Povećani slojni tlak i njegov utjecaj na projektiranje i izradu bušotina

Bajan, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:090764

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







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

POVEĆANI SLOJNI TLAK I NJEGOV UTJECAJ NA PROJEKTIRANJE I IZRADU BUŠOTINA

Diplomski rad

Luka Bajan
N - 135

Zagreb, 2015

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

POVEĆANI SLOJNI TLAK I NJEGOV UTJECAJ NA PROJEKTIRANJE I IZRADU BUŠOTINA

Luka Bajan

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

Sažetak:

Uzrok i pojava povećanog slojnog tlaka ovise o dosta faktora koji su u funkciji prolaznosti vremena stvorili preduvjete za postojanje takvih zona. Za određivanje dubine i vrijednosti povećanog slojnog tlaka koriste se razne metode među kojima su geofizičke metode, bušotinska karotaža i interpretacija podataka dobivenih tijekom bušenja. Kvalitetan program projektiranja i izrade bušotine ovisit će o pravilnom interpretiranju podataka dobivenih metodama za utvrđivanje zona i vrijednosti povećanog slojnog tlaka. Utjecaj kvalitete interpretacije dobivenih podataka, na odabir odgovarajuće isplake, ugradnju kolone zaštitnih cijevi i cementaciju, od iznimne je važnosti s tehničkog i ekonomskog stajališta svakog projekta izrade bušotine.

Ključne riječi: povećani slojni tlak, tlak frakturiranja, ugradnja zaštitnih cijevi, cementacija
Diplomski rad sadrži: 50 stranica, 4 tablice, 21 sliku, 1 prilog, 21 referencu
Jezik izvornika: Hrvatski
Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a.
Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a
2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNf-a
3. Dr. sc. Jasna Orešković, docentica RGNf-a

Datum obrane: 24. 9. 2015.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's thesis

ABNORMALLY HIGH FORMATION PRESSURE AND ITS IMPACT ON PLANNING AND CONSTRUCTION OF A WELLBORE

Luka Bajan

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

Abstract:

The occurrence of an abnormally high formation pressure is caused by many factors. To determine the depth and the value of the abnormally high formation pressure one must use a variety of methods such as geophysical methods, well logging and interpretation of the data obtained during drilling. Adequate program of planning and constructing a wellbore will depend on right interpretation of the data obtained by the methods for determining the value of abnormally pressured zone. Using adequate mud programs, casing and cementing is extremely important from a technical and economic point of view.

Key words: abnormally high formation pressure, fracture pressure, casing program, cementing

Thesis contains: 50 pages, 4 tables, 21 figures, 1 enclosure, 21 references

Original in: Hrvatski

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

Supervisor: PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor.

Reviewers: 1. PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor
2. PhD. Zdenko Krištafor, Full Professor
3. PhD. Jasna Orešković, Assistant Professor

Date of defense: 24. 9. 2015.

SADRŽAJ:

Popis tablica: IV

Popis slika: V

Popis priloga: VII

Popis korištenih oznaka i pripadajućih SI jedinica: VIII

1. UVOD 1

2. POVEĆANI SLOJNI TLAK 2

2.1. Tlakovi koji se pojavljuju u stijeni ili neposredno djeluju na nju 2

2.2. Nastajanje zona povećanog slojnog tlaka 5

3. METODE OTKRIVANJA I VREDNOVANJA POVEĆANOG SLOJNOG TLAKA 9

3.1. Geofizičke metode 10

3.1.1. Seizmička mjerenja 10

3.1.2. Gravimetrijska mjerenja 17

3.2. Podaci dobiveni bušenjem 18

3.2.1. Parametri koji se prate tijekom bušenja 18

3.2.1.1. Brzina bušenja 18

3.2.1.2. d – Eksponent (normalna mehanička brzina bušenja) 21

3.2.1.3. Jednadžbe brzine bušenja 23

3.2.1.4. Promjena poroznosti tijekom bušenja 23

3.2.1.5. Torzija 24

3.2.2. Svojstva i sastav isplake 24

3.2.2.1. Povećanje udjela plina u isplaci 25

3.2.2.2. Gustoća isplake 25

3.2.2.3. Dotok slojnog fluida u bušotinu 25

3.2.2.4. Promjena temperature isplake 26

3.2.2.5. Razina isplake u bušotini 26

3.2.3. Krhotine stijena 26

3.2.3.1. Gustoća šejla 27

3.2.3.2. Volumen, oblik i veličina krhotina 28

3.2.3.3. Faktor šejla 28

3.3. Bušotinska karotaža 28

3.3.1. Konvencionalna elektrokarotaža 29

3.3.2. Akustična karotaža 31

4. PROJEKTIRANJE I IZRADA BUŠOTINA USLIJED POVEĆANOG SLOJNOG TLAKA 33

4.1. Metode za predviđanje gradijenta tlaka frakturiranja 34

4.1.1. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Hubberta i Willisa 35

4.1.2. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Matthewsa i Kellya 37

4.1.3. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Eatona 38

4.2. Ugradnja kolone zaštitnih cijevi u zonama povećanog slojnog tlaka 39

4.2.1. Primjer ugradnje kolone zaštitnih cijevi u bušotinu pod povećanim slojnim tlakom 39

4.3. Cementiranje zona povećanog slojnog tlaka 41

4.4. Mogući problemi prilikom izrade bušotina u zonama povećanog slojnog tlaka 43

4.4.1. Diferencijalni prihvat bušaćih alatki 43

4.4.2. Gubitak cirkulacije 45

5. ZAKLJUČAK 47

6. LITERATURA 48

Popis tablica:

Tablica 2-1. Prosječni gradijenti hidrostatičkog tlaka za pojedina područja S.A.D.-a..... **3**

Tablica 2-2. Tipovi mogućih nepropusnih stijena **7**

Tablica 3-1. Neke od dostupnih tehnika za predviđanje, određivanje i vrednovanje povećanog slojnog tlaka **9**

Tablica 3-2. Usporedba dubina zalijeganja krovina pojedinih slojeva dobivenih na temelju seizmičkih mjerenja i stvarnih dubina krovina dobivenih nakon bušenja..... **14**

Popis slika:

Slika 2-1. Promjena gradijenta geostatičkog i hidrostatičkog tlaka s dubinom **4**

Slika 2-2. Utjecaj pojave rasjeda na nastajanje zona povećanog slojnog tlaka **5**

Slika 2-3. Utjecaj prodiranja solne dome na pojavu povećanog slojnog tlaka **6**

Slika 3-1. Usporedba recipročne brzine širenja seizmičkih valova (intervalnog vremena) s dubinom i normalnog trenda kompakcije stijene **12**

Slika 3-2. Odnos recipročne brzine širenja seizmičkih valova i dubine bušotine..... **13**

Slika 3-3. Usporedba predviđenog slojnog tlaka dobivenog seizmičkim mjerenjima i stvarnog slojnog tlaka dobivenog zvučnom karotažom **15**

Slika 3-4. Usporedba podataka o slojnom tlaku te vrijednosti predviđene i stvarne gustoće isplake..... **16**

Slika 3-5. Odnos gustoća soli, šejlova i šejl/pješčenjak (normalnih) sekvenci..... **17**

Slika 3-6. Korelacija mehaničke brzine bušenja i rezultata elektrokarotažnih ispitivanja . **19**

Slika 3-7. Utjecaj istrošenosti dlijeta na mehaničku brzinu bušenja..... **20**

Slika 3-8. Odnos izračunatog *d* - eksponenta i dubine za bušotinu koja se nalazi na Sjevernom moru **22**

