - Polu-duljina frakture

Kao što je prikazano, polu-duljina frakture je udaljenost vrha frakture od osi bušotine do vrha frakture. Polu-duljina frakture ovisi o vrsti operacije obrade sloja frakturiranjem, te tlakovima frakturiranja i može varirati od svega nekoliko centimetara, pa do više stotina metara. Kod ispitivanja bušotina pri prijelaznom režimu (engl. *Pressure transient test*) polu-duljina frakture u hidraulički frakturiranoj bušotini može se procijeniti iz analiza linearnog protoka u pukotini. Pri testiranju metodom porasta tlaka, linearni protok u pukotini će se rasprostirati pravocrtno na polulogaritamskom dijagramu tlaka i korijena vremena kako je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3. - Linearni protok u pukotini prikazan na krivulji odaziva tlaka (Fekete, 2012.)

Nagib pravca (m) se koristi kako bi se izračunao umnožak polu-duljine frakture te korijena propusnosti (Fekete, 2012):

$$X_f \sqrt{k} = 4.064 \frac{qB\mu}{mh\sqrt{\Phi\mu c_t}} \quad 4.2$$

Gdje su:

$X_f$  – polu-duljina frakture [ $m$ ]

$k$  – propusnost [ $m^2$ ]

$q$  – protok [ $m^3/s$ ]

$B$  – obujamski faktor [ $m^3/m^3$ ]

$\mu$  – viskoznost [ $Pa \times s$ ]

$m$  – nagib pravca

$h$  – visina [ $m$ ]

$\Phi$  – poroznost

$c_t$  – stlačivost stijena [ $Pa^{-1}$ ]

Propusnost se može dobiti na različite načine što će biti navedeno u daljnjem radu, te kada je ona određena, polu-duljina frakture se može odrediti izrazom (Fekete, 2012):

$$X_f = \frac{X_f \sqrt{k}}{\sqrt{k}} \quad 4.3$$

#### 4.1.2. Propusnost

Propusnost ležišta je svojstvo poroznog medija (u ovom slučaju ležišne stijene) da omogući protjecanje fluida uzrokovano razlikom tlakova između dvije točke promatranog dijela medija. Analiziranjem ponašanja fluida u poroznoj sredini te eksperimentalnim istraživanjima, Henry Darcy (1856.) je ustanovio određene zakonitosti te ih opisao kako slijedi:

$$q = -k \times \left(\frac{A_s}{\mu}\right) \times \left(\frac{dP}{dx}\right) \quad 4.4$$

gdje su:

$\Delta p$  – razlika tlakova (razlika visine stupaca ulaznog i izlaznog manometra), [ $Pa$ ]

$q$  – volumetrijski protok vode, [ $m^3/s$ ]

$A_s$  – površina poprečnog presjeka uzorka, [ $m^2$ ]

$l$  – duljina uzorka, [ $m$ ]

$k$  – propusnost uzorka, [ $m^2$ ]

$\mu$  – viskoznost fluida, [ $Pa \times s$ ]

Može se odrediti iz hidrodinamičkih mjerenja primjenom različitih testova, laboratorijskim ispitivanjima na jezgrama, iz karotaže metodom nuklearne magnetske rezonancije, statistički iz



neutronske karotaže i poroznosti. Iz svih ovih načina potrebno je procijeniti koja vrijednost će dati najbolje rezultate uz najmanje troškove što prelazi u okvire vođenja projekta.

### **Poroznost**

Poroznost stijene je definirana kao dio skladišnog kapaciteta stijene (pornog obujma) koji može sadržavati fluide. Dakle, poroznost je definirana kao omjer obujma šupljina,  $V_p$ , i ukupnog obujma stijene  $V_t$ , tj. kao:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t} \quad 4.5$$

U stijeni je uvijek jedan dio pora biti izoliran, odnosno nepovezan s ostalim šupljinama, te se zbog toga pojavljuju dvije vrste poroznosti:

- Apsolutna poroznost i
- Efektivna poroznost.

Apsolutna poroznost je definirana kao omjer ukupnog obujma šupljina u stijeni (ukupnog pornog obujma) i ukupnog obujma stijene, dok je efektivna poroznost definirana kao omjer obujma povezanih šupljina u stijeni i ukupnog obujma stijene.

Poroznost se može dobiti različitim karotažnim ispitivanjima, te uzorkovanjem, nakon kojega se vrše testovi koji se svode na izračun ukupnog volumena stijene, te volumena pora i volumena zrna, kako bi se prema gore navedenoj formuli mogla izračunati efektivna poroznost.

### **Ukupna stlačivost sustava**

Pokrovne stijene imaju svoju određenu masu, te prouzrokuju petrostatski tlak na ležišne stijene na dubini na kojoj zalijegaju. Taj tlak može varirati od područja do područja, a ovisi o dubini, geološkoj prirodi ležišta, konsolidiranosti ležišta, te o njenoj geološkoj starosti. Najvažniji parametar za vrijednost petrostatskog tlaka je dubina ležišta koja izravno utječe na vrijednost petrostatskog tlaka i tipična vrijednost njegovog gradijenta je približno 0,225 bara/m (22,5 kPa/m). (Čikeš, 2013.) Težina pokrovnih stijena jednostavno djeluje kao tlačna sila na ležišne stijene. Tlak u pornom prostoru stijene normalno je niži od petrostatskog tlaka. Ukoliko je ležišna stijena dovoljno konsolidirana, te se dio petrostatskog tlaka ne prenosi na nju, tipična vrijednost gradijenta pornog tlaka, kojeg se obično naziva i ležišnim tlakom, je približno 0,1 bar/m (10 kPa/m). Razlika između petrostatskog i ležišnog tlaka naziva se efektivni petrostatski tlak. Prilikom proizvodnje ležišnog fluida, ležišni tlak se smanjuje (ako se ne koristi metoda

održavanja ležišnog tlaka preko utisnih bušotina), zbog čega raste efektivni petrostatski tlak. Posljedica toga su sljedeća dva efekta:

1. ukupni obujam ležišne stijene se smanjuje i
2. obujam zrna od kojeg je stijena izrađena unutar pornog prostora se povećava.

Ove dvije promjene nastoje smanjiti porni prostor stijene, a time i poroznost.

Kada se govori o stlačivosti stijene, treba razlučiti tri različite vrste stlačivosti u stijenama:

1. Stlačivost matriksa stijene je definirana kao promjena obujma čvrstog stijene po jedinici promjene tlaka što se matematički može izraziti kao:

$$c_r = -\frac{1}{V_r} \left( \frac{\delta V_r}{\delta p} \right)_T \quad 4.6$$

gdje su:

$c_r$  – stlačivost matriksa stijene [ $Pa^{-1}$ ]

$V_r$  – obujam krutog materijala stijene [ $m^3$ ]

$T$  – označava da se derivacija uzima pri konstantnoj temperaturi, tj. da se radi o izotermnoj stlačivosti.

2. Ukupna stlačivost stijene je definirana kao promjena ukupnog obujma stijene po jedinici promjene tlaka što se matematički može izraziti kao:

$$c_t = -\frac{1}{V_t} \left( \frac{\delta V_t}{\delta p} \right)_T \quad 4.7$$

3. Stlačivost pora stijene je definirana kao promjena pornog obujma stijene po jedinici promjene tlaka što se matematički može izraziti kao:

$$c_p = -\frac{1}{V_p} \left( \frac{\delta V_p}{\delta p} \right)_T \quad 4.8$$

Za većinu ležišta, stlačivost matriksa i ukupna stlačivost stijene su puno manje u usporedbi sa stlačivosti pora stijene, stoga se pod pojmom stlačivost ležišne stijene  $c_t$  obično podrazumjeva ukupna stlačivost ležišne stijene koju se uzima jednakom stlačivosti pora.

Ukupna stlačivost sustava može se dobiti izvođenjem testova u laboratoriju na uzorcima stijena što obično povećava troškove ako uzorkovanje i testiranje uzorka nije planirano projektom, stoga se često pristupa izračunu preko korelacija.

### **Viskoznost fluida**

Dobiva se u laboratoriju pod cijelim nizom određenih tlakova i temperatura ili preko različitih korelacija

## 5. ANALIZA DFIT-A

Analiza DFIT testa može se generalno podijeliti u dva dijela:

1. Analize prije zatvaranja frakture (engl. *Pre-Closure Analysis*);
2. Analize poslije zatvaranja frakture (engl. *After-Closure Analysis*).

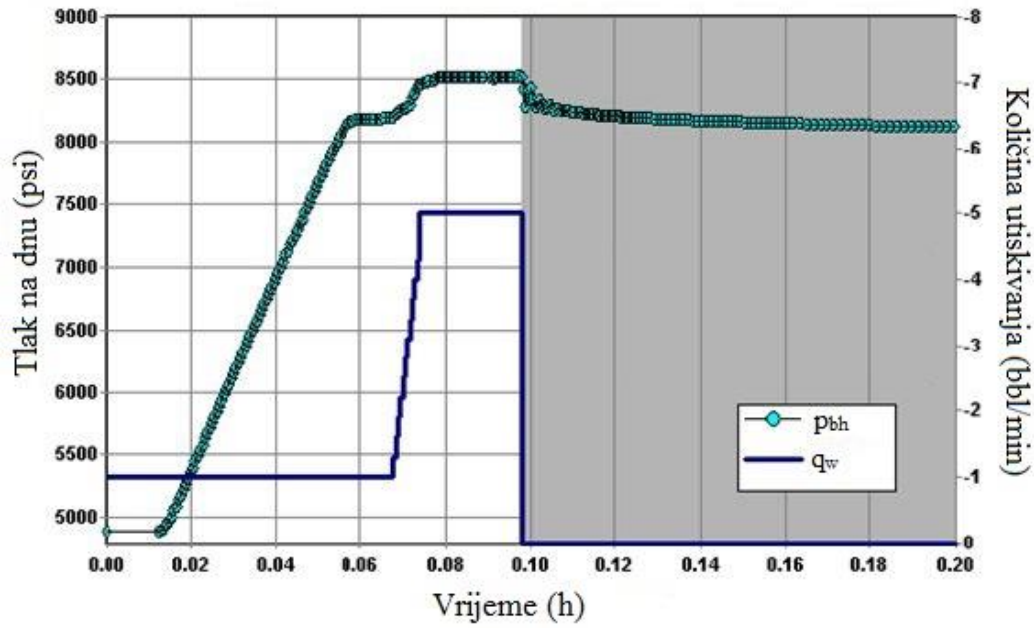
Analize prije zatvaranja frakture se sastoje od isčitavanja početka zatvaranja frakture te analiziranja pada tlaka prilikom zatvaranja frakture.