Slika 3-9. Promjena gustoće šejla s dubinom bušotine..... **27**

Slika 3-10. Električna otpornost stijena u odnosu na dubinu..... **30**

Slika 3-11. Vrijeme putovanja akustičnog vala u odnosu na dubinu..... **31**

Slika 4-1. Ilustrativni prikaz promjene odnosa slojnog tlaka, tlaka frakturiranja i gustoće isplake s povećanjem dubine bušotine..... **34**

Slika 4-2. Promjena minimalnog i maksimalnog gradijenta tlaka frakturiranja s dubinom **36**

Slika 4-3. Grafički prikaz procijenjenih krivulja tlaka frakturiranja i slojnog tlaka dobivenih pomoću Eatonove metode **38**

Slika 4-4. Program ugradnje kolone zaštitnih cijevi **40**

Slika 4-5. Ilustrativni prikaz cementacije zona povećanog slojnog tlaka **42**

Slika 4-6. Odnos između dubine, slojnog tlaka i gustoće isplake **44**

Slika 4-7. Dijagram gubitka cirkulacije zbog neadekvante gustoće isplake **45**

Popis priloga:

Prilog 3.1. Nomogram za određivanje *d* - eksponenta**..... 50**

Popis korištenih oznaka i pripadajućih SI jedinica:

D - dubina [m]

D_A - dubina s koje se želi očitati slojni tlak [m]

d_c - modificirani (korigirani) d - eksponent [-]

D_E - normalna, odgovarajuća ekvivalentna dubina D_A [m]

g - gravitacijsko ubrzanje (g = 9,81) [m/s^2]

G_H - gradijent hidrostatičkog tlaka u razmatranoj bušotini [Pa/m]

G_O - gradijent geostatičkog tlaka u razmatranoj bušotini [Pa/m]

H - stvarna vertikalna dubina geoloških formacija iznad razmatrane točke [m]

h - visina stupca fluida [m]

K_i - koeficijent naprezanja stijene za dubinu na kojoj bi vrijednost σ bila jednaka normalnom naprezanju [-]

ρ_1 - normalna gustoća isplake [kg/m^3]

ρ_2 - stvarna gustoća isplake [kg/m^3]

P_f - tlak frakturiranja [Pa]

P_{fg} - gradijent tlaka frakturiranja [Pa/m]

P_g - geostatički tlak [Pa]

P_h - hidrostatički tlak stupca fluida [Pa]

P_s - slojni tlak [Pa]

v - Poissonov koeficijent [-]

ρ - gustoća isplake [kg/m^3]

ρ_{fl} - gustoća fluida u stijeni [kg/m^3]

ρ_{ma} - gustoća matriksa stijene [kg/m^3]

σ - vertikalno naprezanje stijene [Pa]

σ_H - horizontalno naprezanje stijene [Pa]

ϕ - poroznost [$\%$]

1. UVOD

Otkrivanje i vrednovanje nenormalnog (anomalnog) slojnog tlaka u geološkim formacijama vrlo je zahtjevan i kompleksan proces. Nenormalni slojni tlak se u geološkim formacijama pojavljuje kao povećani slojni tlak ili smanjeni slojni tlak. Za otkrivanje zona anormalnog slojnog tlaka koriste se različite geofizičke i karotažne metode mjerenja kao i podaci dobiveni praćenjem različitih parametara tijekom bušenja, odnosno pokazatelja procesa bušenja. Kombinacijom navedenih metoda otkrivanja nenormalnog slojnog tlaka dobivaju se najtočniji podaci o mjestu (dubini) sloja (formacije) s nenormalnim slojnim tlakom i njegovoj vrijednosti. Otkrivanje nenormalnog slojnog tlaka direktno utječe i na projektiranje i izradu bušotina, a očituje se u promjeni parametara bušenja, dubini ugradnje kolone zaštitnih cijevi i samom procesu cementacije kolone zaštitnih cijevi.

U radu su prikazane metode za otkrivanje zona povećanog slojnog tlaka te je kratko opisan utjecaj povećanog slojnog tlaka na projektiranje i izradu bušotina. Utjecaj smanjenog slojnog tlaka nije predmet istraživanja ovog rada i kao takav neće biti razmatran u nastavku.

2. POVEĆANI SLOJNI TLAK

Uzrok povećanog slojnog tlaka nalazi se u kombinaciji više faktora koji su djelovali na okoliš u kojem je nastala određena stijena, ali i na samu stijenu nakon njenog stvaranja. Da bi se razumjela njegova pojava potrebno je prethodno definirati osnovne tlakove koji se pojavljuju u stijeni ili neposredno djeluju na nju.

2.1. Tlakovi koji se pojavljuju u stijeni ili neposredno djeluju na nju

Hidrostatički tlak (*engl. hydrostatic pressure*) definiran je težinom koju ostvaruje stupac fluida određene visine, i izražava se jednadžbom 2-1:

$$P_h = \rho \times g \times h \tag{2-1}$$

Gdje su : P_h - hidrostatički tlak stupca fluida (Pa)
ρ –gustoća fluida (kg/m^3)
g – gravitacijsko ubrzanje (g = 9,81 m/s^2)
h – visina stupca fluida (m)

Na gradijent hidrostatičkog tlaka utječe koncentracija otopljenih čestica (soli) i plinova u stupcu fluida kao i temperaturni gradijent. Povećanjem koncentracije otopljenih čestica povećati će se gradijent hidrostatičkog tlaka, dok će se povećanjem količine plina u stupcu fluida i povećanjem temperature samog fluida smanjiti gradijent hidrostatičkog tlaka. Navedeni parametri direktno će se odraziti tijekom procesa nastajanja stijene na vrijednost slojnog tlaka. U tablici 2-1 prikazani su prosječni gradijenti hidrostatičkog tlaka za pojedina područja S.A.D.-a.

Tablica 2-1. Prosječni gradijenti hidrostatičkog tlaka za pojedina područja S.A.D.-a (Fertl, 1976)

Vrsta fluida	Gradijent hidrostatičkog tlaka (bar/m)	(psi/ft)	Područja u S.A.D. - u
Svježa voda	0,097	0,433	Rocky mountains, Mid- Continent
Slana voda	0,105	0,465	Meksički zaljev

Na stijenu na određenoj dubini djeluje geostatički tlak (*engl. overburden pressure*), koji ovisi o gustoći pokrovnih stijena iznad razmatrane formacije i fluida (vode, nafte ili plina) koji se nalaze u njihovom pornom prostoru. Gradijent geostatičkog tlaka obično se kreće u rasponu od 0,226 bar/m pa sve do 0,305 bar/m (od 1,0 psi/ft pa sve do 1,35 psi/ft) (Fertl, 1976). Prosječna vrijednost geostatičkog tlaka određena je na temelju prosječne gustoće stijena u iznosu od 2310 kg/m^3. Poznavanje gradijenta geostatičkog tlaka je vrlo bitno jer pomoću njega se može odrediti maksimalni očekivani slojni tlak u određenoj formaciji. Geostatički tlak može se izračunati na temelju sljedećeg izraza 2-2:

$$P_g = H \times g \times [(1 - \phi) \times \rho_{ma} + \phi \times \rho_{fl}] \qquad (2\text{-}2)$$

Gdje su - P_g - geostatički tlak (Pa)

H-stvarna vertikalna dubina geoloških formacija iznad razmatrane točke (m)