Pri projektiranju frakturiranja, jedan od najbitnijih parametara je tlak zatvaranja frakture, koji je jednak minimalnom naprezanju u stijeni potrebnom da se ona otvori. Tlak zatvaranja frakture treba razlikovati od tlaka loma, koji je jednak potrebnom tlaku fluida da inicijalno stvori frakturu. Kako tlak zatvaranja nije direktno vidljiv s odaziva tlaka prilikom testiranja upotrebljava se analiza G-funkcije kako bi se tlak zatvaranja frakture odredio iz krivulje odaziva tlaka prilikom testa.

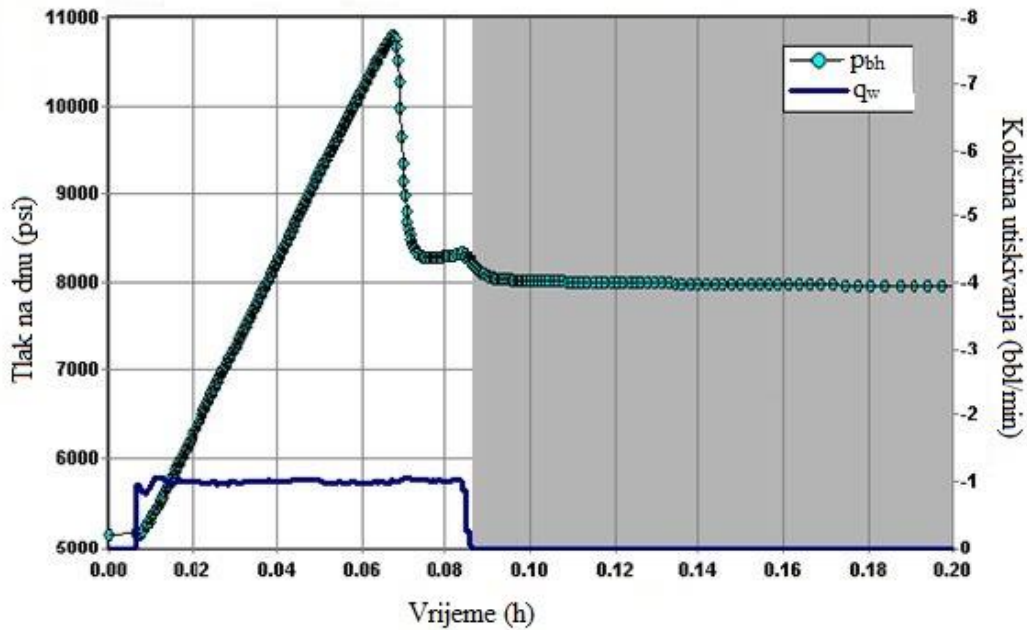
### 5.1. Analiza G funkcije

Analiza G funkcije se vrši u analizi prije zatvaranja frakture. G funkcija je funkcija bezdimenzionalnog vremena, dizajnirana kako bi linearizirala odaziv tlaka tijekom prodora radnog fluida iz frakture (engl. *Leakoff mechanism*). Prilikom analize G funkcije, potrebno je odrediti tip mehanizma prodora radnog fluida iz frakture, kako bi se odabrala najbolja metoda analize G funkcije. Najčešće se koristi tip normalnog prodora (engl. *Normal Leakoff type*), koji se pojavljuje u većini situacija kada je površina frakture konstantna tokom njenog zatvaranja. Nagib G funkcije određuje tlak zatvaranja frakture. Kada G funkcija počne imati negativni nagib, u toj točki dolazi do zatvaranja frakture (Slike 5.3. i 5.4.)

Na slijedećem primjeru (Cramer i Nguyen, 2013.) prikazane su analize G funkcije iz dva DFIT-a plinskih ležišta šejla. U prvom intervalu, tlak loma stijene se dogodio na  $565,52 \times 10^5$  Pa (8200 psi) (slika 5.1.), dok se u drugom intervalu tlak loma stijene dogodio na  $744,83 \times 10^5$  Pa (10800 psi) (slika 5.2.). U prvom intervalu je nakon tlaka loma stijene količina utiskivanja porasla 5 puta, dok je u drugom intervalu količina utiskivanja ostala ista.

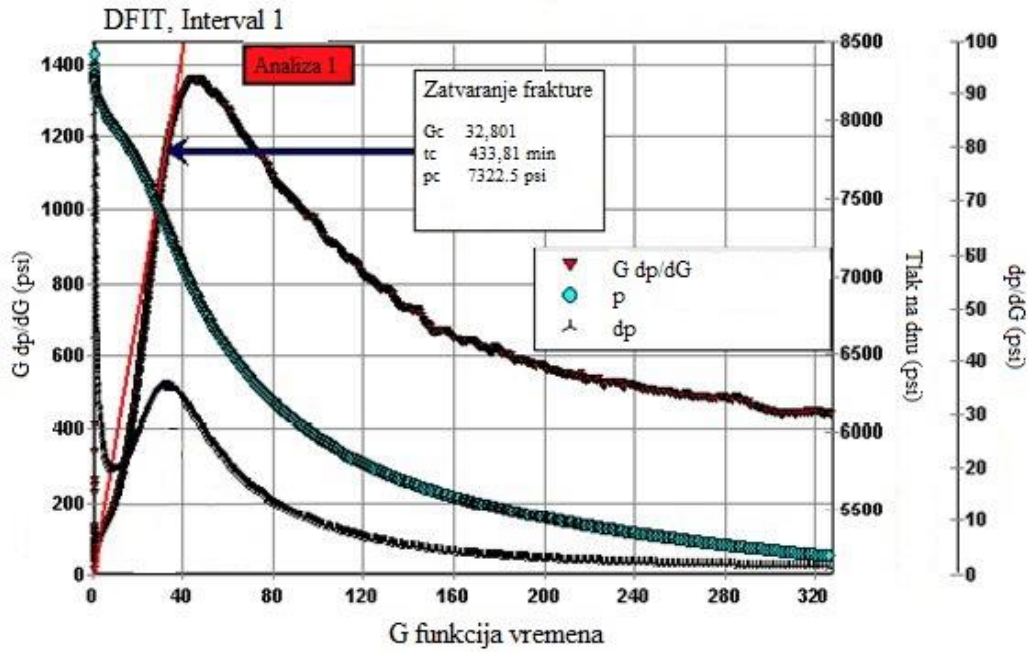


Slika 5.1. - DFIT u prvom intervala šejla (Cramer i Nguyen, 2013.)

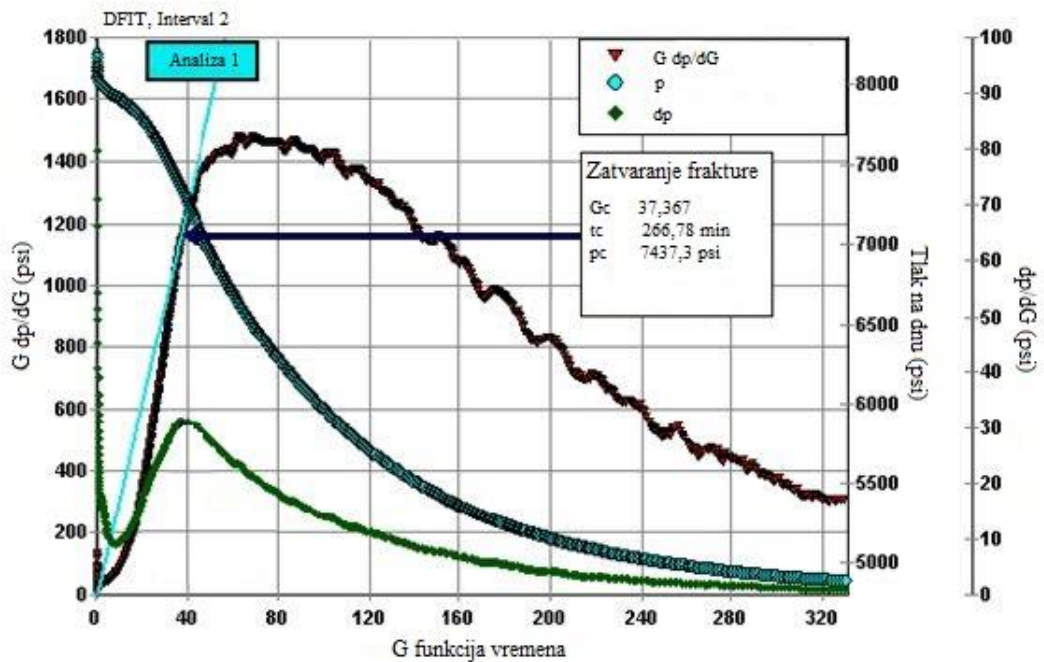


Slika 5.2. - DFIT u drugom intervala šejla (Cramer i Nguyen, 2013.)

Nakon toga su analizirane krivulje odaziva tlaka, te analiza G funkcije, te su dobivene različite vrijednosti tlaka zatvaranja frakture, te potrebno vrijeme do zatvaranja frakture (engl. *Closure pressure*), (slike 5.3 i 5.4.)



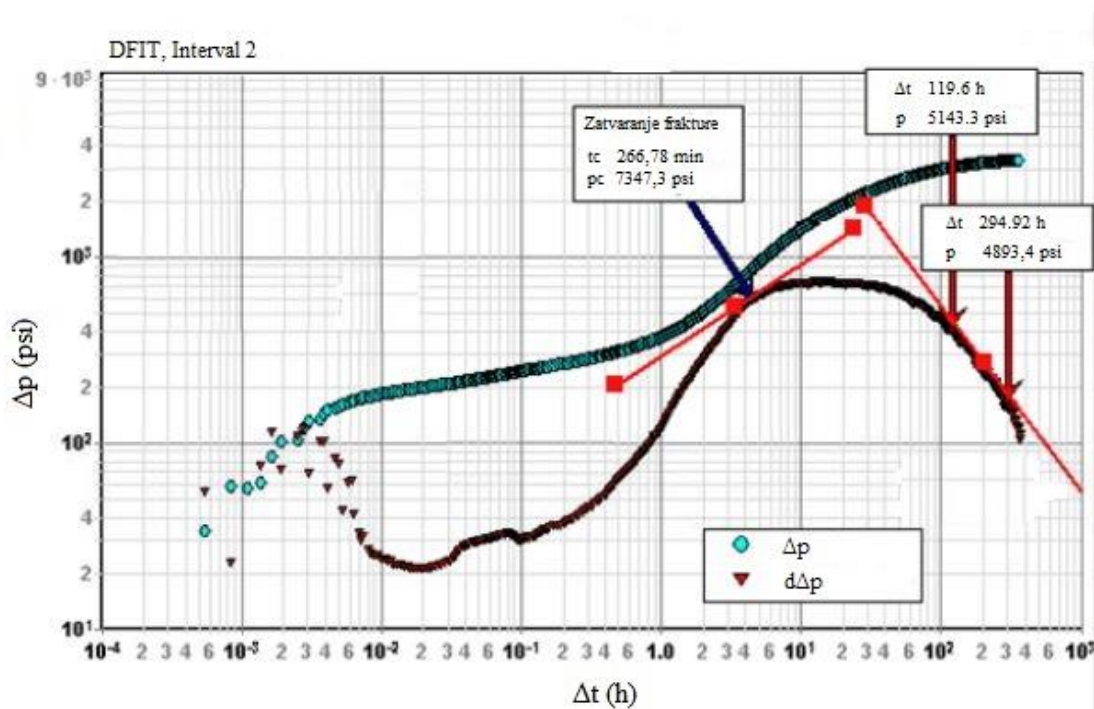
Slika 5.3. - G funkcija u prvom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.)



Slika 5.4. - G funkcija u drugom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.)

Nakon prestanka utiskivanja promatrani su tlakovi u bušotini, te vrijeme kada će doći do početka pseudoradijalnog protoka kako bi se mogla izračunati propusnost ležišta.

U prvom intervalu nakon 30 dana promatranja nije bilo naznaka početka pseudoradijalnog protjecanja, dok je u drugom intervalu pseudo radijalni protok otpočeo nakon 119,60 sati (malo manje od 5 dana (slika 5.5.)). Zbog manjih količina utisnutog fluida, nakon tlaka loma stijene, pseudoradijalni protok je počeo puno prije nego u drugom slučaju, te ostaje upitno kada bi uopće počeo u drugom slučaju.



Slika 5.5. - Određivanje početka pseudoradijalnog protjecanja u drugom intervalu (Cramer i Nguyen, 2013.)

Trajanje pseudoradijalnog protoka u drugom intervalu bilo je dovoljno da se izračuna propusnost, transmisibilnost, i porni tlak, dok u prvom intervalu nije došlo do pseudoradijalnog protoka unutar 30 dana promatranja.

## 6. UFD METODA ODRAĐIVANJA OPTIMALNE GEOMETRIJE FRAKTURE

Prilikom optimizacije geometrije frakture, postoji nekoliko modela koji povezuju efekt frakturirane bušotine sa indeksom proizvodnosti bušotine. U ovom radu će se prikazati UFD (engl. *Unified fracture design*) koji je relativno jednostavan način projektiranja frakture, te određivanja njenih dimenzija.

Prije objašnjenja UFD metode, napisan je kratki osvrt na radne fluide i podupirače koji se koriste tijekom operacije hidrauličkog frakturiranja, zbog velike važnosti podupirača u ovoj metodi.

### 6.1. Podupirači

Radni fluidi u postupku hidrauličkog frakturiranja su najbitnija stavka u samom procesu. Njihova glavna funkcija je razdiranje naslage i "otvaranja" frakture, te prijenos podupirača cijelom duljinom frakture kako bi ona ostala postojana i nakon povlačenja radnog fluida iz frakture. Prema tome, viskoznost radnog fluida se smatra najbitnijim njegovim svojstvom. Međutim, uspješnost operacije frakturiranja zahtjeva još nekolicinu bitnih svojstava koje radni fluid treba imati. Prilikom otvaranja frakture i ulaska radnog fluida unutar frakture i dok proces stvaranja frakture još traje, čestice koje se nalaze unutar radnog fluida (podupirači), trebaju u što većem postotku ostati unutar frakture i spriječiti njeno zatvaranje, te također imati nižu vrijednost viskoznosti prilikom utiskivanja i dobru kontrolu gubitka volumena u porozne slojeve. Zbog različitih vrijednosti temperature, propusnosti, sastava stijene i pornog tlaka prilikom stimulacije ležišta, razvijene su razne vrste radnih fluida kako bi bili efektivni u danim situacijama (Economides, Nolte, 1987).

Podupirači se koriste za podupiranje stjenki frakture kako bi održali veću propusnost nakon što je utiskivanje radnog fluida prestalo i nakon što se povukao iz bušotine (Slika 6.1.). Stavljanje odgovarajuće koncentracije i vrste podupirača je od velike važnosti prilikom izvođenja operacije. Čimbenici koji utječu na vodljivost frakture nakon njenog nastanka su: sastav podupirača, fizikalna svojstva podupirača (gustoća, čvrstoća, veličina), propusnost podupirača, razgradnja podupirača s vremenom.





**Slika 6.1. - Podupirači unutar frakture**

(<http://www.adaa.asn.au/blog/2016/05/as-strong-as-an-ox-fly-ash-proppants>, 5/2016)

## 6.2. Optimalni geometrija frakture projektirana UFD metodom

Economides et al, 2002. su razvili UFD koncept kojem je glavna zamisao da se za neko ležište kojemu su poznate dimenzije (volumen, te drenažni radijus) te propusnosti, masa podupirača može odrediti pomoću bezdimenzionalnog broja podupirača (engl. *dimensionless proppant number*'), koji teoretski opisuje optimalne dimenzije frakture pri kojoj je indeks proizvodnosti maksimalan. Za bezdimenzionalni broj podupirača postoji jedinstvena bezdimenzionalna vodljivost frakture koja određuje optimalnu geometriju frakture, odnosno njenu polu-duljinu i širinu. Također u UFD modelu bezdimenzionalni indeks proizvodnosti je u funkciji bezdimenzionalnog broja podupirača. Isto tako objedinjuje dizajn za nisko-propusna ležišta i za visoko-propusna ležišta.

U ležištima relativno velike propusnosti ( $k$ ) potrebno je ostvariti pukotinu velike vodljivosti ( $k_f w$ ) i male duljine ( $L$ ), dok je u slučaju male ležišne propusnosti nužno ostvariti dugačku pukotinu relativno male vodljivosti.

Duljina frakture i bezdimenzionalna vodljivost frakture su dvije primarne varijable koje kontroliraju indeks proizvodnosti stimulirane bušotine. Bezdimenzionalna vodljivost je mjera relativne lakoće s kojom utisni fluid utječe u frakturu. UFD kroz svoj pristup uvodi novu bezdimenzionalnu varijablu koja je usko povezana sa veličinom frakture, a to je bezdimenzionalna količina proširivača (engl. *dimensionless proppant number*).

Koraci prilikom određivanja optimalne geometrije frakture su:

1. odrediti količinu proširivača,
2. odrediti na temelju količine proširivača optimalnu bezdimenzionalnu vodljivost frakture,
3. odrediti geometriju frakture na temelju optimalne bezdimenzionalne vodljivosti,
4. odrediti vremena utiskivanja i raspored utiskivanja proširivača.

### 6.2.1. Bezdimenzionalna vodljivost frakture

Bezdimenzionalna vodljivost frakture je mjera "relativne lakoće" sa kojom utisni fluid utječe u frakturu. Matematički se ona može izraziti:

$$C_{fD} = \frac{k_f w}{k x_f} \quad 6.1$$

gdje je:

$C_{fD}$  – bezdimenzionalna vodljivost popunjene pukotine

$k_f$  – propusnost podupiračem popunjene pukotine [ $m^2$ ]

$k$  – propusnost ležišne stijene [ $m^2$ ]

$x_f$  – duljina pukotine [ $m$ ]

$w_f$  – širina pukotine [ $m$ ]

### 6.2.2. Stopa penetracije u smjeru prodiranja frakture

Kako bi se optimizirala geometrija frakture, također je potrebno uzeti u obzir i izraz za stopu penetracije u smjeru prodiranja frakture koji glasi:

$$I_x = \frac{2x_f}{x_e} \quad 6.2$$

gdje je:

$I_x$  - stopa penetracije u smjeru prodiranja frakture (koji je okomit na smjer pružanja najmanjeg naprežanja u stijeni  $Sh_{min}$  )

$x_f$  - duljina pukotine [ $m$ ]

$x_e$  - duljina drenažnog radijusa u smjeru pružanja pukotine [ $m$ ]

### 6.2.3. Bezdimenzionalni broj podupirača

Prema Economidesu et al. (2002.) ključno je shvatiti da i bezdimenzionalna vodljivost, i stopa penetracije imaju zajednički produkt, a to je volumen pukotine koji je ispunjen sa podupiračem  $V_{prop}$ . Kako bi se došlo do volumena pukotine koji je ispunjen sa podupiračem, najprije je potrebno doći do bezdimenzionalnog broja podupirača prema izrazu:

$$N_{prop} = I_x^2 \times C_{fd} \quad 6.3$$

Iz čega slijedi:

$$N_{prop} = \frac{4k_f x_f w}{k x_e^2} \quad 6.4$$

Kako se izraz  $\frac{x_f w}{x_e^2}$ , ukoliko se pomnoži sa efektivnom debljinom ležišta  $h_{ef}$  može napisati i u obliku  $\frac{V_{prop2xf}}{V_e}$ , slijedi izraz:

$$N_{prop} = \frac{2k_f}{k} \times \frac{V_{prop2xf}}{V_e} \quad 6.5$$

Gdje su :

$V_{prop2xf}$  – volumen frakture (dvije polu-duljine) ispunjene podupiračem [ $m^3$ ]

$V_e$  – volumen drenažnog područja bušotine [ $m^3$ ]

Za ležišta niske propusnosti (manje od 50 md), gdje su vrijednosti  $N_{prop}$  veće od 0,1, za svaki bezdimenzionalni broj podupirača postoji optimalna bezdimenzionalna vodljivost frakture  $C_{fd,opt}$  koja se računa prema izrazu:

$$C_{fd,opt}(N_{prop}) = 1,6 + e^{\left[ \frac{-0,538 + 1,48 \ln(N_{prop})}{1 + 0,142 \ln(N_{prop})} \right]} \quad 6.6$$

Dok za ležišta srednje propusnosti (preko 50 md), gdje su vrijednosti  $N_{prop}$  manje od 0,1, optimalna bezdimenzionalna vodljivost frakture  $C_{fd,opt}$  iznosi 1,6.