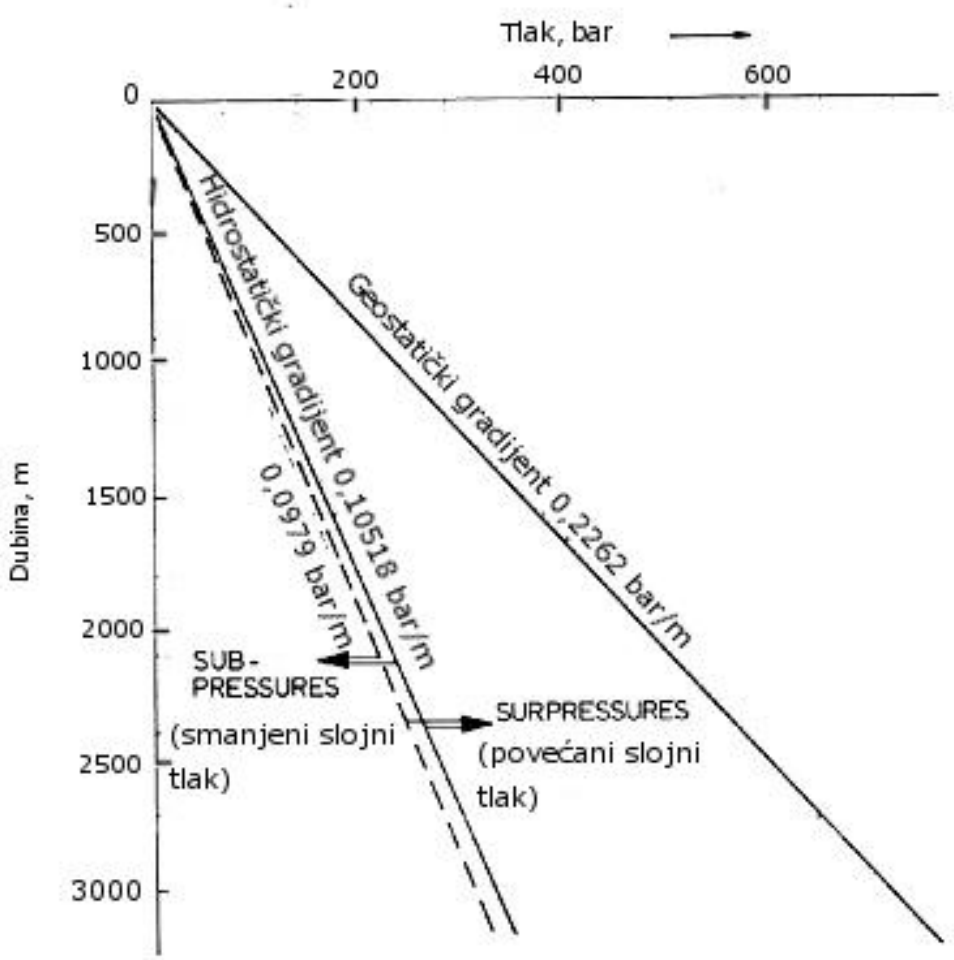
ϕ - poroznost stijena($\%$)

ρ_{ma} - gustoća matriksa stijene (kg/m^3)

ρ_{fl} - gustoća fluida u stijeni (kg/m^3)

Slojni tlak (*engl. formation pressure*) je tlak pod kojim se nalaze fluidi (slojna voda, nafta, plin) u pornom prostoru razmatrane geološke formacije. Definicija normalnog slojnog tlaka podrazumijeva da je slojni tlak jednak hidrostatičkom tlaku koji ostvaruje stupac vode na razmatranoj dubini. Ukoliko je slojni tlak veći od hidrostatičkog tlaka može se zaključiti da se radi o povećanom slojnom tlaku u razmatranoj geološkoj formaciji, odnosno ukoliko je slojni tlak manji od hidrostatičkog tlaka se govori o smanjenom

slojnom tlaku. Na slici 2-1 prikazana je promjena geostatičkog i hidrostatičkog tlaka s povećanjem dubine.

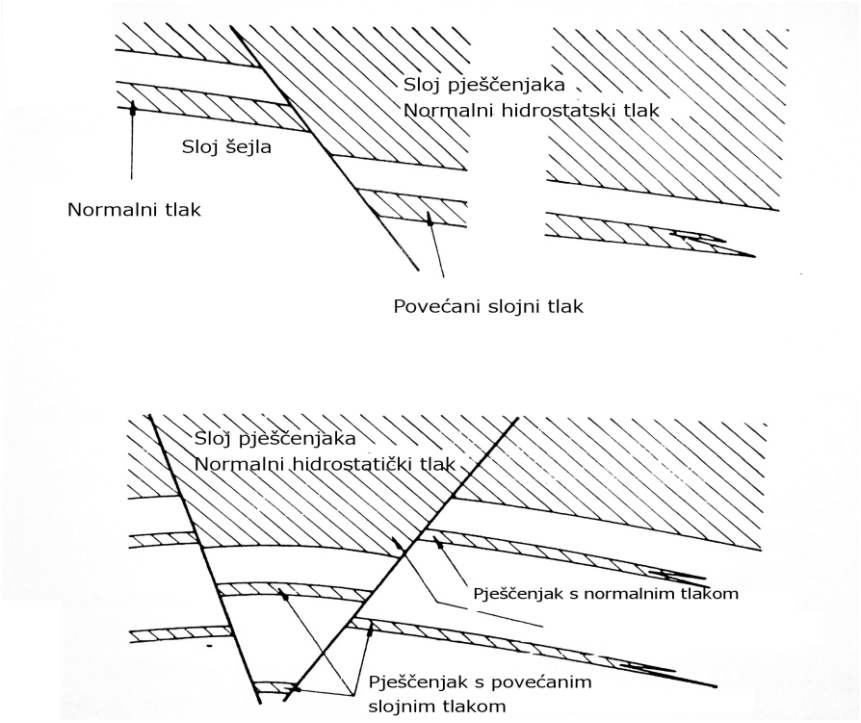


Slika 2-1. Promjena gradijenta geostatičkog i hidrostatičkog tlaka s dubinom (Fertl, 1976)

2.2. Nastajanje zona povećanog slojnog tlaka

Povećani slojni tlak nastaje kada tijekom pokapanja (prekrivanja) sedimentnih stijena dođe do njihove kompakcije koja se odvija tako brzo da fluidi koji se nalaze u pornom prostoru ne mogu migrirati u susjedne formacije (Perić, 2007). Tako „zarobljeni“ fluidi moraju podnijeti dio geostatičkog tlaka formacija koje se nalaze iznad njih. Općenito, uzrok nastajanja zona povećanog slojnog tlaka nalazi se u kombinaciji geoloških, fizičkih, geokemijskih i mehaničkih procesa. Svaki od nabrojenih faktora može imati ključnu ulogu u stvaranju zona povećanog slojnog tlaka. Neki od procesa koji uzrokuju povećani slojni tlak su: kompakcija (zbijanje) stijena, aktivnosti tektonskih ploča, stvaranje rasjeda, stvaranje solnih doma, veliki geotemperaturni gradijent, promjena faza minerala, stvaranje ugljikovodika, migracija ugljikovodičnih plinova uzduž rasjeda, osmoza (Donaldson et al., 2002).