Nakon što je poznata optimalna vrijednost bezdimenzionalne vodljivosti frakture, moguće je izračunati optimalnu polu-duljinu i širinu frakture prema izrazu za polu-duljinu:

$$x_{f,opt} = \left( \frac{V_f k_f}{C_{fd,opt} h_{ef} k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 6.7$$

Odnosno za širinu frakture:

$$w_{f,opt} = \left( \frac{C_{fd,opt} V_f k}{h_{ef} k_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 6.8$$

Gdje je  $V_f$  volumen podupirača u jednom krilu frakture koji prekriva efektivnu debljinu ležišta, a može se odrediti iz izraza:

$$V_f = \frac{V_{prop2xf}}{2} \quad 6.9$$

#### 6.2.4. Projektiranje frakturiranja UFD metodom

Pri projektiranju frakturiranja UFD metodom koristi se slijedeći redosljed:

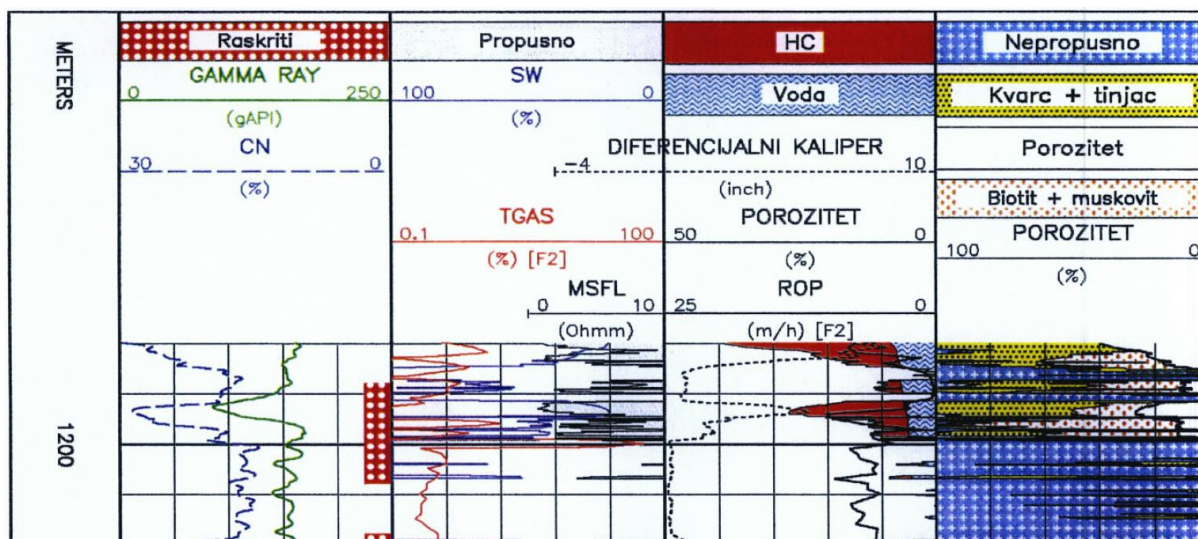
1. Kao ulazni parametar u UFD metodi, na temelju propusnosti ležišta, pretpostavlja se bezdimenzionalni broj podupirača;
2. Na temelju pretpostavljenog broja podupirača računa se optimalna bezdimenzionalna vodljivost frakture;
3. Računa se optimalna polu-duljina pukotine;
4. Računa se optimalna širina pukotine;
5. Ponovno se ulazi u proračun sa dobivenim parametrima te se postupak ponavlja (iterativni postupak).

## 7. MODELIRANJE HIDRAULIČKE FRAKTURE 3D SIMULATOROM

U ovom poglavlju će biti prikazan redosljed modeliranja hidrauličke frakture u simulatoru za hidrauličko frakturiranje (Mfrac, Baker Hughes), na jednoj bušotini u Hrvatskoj na području Moslavine. Program Mfrac koristi optimalnu vrijednost bezdimenzionalne vodljivosti frakture za svoj proračun.

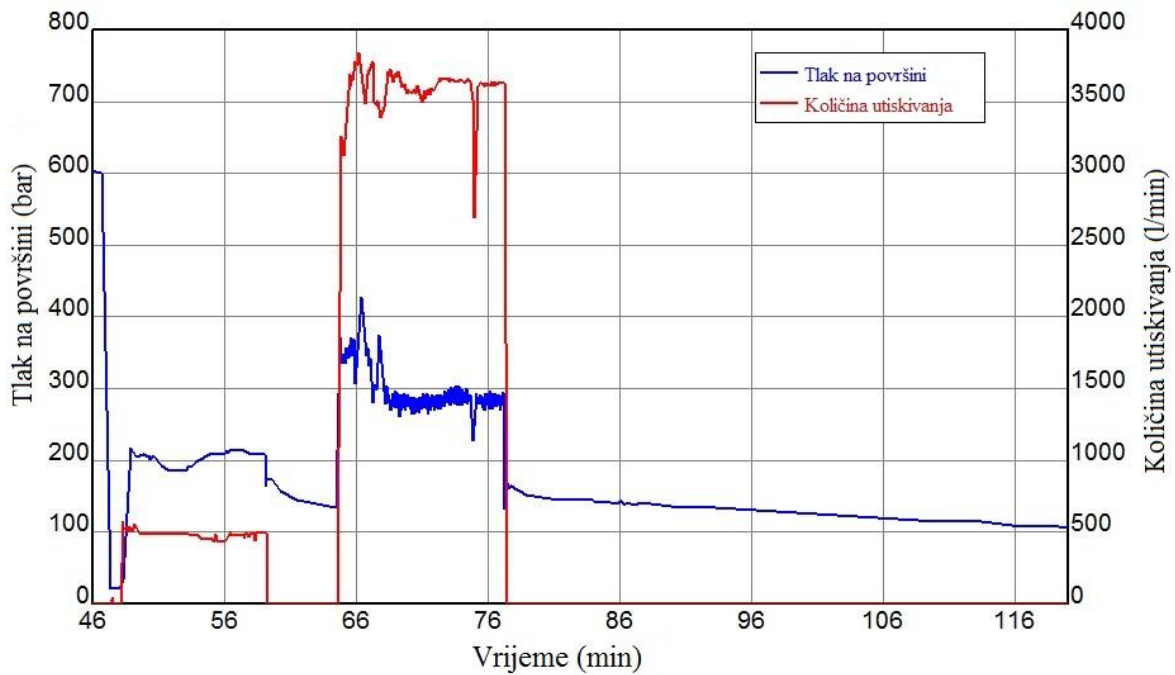
### 7.1. Redosljed izvođenja operacija pri modeliranju frakture 3D simulatorom

Da bi se operacija hidrauličkog frakturiranja uopće mogla početi projektirati, potrebno je odrediti interval za frakturiranje, te navesti razloge zbog kojih se projektiranje izvodi. Na temelju pojednostavljenog rudarskog projekta za osvajanje i ispitivanje bušotine (skr. *PRP*), nakon prvotnog ispitivanja, zbog manje proizvodnosti bušotine nego što je bilo predviđeno, donesena je odluka od strane ležišnog inženjera da su na određenim intervalima potrebni stimulacijski radovi u vidu hidrauličkog frakturiranja. Bušotina je perforirana na intervalu od 1195-1205 metara (slika 7.1.), te se na tom intervalu odlučilo ići sa stimulacijskim radovima.

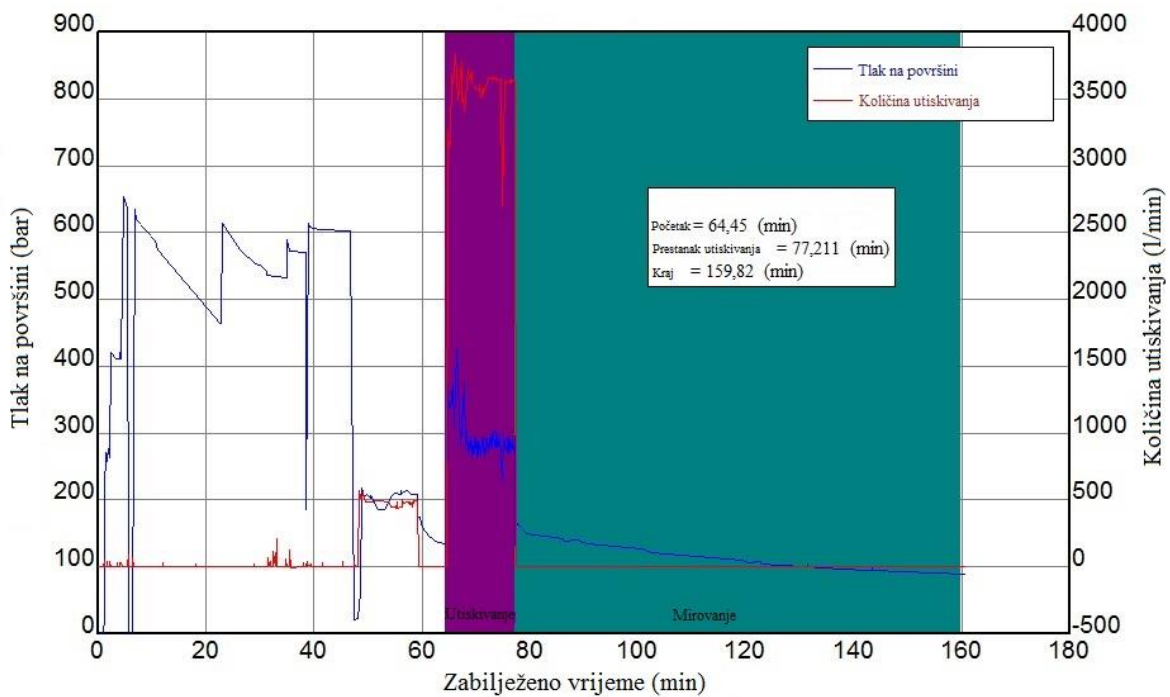


Slika 7.1. - Određivanje intervala pogodnog za frakturiranje (Pojednostavljeni rudarski projekt osvajanja i ispitivanja bušotine, Tehnička dokumentacija INA-e, 2013.)