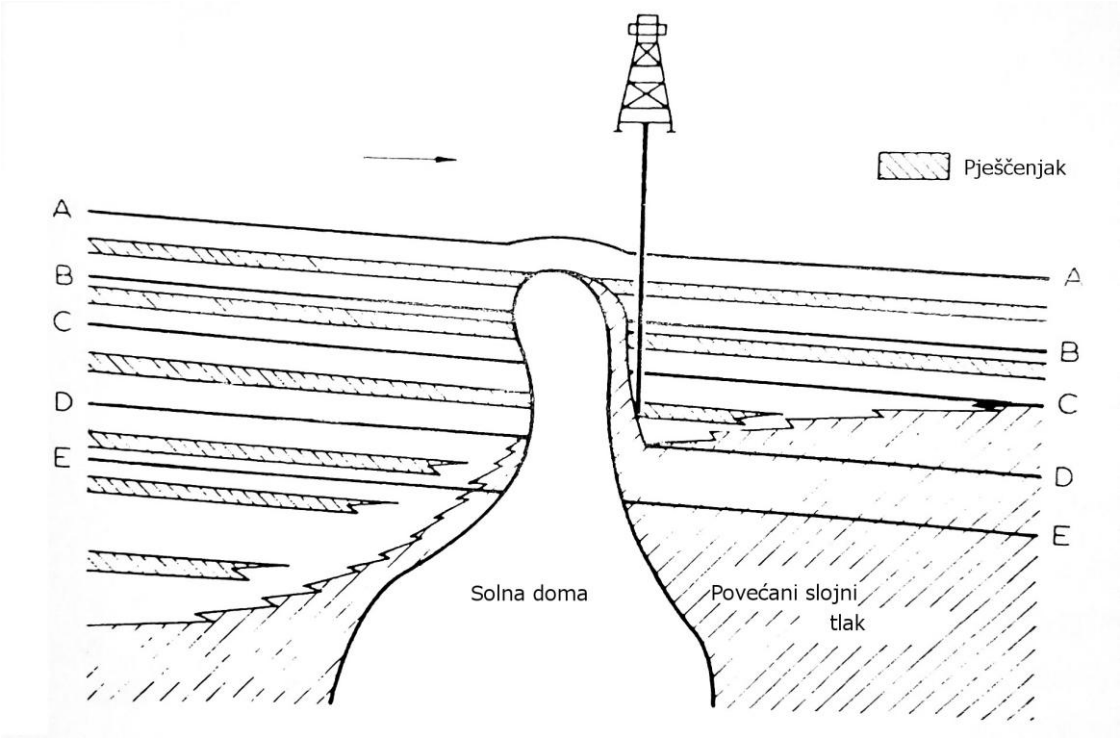
Na slici 2-2 prikazan je primjer zone povećanog slojnog tlaka uzrokovan stvaranjem rasjeda.



Slika 2-2. Utjecaj pojave rasjeda na nastajanje zona povećanog slojnog tlaka (Dickinson, 1953)

Zone povećanog slojnog tlaka na slici 2-2 nastale su stvaranjem rasjeda u formacijama stijena, odnosno sekvencama pješčenjak/šejl. Stvaranjem rasjeda normalni slojni tlak koji je nosio pješčenjak postao je povećani slojni tlak zbog slijeganja sloja na veću dubinu.

Na slici 2-3 prikazan je utjecaj solne dome na stvaranje zone povećanog slojnog tlaka.



Slika 2-3. Utjecaj prodiranja solne dome na pojavu povećanog slojnog tlaka (Harkins i Baugher, 1969)

Poznato je da se sol ponaša kao plastični fluid na visokim temperaturama. Prodor soli prema plićim formacijama omogućava stvaranje zona povećanog slojnog tlaka. Na slici 2-3 vidljivo je da linija krovine povećanog slojnog tlaka prati solnu domu.

Povećani slojni tlak i normalni slojni tlak mogu koegzistirati samo ako su odvojeni razmjerno nepropusnim slojem stijena. Tipovi mogućih nepropusnih stijena, odnosno pokrovnih stijena prikazani su u tablici 2-2.

Tablica 2-2. Tipovi mogućih nepropusnih stijena (Fertl i Timko, 1972)

Izolacija (barijera)	Priroda zamke	Primjer
Vertikalna	Masivni šejlovi i siltiti Masivne nakupine soli Anhidrit Gips Vapnenac, lapor, kreda Dolomit	Gulf Coast, S.A.D, Zechstein u Sjevernoj Njemačkoj Sjeverno more, Bliski Istok S.A.D., Bivši S.S.S.R.
Transverzalna	Rasjedi Antiklinale	Diljem svijeta
Kombinacija vertikalne i transverzalne barijere		Diljem svijeta

U pravilu maksimalna vrijednost povećanog slojnog tlaka ne bi trebala prelaziti iznos tlaka koji ostvaruje težina formacija koje se nalaze iznad razmatranog sloja, tj. prosječnu vrijednost gradijenta geostatičkog tlaka (0,226 bar/m)(Fertl, 1976).

Postojanje zona povećanog slojnog tlaka česta je pojava. Diljem svijeta zabilježeni su slučajevi nailazaka na zone povećanog slojnog tlaka prilikom izrade bušotina. Povećani slojni tlak pojavljuje se prilikom bušenja na kopnu (*engl. onshore*) i moru (*engl. offshore*), na plićim i velikim dubinama, u mlađim i starijim stijenama (Bigelow, 1994). Tipični uzroci pojave povećanog slojnog tlaka na najvećim geološkim strukturama na Bliskom Istoku su solne dome i šejlovi, tektonika ploča i velika razlika u gustoći fluida. U Europi, pojava povećanog slojnog tlaka zabilježena je većinom prilikom izrade bušotina na moru. Pomorska područja oko Ujedinjenog Kraljevstva, Norveške, Danske, Njemačke i Nizozemske, kao i Mediterankso, Jadransko i Egejsko more mjesta su na kojima je prilikom izrade bušotine zabilježeno postojanje zona povećanog slojnog tlaka.

Prilikom projektiranja i izrade kanala bušotine od iznimne je važnosti poznavati točnu vrijednost povećanog slojnog tlaka kao i dubinu na kojoj se on pojavljuje. Kvaliteta projektiranja programa zacijevljenja niza zaštitnih cijevi i određivanje adekvatnog programa gustoće isplake ovisit će o poznavanju vrijednosti povećanog slojnog tlaka. Ne samo da će poznavanje povećanog slojnog tlaka uvelike povećati sigurnost i praktičnost izvedbe izrade kanala bušotine, nego će i s ekonomskog aspekta omogućiti ugradnju kolone zaštitnih cijevi uz tehnički minimalne zahtjeve za nadvladavanje takvog tlaka. Sve spomenuto će se očitovati u tehničkoj ispravnosti i ekonomskoj isplativosti projekta.

3. METODE OTKRIVANJA I VREDNOVANJA POVEĆANOG SLOJNOG TLAKA

Otkrivanje formacija s povećanim slojnim tlakom i njegovo vrednovanje vrši se pomoću mjerenja i interpretacije dobivenih podataka različitih metoda. Općenito, za otkrivanje i vrednovanje formacija s povećanim slojnim tlakom koriste se geofizička mjerenja, karotažna mjerenja te podaci dobiveni tijekom bušenja.

U tablici 3-1 prikazane su neke tehnike pomoću kojih je moguće predvidjeti, otkriti i vrednovati povećani slojni tlak.

Tablica 3-1. Neke od dostupnih tehnika za predviđanje, određivanje i vrednovanje povećanog slojnog tlaka (Fertl, 1976)

Izvor podataka	Indikacije povećanog tlaka	Vrijeme mjerenja
Geofizičke metode	Seizmika Gravitmetrija Magnetometrija	Prije bušenja
Parametri koji se prate tijekom bušenja	Brzina bušenja d- eksponent Modificirani d eksponent Karotažna mjerenja Poroznost Torzija	Za vrijeme bušenja
Praćenje svojstava isplake	Promjena gustoće isplake Promjena temperature isplake Pliniziranje isplake Razina isplake Dotok slojnog fluida	Za vrijeme bušenja (odgođeno za vrijeme potrebno da se isplaka vrati na površinu)

Krhotine stijena	Gustoća Obujam, oblik i veličina krhotina	Za vrijeme bušenja (odgođeno za vrijeme potrebno da se isplaka vrati na površinu)
Bušotinska karotaža	Elektrokarotažna mjerenja (otpornost, provodljivost, promjena saliniteta) Akustična mjerenja	Nakon bušenja
Direktno mjerenje tlaka	Iskušavanje (drill-stem test, DST)	Prilikom testiranja bušotine

3.1. Geofizičke metode

Prilikom istraživanja novih područja, potencijalnih ležišta ugljikovodika i definiranja geoloških modela u podzemlju kao prvi i osnovni korak poduzimaju se geofizička mjerenja. Geofizička mjerenja za cilj imaju odrediti geološki sastav i građu istraživanog područja. Najčešće upotrebljavane geofizičke metode za otkrivanje povećanog slojnog tlaka su seizmičke i gravimetrijske metode. Njihovom interpretacijom može se odrediti litološki sastav stijena te dubina i vrijednost povećanog slojnog tlaka. Također, pomoću dobivenih rezultata geofizičkih mjerenja mogu se odrediti optimalni parametri bušenja i kvalitetnije projektirati programi zacijevljenja kanala bušotine.

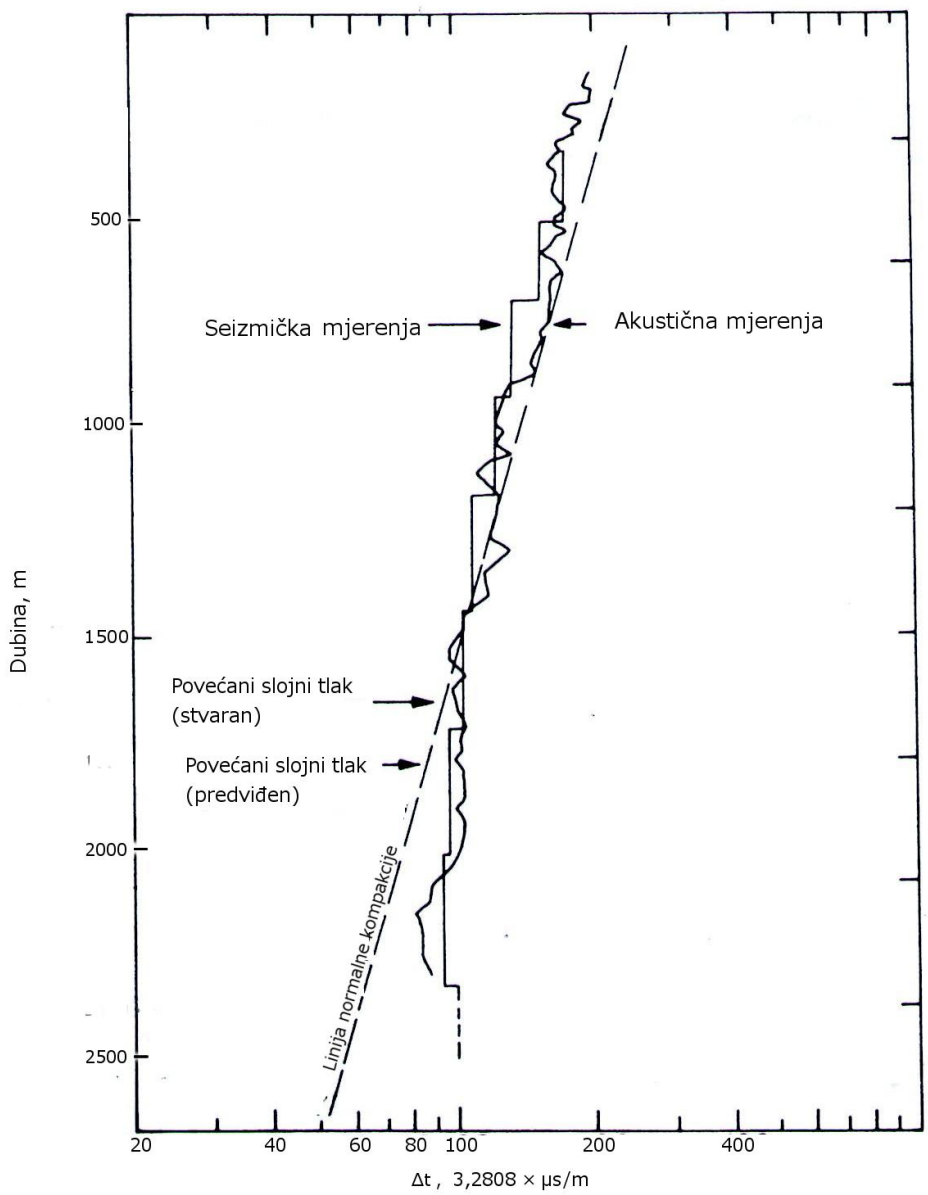
3.1.1. Seizmička mjerenja

Seizmičke metode temelje se na određivanju brzina rasprostiranja seizmičkih valova kroz stijene. Brzina putovanja seizmičkog vala određuje se iz vremena putovanja vala od izvora do detektora. To je moguće zato jer elastični valovi putuju različitim brzinama kroz različite stijene. Najčešće se promjene brzina rasprostiranja valova podudaraju s litološkim granicama što omogućava definiranje litološke građe razmatranih slojeva. Seizmička mjerenja se dijele na refrakcijska i refleksijska mjerenja. Refrakcijska

mjerenja se uglavnom baziraju na relativno plitkim istraživanjima do nekoliko stotina metara. Za istraživanje ugljikovodika i definiranje litoloških granica na većim dubinama koristi se refleksijska metoda.