Prvi slijedeći korak je izvesti DFIT na terenu sa volumenom koji je jednak volumenu prethodnice (fluid koji u operaciji hidrauličkog frakturiranja ima ista reološka svojstva kao fluid za frakturiranje. Jedina razlika je što prethodnica ne sadrži podupirače). Isto tako potrebno je ostvariti dovoljno veliki protok da se ostvari tlak veći od tlaka loma stijene. Na slici 7.2. vidljivo je da vrijeme utiskivanja prije loma naslaga bilo 14 minuta. Nakon izvršenog testa, zabilježene krivulje se analiziraju.



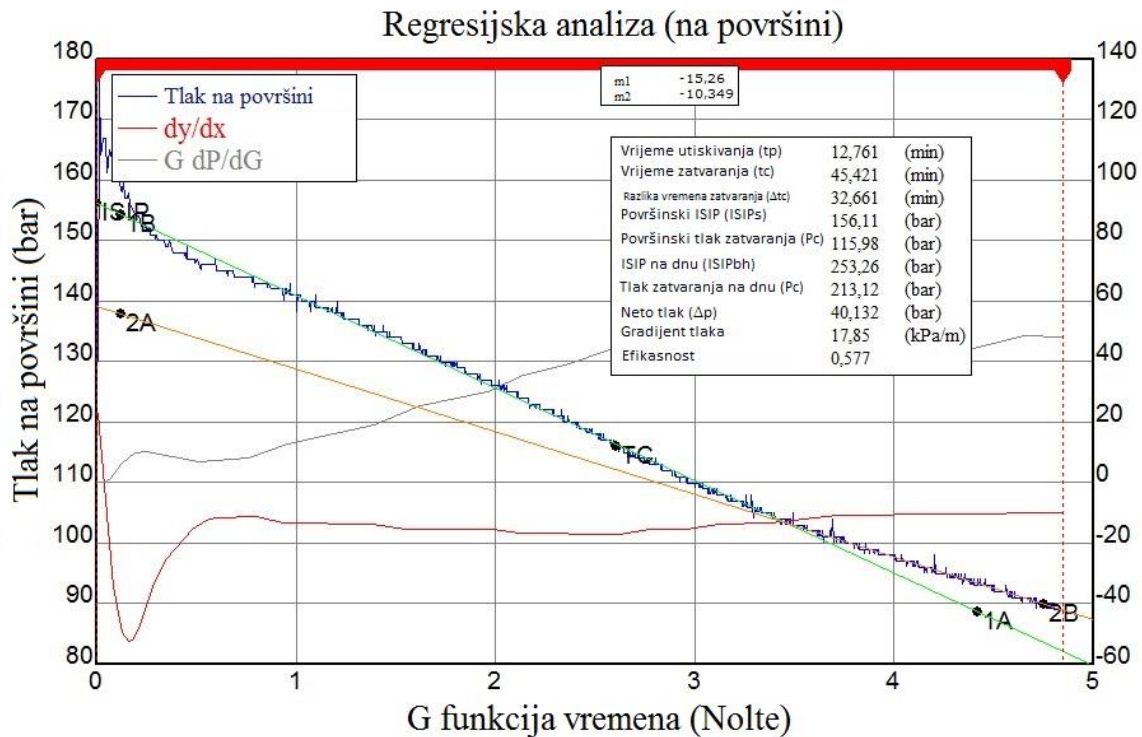
Slika 7.2. - Odaziv tlaka prilikom testa izvedenog na terenu



Slika 7.3. - Podjela DFIT-a na cjeline

Na slici 7.3. odaziv tlaka je podijeljen na period utiskivanja (ljubičasto) te period nakon prestanka utiskivanja fluida (zeleno), kako bi se odredila područja koja će se analizirati kako je prethodno opisano u radu (G funkcija).

Nakon analize G funkcije (slika 7.4.), dobiveni su podaci, koji su potrebni da bi se moglo ući u proračun operacije hidrauličkog frakturiranja.

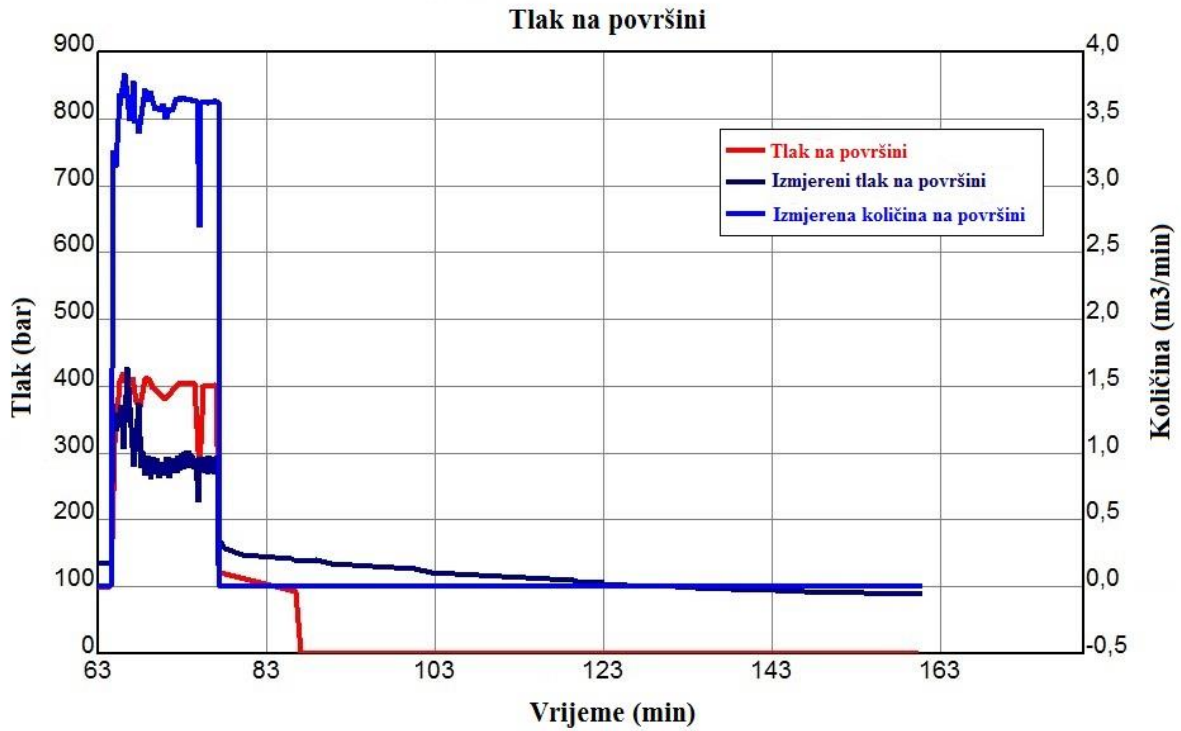


Slika 7.4. - Analiza G funkcije

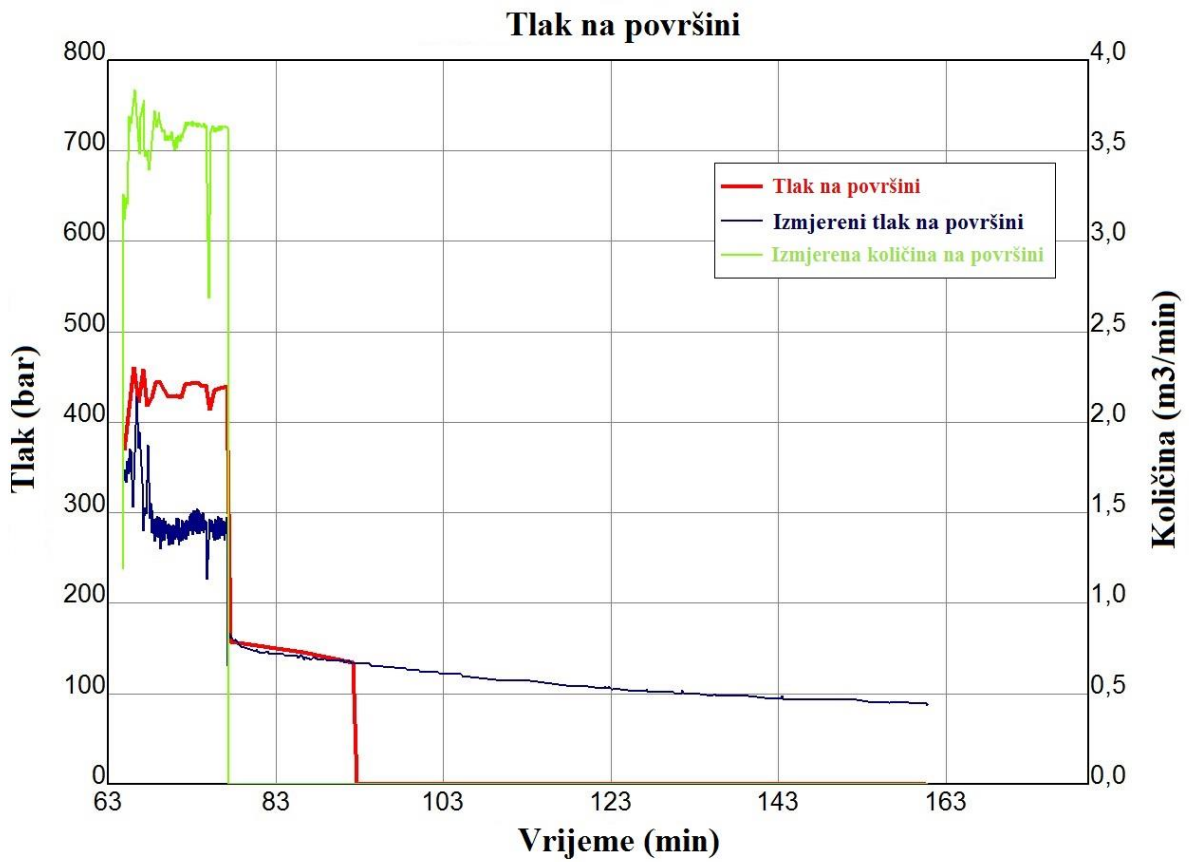
Ukoliko se DFIT radi u svrhu procjene parametara za operaciju hidrauličkog frakturiranja, tada se uobičajeno radi 1-2 dana prije same operacije hidrauličkog frakturiranja. Proračun frakture u simulatoru se radi i do nekoliko mjeseci prije planiranog frakutiranja, potrebno je ući u proračun sa nekim pretpostavljenim, ili empirijski dobivenim podacima koji su dostupni tek nakon izvedbe DFIT-a.