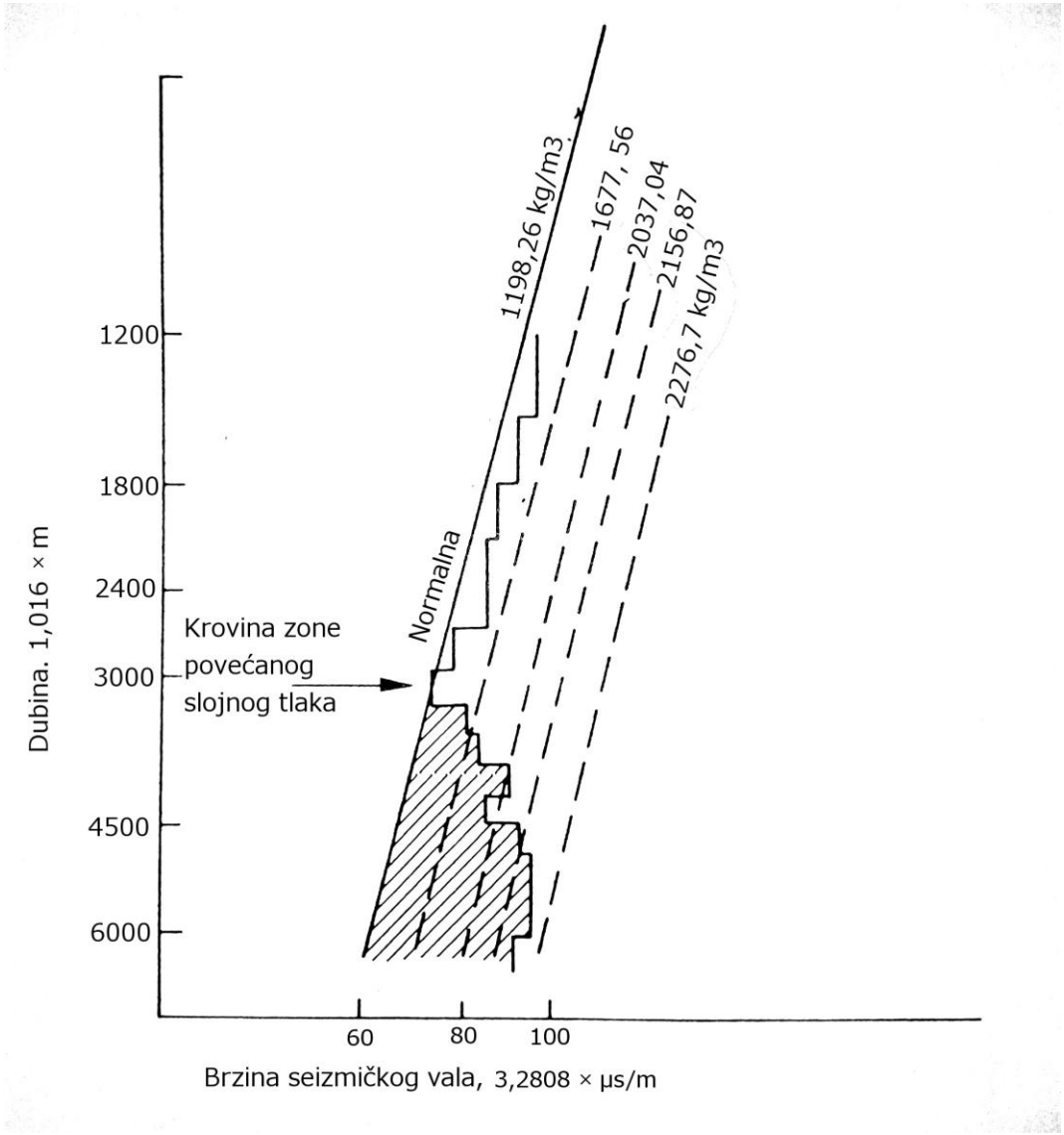
Zonu povećanog slojnog tlaka (dubinu zalijeganja sloja i vrijednost povećanog slojnog tlaka u njemu) također je moguće otkriti pomoću podataka dobivenih seizmičkim mjerenjima. Dokazano je da se brzina širenja seizmičkih valova u izmjenama šejl/pješčenjak povećava s dubinom. Na temelju tog zaključka može se definirati linija kretanja normalnog (hidrostatičkog) tlaka formacije ukoliko se radi o istom litološkom sastavu stijena kroz koje se prostiru seizmički valovi. Naslage s povećanim slojnim tlakom u pravilu imaju veću poroznost stijena od uobičajene bez obzira na kojoj dubini se ta formacija nalazi. Zbog svega navedenog, nailazak seizmičkog vala na zonu povećanog slojnog tlaka odrazit će se na smanjenje brzine rasprostiranja vala te će ona odudarati od linije predviđenih brzina za normalni tlak formacije.

Na slici 3-1 prikazan je dijagram dobiven analizom podataka refleksijskom metodom.



Slika 3-1. Usporedba recipročne brzine širenja seizmičkih valova (intervalnog vremena) s dubinom i normalnog trenda kompakcije stijene (Reynolds, 1973)

Na slici 3-2 prikazan je dijagram promjene recipročne brzine širenja valova s dubinom u bušotini u Meksičkom zaljevu, kao i procijenjena vrijednost povećanog slojnog tlaka izražena kao ekvivalentna gustoća isplake.



Slika 3-2. Odnos recipročne brzine širenja seizmičkih valova i dubine bušotine (Pennebaker, 1968a) (Courtesy of World Oil)

Uočljivo je odstupanje linije recipročne brzine širenja seizmičkih valova od linije normalnog trenda kompakcije stijena nakon nailaska na zonu povećanog slojnog tlaka. Pravilnom interpretacijom dobivenih seizmičkih mjerenja može se prilično precizno odrediti na kojoj dubini se nalaze krovine pojedinih slojeva. Statistička istraživanja koja su proveli Woeber i Penhollow 1973 godine pokazala su da porastom dubine raste i mogućnost greške u interpretaciji seizmičkih mjerenja. Tako kod 80% razmatranih slučajeva (polja) kod plićih formacija od 1524 do 3659 m (od 5000 do 12 000 ft) preciznost određivanja krovinskih stijena, odnosno mogućnost greške u interpretiranju

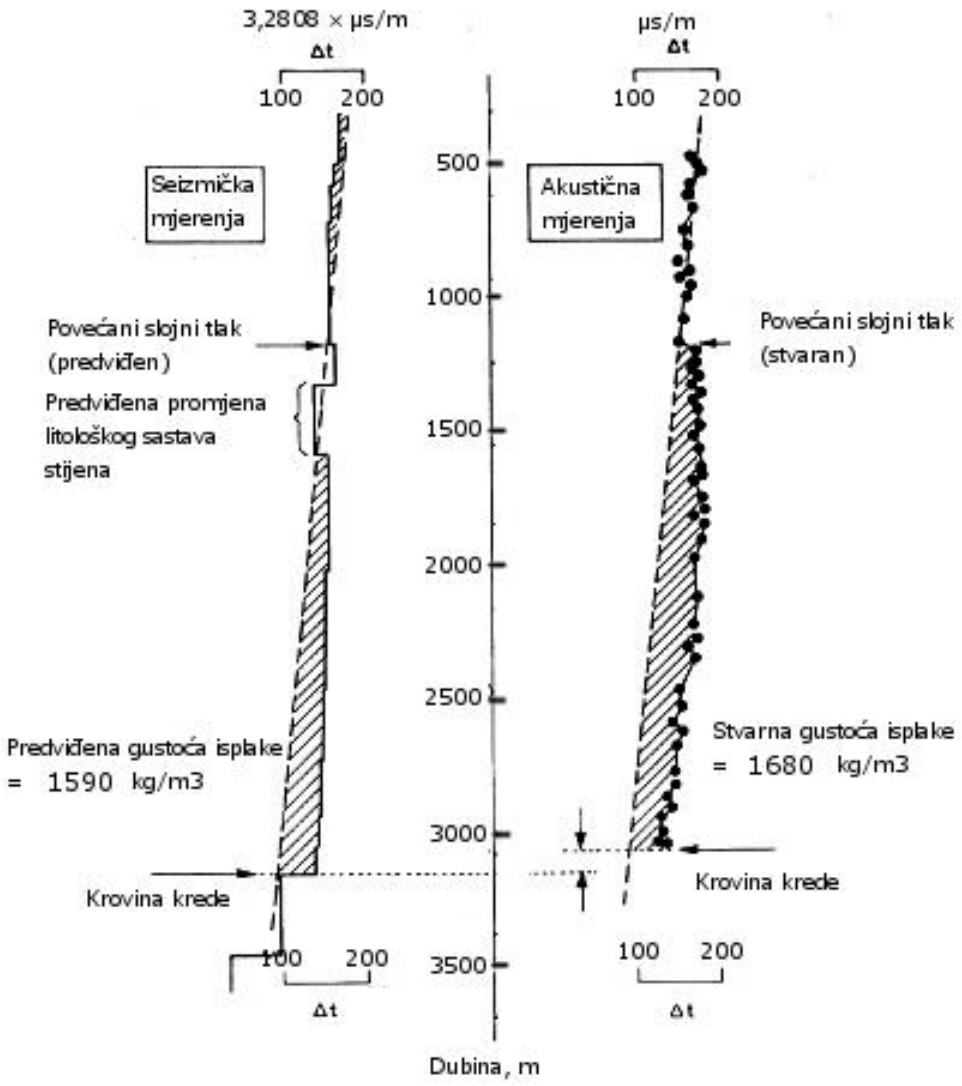
seizmičkih mjerenja iznosila je svega 1 do 2 %, dok za veće dubine pogreška raste preko 2%.