Stoga je nakon izvedbe DFIT-a, potrebno napraviti usklađivanje predviđenih i stvarnih tlakova, vremena i volumena utiskivanja., kao što je prikazano na slikama 7.5. i 7.6..





Slika 7.5. - Usklađivanje predviđenih i stvarnih tlakova, vremena i volumena utiskivanja.



Slika 7.6. - Usklađeni predviđeni i stvarni tlakovi, vremena i volumen utiskivanja

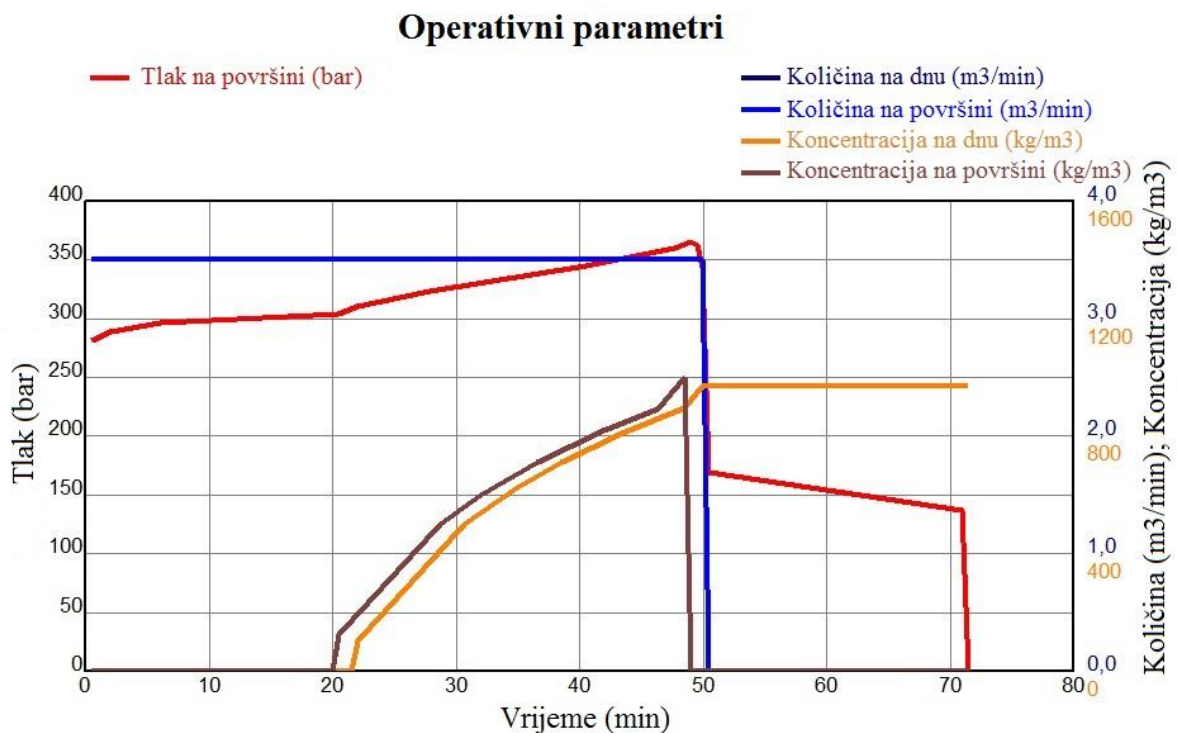


Na slici 7.6. vidljivo je kako se pretpostavljena krivulja odaziva tlaka nakon loma stijena uskladila sa krivuljom tlaka nakon loma stijena koja je dobivena prilikom izvođenja DFIT-a.

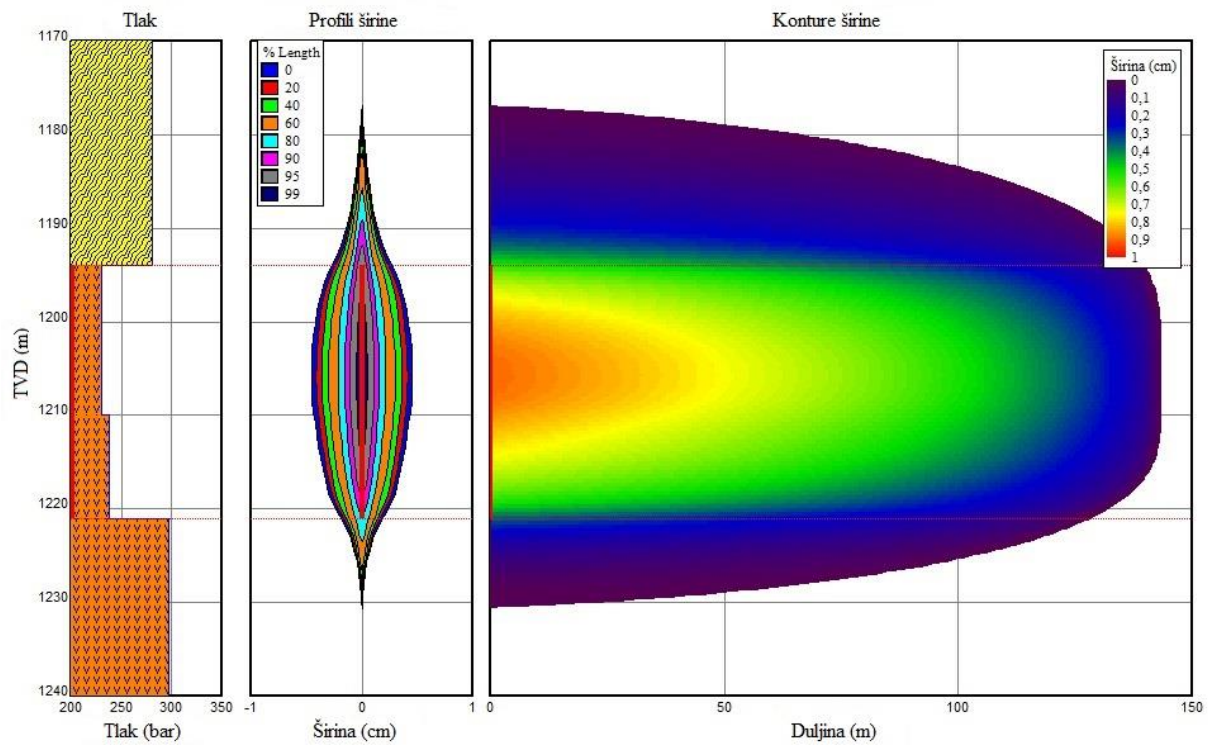
Nakon što su krivulje odaziva tlaka usklađene, može se pristupiti konačnom proračunu hidrauličke frakture u simulatoru, koji kao produkt daje geometriju frakture, te detaljan opis površinskih tlakova, količina utiskivanja, te koncentracije podupirača, od početka operacije do kraja, što je moguće vidjeti na slikama 7.7., 7.8. i 7.9.

Kao što se može vidjeti na slici 7.7., konačan produkt, koji simulator daje su količine i vremena utiskivanja, sa pripadajućim koncentracijama podupirača kako bi se ostvarila simulirana geometrija frakture.