Međutim, upotrebom posebno dizajniranih seizmičkih mjerenja, koja se upotrebljavaju isključivo za otkrivanje dubljih formacija, krovine slojeva su otkrivene s preciznošću većom od 1 %. U tablici 3-2 prikazana je usporedba između dubina zalijeganja krovina slojeva dobivenih na temelju seizmičkih mjerenja i stvarnih krovina ustanovljenih nakon bušenja u bušotini Farrar 1 (Andarko Basin, Oklahoma. S.A.D.).

Tablica 3-2. Usporedba dubina zalijeganja krovina pojedinih slojeva dobivenih na temelju seizmičkih mjerenja i stvarnih dubina krovina dobivenih nakon bušenja (Louden et al., 1971)

Formacija	Dubina (m)	
	Predviđena	Stvarna
Smeđi dolomit	1600,2	1432,56
Atoka marker	4312,92	4197,1
Vapnenački marker	4678,68	4715,25
Morrow marker	5254,75	5169,4
Springer marker	6248,4	6278,88
Masivni karbonati	6842,76	6806,18

Na slici 3-3 prikazan je dijagram usporedbe predviđenog i stvarnog tlaka formacije u području Sjevernog mora dobivenih seizmičkim istraživanjima i karotažnim mjerenjima u bušotini.

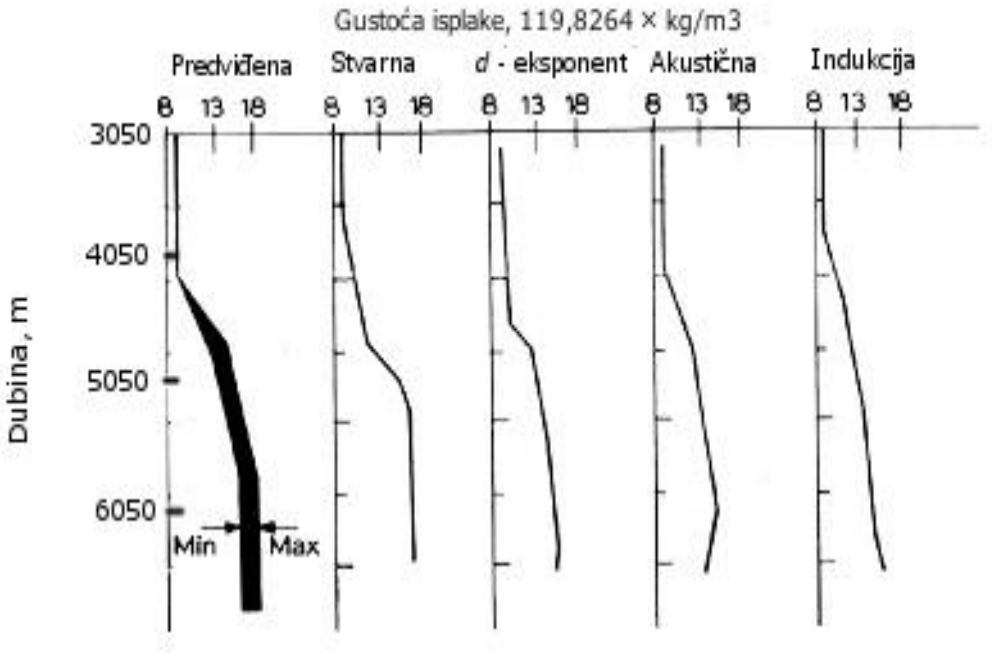


Slika 3-3. Usporedba predviđenog slojnog tlaka dobivenog seizmičkim mjerenjima i stvarnog slojnog tlaka dobivenog zvučnom karotažom (Herring, 1973.) (Courtesy of Petroleum Engineer.)

Kako je vidljivo na slici 3-3 na manjim dubinama ostvarena je veća preciznost između predviđenih i stvarnih krovina formacije povećanog slojnog tlaka, dok je s porastom dubine, odnosno s nailaskom na krovinu nove formacije, ostvarena veća razlika između predviđene i stvarne dubine. Pogreška u određivanju vrha krovine odrazila se u promijeni potrebne gustoće isplake za nadvladavanje slojnog tlaka, odnosno na temelju seizmičkih podataka određena je potrebna gustoća isplake od 1590 kg/m^3 dok je stvarna gustoća isplake tijekom bušenja iznosila 1680 kg/m^3.

Pravilnom interpretacijom seizmičkih podataka moguće je odrediti vrijednost slojnog tlaka u rasponu od ± 120 kg/m^3 ekvivalentne gustoće isplake te predvidjeti dubinu krovine formacija u rasponu od ± 152 m (Reynolds, 1973).

Na slici 3-4 prikazani su podaci o stvarnoj i prognoznoj potrebnoj gustoći isplake za bušenje duboke bušotine u Oklahomi s obzirom na podatke dobivene na temelju seizmičkih podataka, praćenja parametara bušenja (*d*-eksponent) te iz zvučne i induktivne karotaže.

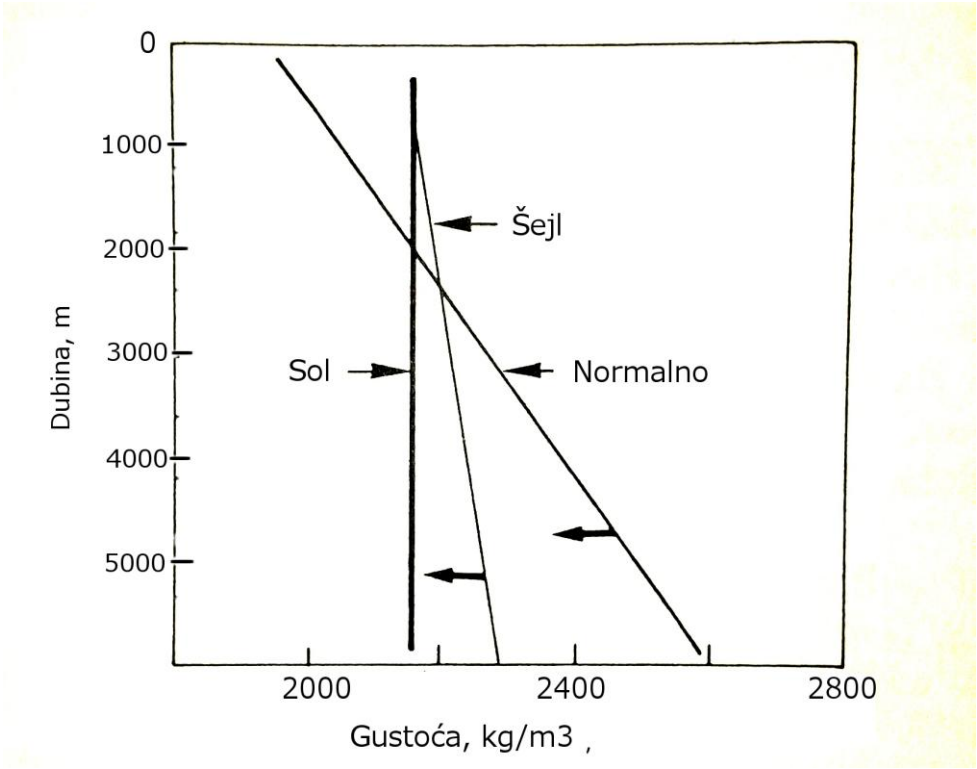


Slika 3-4. Usporedba podataka o slojnom tlaku te vrijednosti predviđene i stvarne gustoće isplake (Louden et al., 1971) (Courtesy of World Oil).