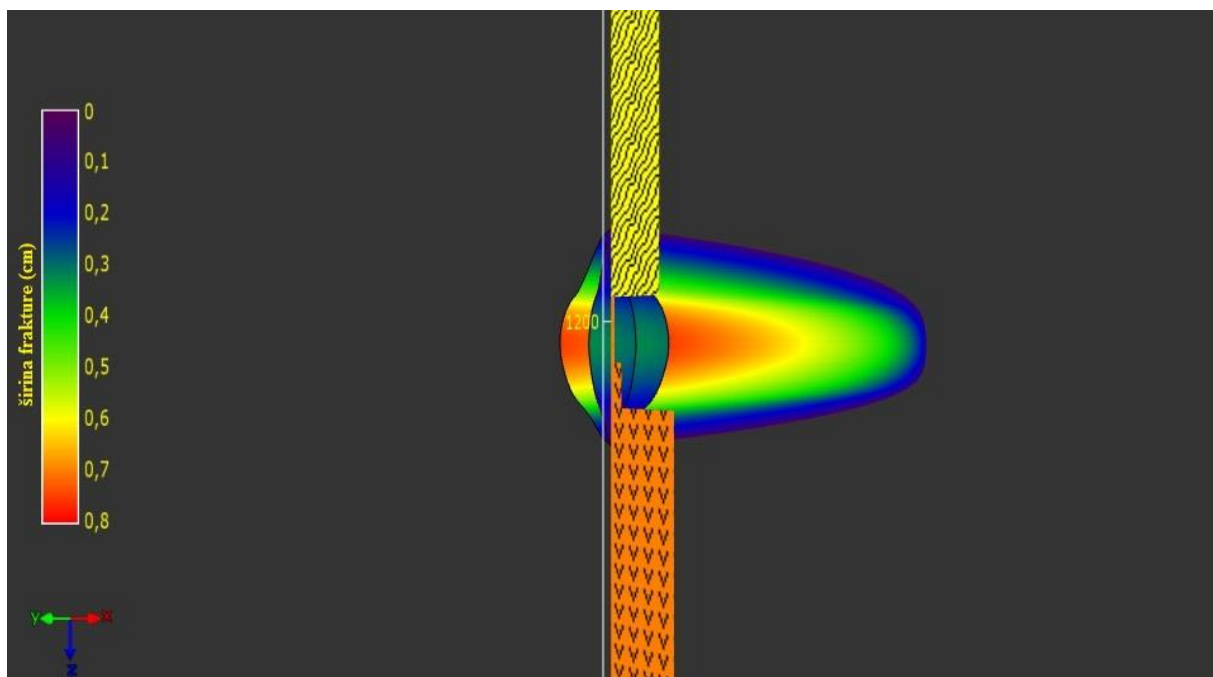
Na slikama 7.8. i 7.9., prikazana je geometrija simulirane frakture te njena raspodjela po visini perforiranog intervala.



Slika 7.7. - Veličine parametara tijekom frakturiranja



Slika 7.8. - Stvarna geometrija frakture



Slika 7.9. - Stvarna geometrija frakture 3D

Nakon uspješno obavljene operacije hidrauličkog frakturiranja, proizvodnost bušotine je povećana 6 puta.

## 8. ZAKLJUČAK

Nakon detaljne analize literature, od pregleda vrsta protoka kroz ležište, preko teorije hidrauličkog frakturiranja, te suvremenog modeliranja frakture u 3D simulatoru, dolazi se do zaključka kako je dijagnostički test frakturiranja, te parametri koji se mogu izlučiti iz njega bitni za provođenje operacije hidrauličkog frakturiranja.

Počevši od režima i podrežima protjecanja fluida kroz ležište i njihovog utoka u bušotinu, vidi se kako postoji relativno velik broj raznih protoka koje treba prepoznati i što je još bitnije razlikovati kako bi se kvalitetno moglo pristupiti interpretaciji hidrodinamičkih mjerenja, od kojih je jedan i DFIT. Trajanje tih testova zna biti vrlo kratko što je još jedan otežavajući parametar pri interpretaciji mjerenja.

Kod analize teorije hidrauličkog frakturiranja, i fizike nastanka frakture, može se zaključiti kako nije jednostavno odrediti optimalnu geometriju frakture, te smjer i intenzitet njenog pružanja, kako u dijagnostičkom testu frakturiranja, tako i u samoj operaciji hidrauličkog frakturiranja gdje je dodatno potrebno izračunati dodatne parametre poput količine podupirača te njegovu čvrstoću.

Što se tiče dijagnostičkog testa frakturiranja, dolazi se do zaključka kako se prije početka njegovog izvođenja treba definirati njegova namjena, tj. u koju svrhu će se izvoditi. Nakon određivanja svrhe testa, potrebno je provesti detaljnu analizu dobivenih tlakova, kako bi se dobile precizne vrijednosti parametara sa kojima se može sa sigurnošću dalje ići u projektiranje operacije hidrauličkog frakturiranja.

Isto tako, kod modeliranja frakture 3D simulatorom, zamjećuje se kako je teško u početku procijeniti sve ulazne parametre, pogotovo ukoliko se nema prethodnih empirijskih saznanja o litološkim i ležišnim parametrima. Također treba napomenuti kako je modeliranje frakture u simulatoru dugotrajan proces koji zahtjeva česte nadopune ulaznih parametara, ali ako se pravilno izvede, te operacija frakturiranja buse uspješno izvedena, produktivnost bušotine se može povećati nekoliko puta. U cijelom tom procesu, dijagnostički test frakturiranja je početna i završna točka planiranja operacije hidrauličkog frakturiranja prije njene same izvedbe.

Za kraj valja napomenuti kako i nakon korištenja sekundarnih i tercijarnih metoda istiskivanja nafte iz ležišta, velike količine dokazanih zaliha nafte svejedno ostaju u ležištu, iz čega se može zaključiti da treba pridati veliku pozornost daljnjem razvoju metoda povećanja iscrpka nafte iz ležišta (Sečen, 2006).

## 9. DODATAK

U dodatku je prikazan završni izvještaj iz simulatora (na engleskom jeziku), u kojem se mogu vidjeti svi ulazni i izlazni podaci u proračunu.

## MFrac

### Three-Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator

MFrac is a trademark of Baker Hughes Incorporated  
 Copyright © 1985-2015 Baker Hughes Incorporated  
 2929 Allen Pkwy, Ste 2400, Houston, TX 77019-7100, USA  
 MFrac Suite 10 Build 1981 (64-bit)  
<http://www.mfrac.com/>  
 Simulation Date 10.10.2016. 9:34

Company: N/A  
 Well: N/A  
 Location: N/A  
 Date: 10.10.2016.

Comments: THE CONDITION APPLIED FOR EFFECTIVE FRACTURE LENGTH, HEIGHT AND CONDUCTIVITY:  
 PROPPANT CONCENTRATION IN PAY ZONE HIGHER THAN 3 kg/m<sup>2</sup>.

Oil base

## Input Data

### FRACTURE OPTIONS

Fracture Geometry Three-Dimensional

### ROCK PROPERTIES

Zone Name	TVD at Bottom (m)	MD at Bottom (m)	Stress Gradient (bar/m)	Stress (bar)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Fracture Toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Critical Stress (bar)	Stress Interpolation
Metamorphic	1194	1194	0,235	280,59	35000	0,25	1,0988	0	Off
T.gorje	1210	1210	0,19	229,9	70000	0,15	1	0	Off
T.gorje	1221	1221	0,195	238,1	70000	0,15	1	0	Off
T.gorje	1290	1290	0,23	298,7	70000	0,15	1	0	Off

### FLUID LOSS DATA

Zone Name	TVD at Bottom (m)	MD at Bottom (m)	D179 Leakoff Coef. (ft/min <sup>1/2</sup> )	D179 Spurt Loss (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
Metamorphic	1194	1194	0	0
T.gorje	1210	1210	0,002	0,010186
T.gorje	1221	1221	0,001	0,01
T.gorje	1290	1290	0,002	0,010186

### Total Fluid Leakoff Coefficient (EOJ)

Zone Name	Depth (m)	Formation C (ft/min <sup>1/2</sup> )
Metamorphic	1194	0
T.gorje	1210	0
T.gorje	1221	0
T.gorje	1290	0

### WELLBORE HYDRAULICS DATA

Wellbore Volume	7,0056	(m <sup>3</sup> )
Injection Down	Tubing	
Horizontal Well	Off	
Surface Line Volume	3	(m <sup>3</sup> )
Wellbore Volume Reference MD	1194	(m)
Wellbore Volume Reference TVD	1194	(m)
Maximum BHTP	650	(bar)

### PERFORATION ZONES

Active	Zone	Top of Perfs	Bottom of	Top of Perfs	Bottom of	Perforations	Diameter
--------	------	--------------	-----------	--------------	-----------	--------------	----------

		TVD (m)	Perfs TVD (m)	MD (m)	Perfs MD (m)	Number	(mm)	
1.	Yes	Formation C	1194	1221	1194	1221	120	12

### ZONE DATA

Zone	Relative Azimuth of Min. Hor. Stress (°)	No. of Multiple Fractures	Stiffness Interaction	Fluid Loss Interaction	Multi-Layer Stiffness Interaction	Multi-Layer Fluid Loss Interaction	Pay Zone From (m)	To (m)	Perm. (mD)
1. Formation C	0	1	0	0	0	0	1194	1221	0.5

### INPUT SURFACE TREATMENT SCHEDULE

Schedule Type: Surface  
 Wellbore Fluid Type: D179  
 Fraction of Well Filled: 1  
 Recirculation Volume: 0 (m³)

Stage No.	Slurry Rate (m³/min)	Stage Liquid Volume (m³)	Stage Time (min)	Stage Type	Fluid Type	Prop Type	Prop Conc. From (kg/m³)	Prop Conc. To (kg/m³)	Prop Damage Factor
1	3,5	70	20	Pad	D179	C002	0	0	0,5
2	3,5	7	2,0882	Prop	D179	C002	100	200	0,5
3	3,5	7	2,1471	Prop	D179	C002	200	300	0,5
4	3,5	7	2,2059	Prop	D179	C002	300	400	0,5
5	3,5	7	2,2647	Prop	D179	C002	400	500	0,5
6	3,5	10	3,3193	Prop	D179	C002	500	600	0,5
7	3,5	12	4,084	Prop	D179	C002	600	700	0,5
8	3,5	14	4,8824	Prop	D179	C002	700	800	0,5
9	3,5	16	5,7143	Prop	D179	C002	800	900	0,5
10	3,5	5	1,8277	Prop	D179	C002	900	1000	0,5
11	3,5	5	1,4288	Flush	D179	C002	0	0	0
12	0	0	100	Shut-in	D179	C002	0	0	0

Fluid Type: D179 - YFGO IV w/ 6.0 gals J452/1000 gals 167,01 (m³)  
 without breaker

Proppant Type: C002 - 20/40 EconoProp 50550 (kg)

### Output Data

#### SURFACE TREATMENT SCHEDULE PUMPED

Stage No.	Avg Slurry Rate (m³/min)	Liquid Volume (m³)	Slurry Volume (m³)	Total Slurry Volume (m³)	Total Time (min)	Fluid Type	Prop Type	Conc. From (kg/m³)	Conc. To (kg/m³)	Prop. Stage Mass (kg)
1	3,5	70	70	70	20	D179	0000	0	0	0
2	3,5	7	7,3088	77,309	22,088	D179	C002	100	200	1050
3	3,5	7	7,5147	84,824	24,235	D179	C002	200	300	1750
4	3,5	7	7,7206	92,544	26,441	D179	C002	300	400	2450
5	3,5	7	7,9265	100,47	28,706	D179	C002	400	500	3150
6	3,5	10	11,618	112,09	32,025	D179	C002	500	600	5500
7	3,5	12	14,294	126,38	36,109	D179	C002	600	700	7800
8	3,5	14	17,088	143,47	40,962	D179	C002	700	800	10500
9	3,5	16	20	163,47	46,706	D179	C002	800	900	13600
10	3,5	5	6,3971	169,87	48,534	D179	C002	900	1000	4750
11	3,5	5	5	174,87	49,962	D179	C002	0	0	0
12	0	0	0	174,87	71,462	D179	0000	0	0	0

Total Slurry Volume: 174,87 (m³)  
 Total Liquid Volume: 160 (m³)  
 Total Proppant Mass: 50550 (kg)



**BOTTOMHOLE TREATMENT SCHEDULE PUMPED**

Stage No.	Avg Slurry Rate (m <sup>3</sup> /min)	Liquid Volume (m <sup>3</sup> )	Slurry Volume (m <sup>3</sup> )	Total Slurry Volume (m <sup>3</sup> )	Total Time (min)	Fluid Type	Prop Type	Conc. From (kg/m <sup>3</sup> )	Conc. To (kg/m <sup>3</sup> )	Prop. Stage Mass (kg)
Well	3,5	7,0056	7,0056	7,0056	2,0016	D179	0000	0	0	0
1	3,5	70	70	77,006	22,002	D179	0000	0	0	0
2	3,5	7	7,3088	84,314	24,09	D179	C002	100	200	1050
3	3,5	7	7,5147	91,829	26,237	D179	C002	200	300	1750
4	3,5	7	7,7206	99,55	28,443	D179	C002	300	400	2450
5	3,5	7	7,9265	107,48	30,708	D179	C002	400	500	3150
6	3,5	10	11,618	119,09	34,027	D179	C002	500	600	5500
7	3,5	12	14,294	133,39	38,111	D179	C002	600	700	7800
8	3,5	14	17,088	150,48	42,993	D179	C002	700	800	10500
9	3,5	16	20	170,48	48,708	D179	C002	800	900	13600
10	0,19299	3,4447	4,3914	174,87	71,462	D179	C002	900	968,89	3218,9
Total Slurry Volume					174,87	(m <sup>3</sup> )				
Total Liquid Volume					160,45	(m <sup>3</sup> )				
Total Proppant Mass					49019	(kg)				

**WELLBORE HYDRAULICS SOLUTION**

Hydraulic Power Required	2130	(kW)
Surface Pressure, Min.	137,22	(bar)
Surface Pressure, Max.	364,98	(bar)
BHTP Pressure, Min.	117,1	(bar)
BHTP Pressure, Max.	296,59	(bar)
Gravitational Head, Min.	96,191	(bar)
Gravitational Head, Max.	163,48	(bar)
Frictional Pressure Loss, Min.	280,35	(bar)
Frictional Pressure Loss, Max.	368,23	(bar)

**FRACTURE PROPAGATION SOLUTION  
(Calculated Values at End of Treatment)**

	Formation C	
Slurry Volume Injected	174,87	(m <sup>3</sup> )
Liquid Volume Injected	160,45	(m <sup>3</sup> )
Fluid Loss Volume	117,49	(m <sup>3</sup> )
Frac Fluid Efficiency	0,32812	
Net Frac Pressure	67,275	(bar)
Length (one wing)	143,53	(m)
Upper Frac Height	29,043	(m)
Lower Frac Height	24,645	(m)
Upper Frac Height (TVD)	1176,9	(m)
Lower Frac Height (TVD)	1230,6	(m)
Total Frac Height	53,688	(m)
Max. Frac Width at Perfs	0,90814	(cm)
Avg. Hydraulic Frac Width	0,44693	(cm)

**PROPPANT DESIGN SUMMARY**

	Formation C	
Frac Length - Created	143,53	(m)
Frac Length - Propped	139,51	(m)
Frac Height - Avg.	44,621	(m)
Propped Height (Pay Zone) - Avg.	26,929	(m)
Max Width at Perfs - EOJ	0,90814	(cm)
Propped Width (Well) - Avg.	0,29074	(cm)
Propped Width (Pay Zone) - Avg.	0,2497	(cm)
Conc./Area (Frac) - Avg. at EOJ	3,8311	(kg/m <sup>2</sup> )
Conc./Area (Pay Zone) - Avg. at Closure	4,9347	(kg/m <sup>2</sup> )
Frac Conductivity (Pay Zone) - Avg. at Closure	493,77	(mD-m)

Dimensionless Frac Conductivity (Pay Zone)	7,0787	
Beta	0	(atm-s <sup>2</sup> /gm)
Avg. Fracture Permeability	198,77	(darcy)
Propped Fracture Ratio (EOJ)	0,54755	
Closure Time	21,876	(min)
Screen-Out Time	34,775	(min)

### PROPPANT TRANSPORT SUMMARY TABLE

Stage Interval No.	Interval From (m)	Interval To (m)	End of Job			After Closure				
			Height Slurry (m)	Height Bank (m)	Conc. Inlet (kg/m <sup>3</sup> )	Conc. Final (kg/m <sup>3</sup> )	Prop Width (cm)	Prop Ht. Total (m)	Prop Ht. Pay (m)	Conc. Area (kg/m <sup>2</sup> )
10	0	16,877	53,026	2,5099e-09	934,45	1123,9	0,2788	53,026	27	5,5308
9	16,877	54,52	50,618	2,65e-09	850	1059,1	0,24286	50,618	27	4,818
8	54,52	86,116	46,771	2,9857e-09	750	1117,3	0,21438	46,771	27	4,2529
7	86,116	106,54	42,773	3,6394e-09	650	2429,9	0,26592	42,773	27	5,2754
6	106,54	117,74	39,399	3,3721e-09	550	4344,9	0,33536	39,399	27	6,6531
5	117,74	125,26	36,68	7,3231e-10	449,99	4344,9	0,28613	36,68	27	5,6764
4	125,26	132,18	33,802	1,0547e-11	350	4344,9	0,23852	33,802	28,978	4,7318
3	132,18	138,37	29,91	0	250	4344,9	0,18163	29,91	25,89	3,6033
2	138,37	143,53	22,609	0	150	4344,9	0,10138	22,609	21,659	2,0048
1	143,53	143,53	0	0	0	0	0	0	0	0
0	143,53	143,53	2,912	0	0	4344,9	0,0023445	2,912	2,912	0,04472



## 10. LITERATURA

1. COLLINS, R.E., 1991. Pseudo-Steady-State Flow and the Transient Pressure Behavior of Fractured Wells: A New Analytical Technique for Complex Wellbore Configurations., Dallas, SPE-22660-MS
2. CRAMER, D. D., NGUYEN, D. H., 2013, Diagnostic Fracture Injection Testing Tactics in Unconventional Reservoirs, SPE-163863
3. ČIKEŠ, M., 2013. Predavanja iz kolegija "Proizvodnja nafte i plina 1", Interna skripta, RGN- fakultet u Zagrebu.
4. ECONOMIDES M. J., NOLTE K. G., 1987. Reservoir Stimulation, Schlumberger Educational Services, Huston, Texas
5. ECONOMIDES, M. J., NOLTE, K. G., 1989, Reservoir Stimulation, 2 izdanje, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Yersey
6. ECONOMIDES, M. J., OLIGNEY, R. E. i VALKO, P. P., 2002, Unfied Fracture Design, Orsa Press, Houston.
7. GEERTSMA, J., DE KLARK, F., 1969, A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induces Fractures, Journal of Petroleum Technology, Vol. 21(12), str. 1571-1581; SPE-2458-PA
8. KEVRIĆ I., 1999. Utjecaj mehaničkih svojstava stijena na geometriju hidraulički stvorene frakture, tlak frakturiranja i količinu radnog fluida, Magistarski rad, RGN- fakultet u Zagrebu
9. KUREVIJA, T., 2016. Predavanja iz kolegija "Analiza hidrodinamičkih mjerenja", Interna skripta, RGN- fakultet u Zagrebu.
10. NORDGREN , R. P., 1972, Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture, Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 12(04), str. 306-314, SPE-3009-PA
11. PERKINS T. K., KERN L. R., 1961. Widths of Hydraulic Fractures, Journal of Petroleum Technology, 13, str. 937 – 949.
12. SEČEN, J., 2006. Metode povećanja iscrpka nafte, INA Industrija nafte d.d., Zagreb, Hrvatska
13. SLIDER, H.C., 1966. Application of Pseudo-Steady-State Flow to Pressure-Buildup Analysis, Amarillo, Texas, SPE-1403-MS
14. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA INA-e, Pojednostavljeni rudarski projekt osvajanja i ispitivanja bušotine, 2013.

15. <http://www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/WellTestTheoryEquations/Minifrac.htm>, 7/2014)
16. [http://www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/WellTestTheoryEquations/Linear Fracture Flow Analysis.htm](http://www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/WellTestTheoryEquations/Linear_Fracture_Flow_Analysis.htm), 7/2014)
17. [http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML\\_Files/Reference Materials/General\\_Concepts/Partial Penetration.htm](http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML_Files/Reference_Materials/General_Concepts/Partial_Penetration.htm), 7/2014)
18. [http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML\\_Files/Reference Materials/Flow\\_Regimes.htm#Linear Channel Flow](http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML_Files/Reference_Materials/Flow_Regimes.htm#Linear_Channel_Flow), 7/2014)
19. [http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML\\_Files/Reference Materials/Flow\\_Regimes.htm](http://www.fekete.com/san/webhelp/welltest/webhelp/Content/HTML_Files/Reference_Materials/Flow_Regimes.htm), 7/2014)

## **IZJAVA**

Izjavlujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

---

Tin Juričić