Iz priložene slike može se zaključiti da se različitim metodama dobivaju različiti podaci o potrebnim gustoćama isplake za bušenje određene bušotine, kao i dubine zalijeganja sloja s povećanim slojnim tlakom. Stoga je potrebno pažljivo proanalizirati sve dostupne podatke.

3.1.2. Gravimetrijska mjerenja

Gravimetrijske metode mjerenja i njihova interpretacija mogu pomoći u definiranju zona povećanog slojnog tlaka. Međutim, korištenje isključivo gravimetrijske metode nije preporučljivo jer u pojedinim slučajevima nije moguće kvalitetno interpretirati dobivene rezultate mjerenja. Kako se gravimetrijska metoda zasniva na otkrivanju stijena različitih gustoća, a karakteristike zona povećanog slojnog tlaka su naslage manje gustoće, ponekad je gotovo nemoguće razlikovati zonu povećanog slojnog tlaka od naslaga soli. Zato se gravimetrijska mjerenja uglavnom obavljaju kao dodatak seizmičkim mjerenjima radi lakšeg utvrđivanja zona povećanog slojnog tlaka. Na slici 3-5 prikazan je odnos gustoća između soli, šejlova i normalnih šejl/pješčenjak sekvenci.



Slika 3-5. Odnos gustoća soli, šejlova i šejl/pješčenjak (normalnih) sekvenci (Fertl, 1976)

Na slici 3-5 uočljivo je da se gustoća soli ne mijenja s porastom dubine, dok se gustoća šejlova i sekvencija šejl/pješčenjak povećava s porastom dubine. U slučaju da je detektiran sloj s povećanim slojnim tlakom u blizini solnih domi, njegovo postojanje bi

prikrila sama sol te je stoga preporučljivo koristiti gravimetrijska mjerenja isključivo kao dodatak seizmičkim mjerenjima.

3.2. Podaci dobiveni bušenjem

Podaci dobiveni tijekom bušenja različitih geoloških formacija uvelike mogu pomoći u daljnjoj analizi određenog geološkog prostora. Dobiveni podaci u kombinaciji s geofizičkim i karotažnim mjerenjima daju najtočniju sliku strukturnih odnosa u podzemlju na određenoj lokaciji, litologiji i svojstvima stijena i fluida prisutnih u njima. S tehničkog i ekonomskog aspekta podaci dobiveni tijekom bušenja uvelike olakšavaju planiranje i izradu sljedećih bušotina na razmatranom polju. Neki od podataka koji se standardno prate (mjere) prilikom bušenja su: protok isplake, razina isplake u bušotini, gustoća isplake, temperatura isplake, brzina spuštanja i vađenja niza bušaćih alatki i torzija. Svako nepredviđeno odstupanje od uobičajenih vrijednosti popraćeno je alarmom kako bi se izbjegle neželjene situacije. Pravilnim odabirom isplaka koje će se koristiti tijekom bušenja baziranim na poznavanju gradijenta tlaka frakturiranja kao i vrijednosti slojnih tlakova, različiti problemi poput smanjenja brzine bušenja uzrokovanog prevelikom gustoćom isplake ili neželjenog dotoka slojnog fluida svest će se na minimum. Također, smanjit će se mogućnosti prihvata bušaćih alatki uslijed prevelikog diferencijalnog tlaka ili pojave gubitka cirkulacije isplake.

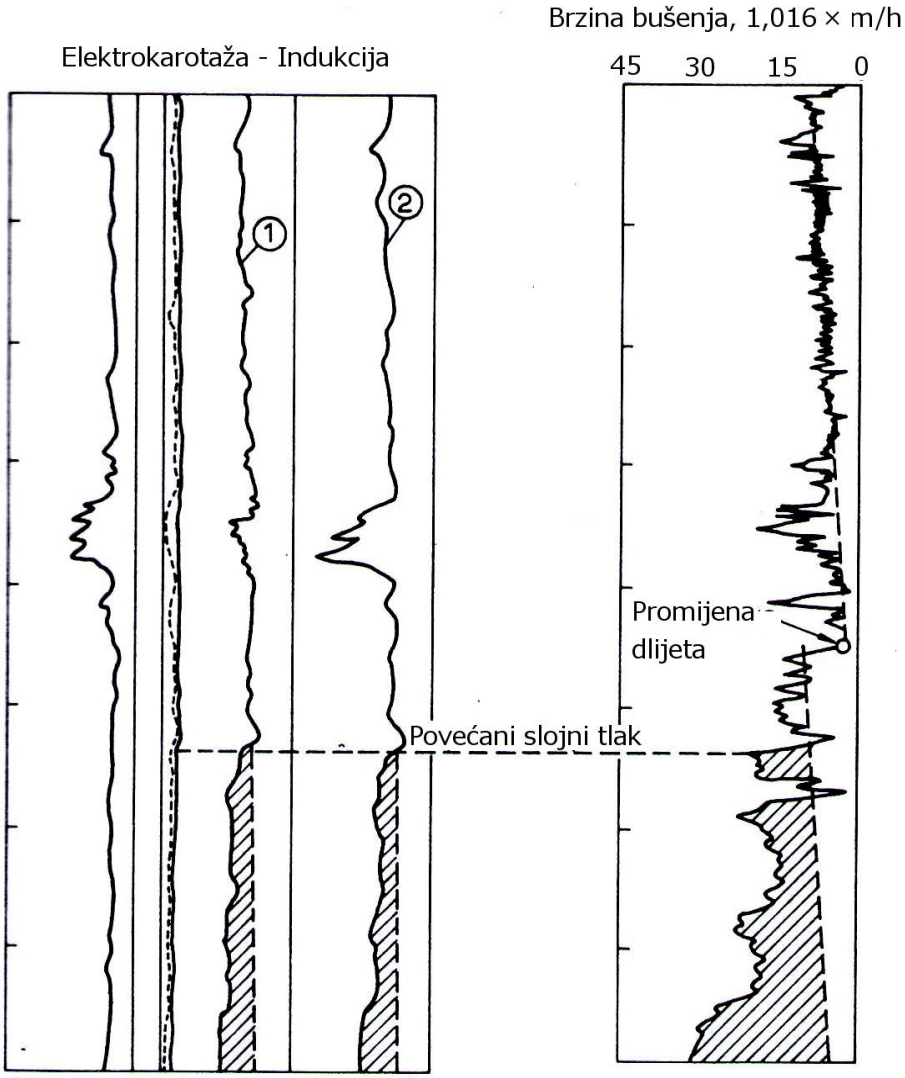
3.2.1. Parametri koji se prate tijekom bušenja

U nastavku je dan pregled parametara koji se prate tijekom bušenja na temelju kojih je moguće predvidjeti zone s povećanim slojnim tlakom .

3.2.1.1. Brzina bušenja

Promjena u mehaničkoj brzini bušenja potencijalno je prvi indikator o nailasku na novu litološku formaciju ili o nailasku na zonu nenormalnog slojnog tlaka. Prilikom kontroliranih uvjeta, tj. konstantnog održavanja opterećenja na dlijeto, broja okretanja dlijeta, tipa dlijeta i hidrauličkih parametara, mehanička brzina bušenja se smanjuje s dubinom. To je posljedica veće zbijenosti i promjene mehaničkih svojstava stijena na većoj

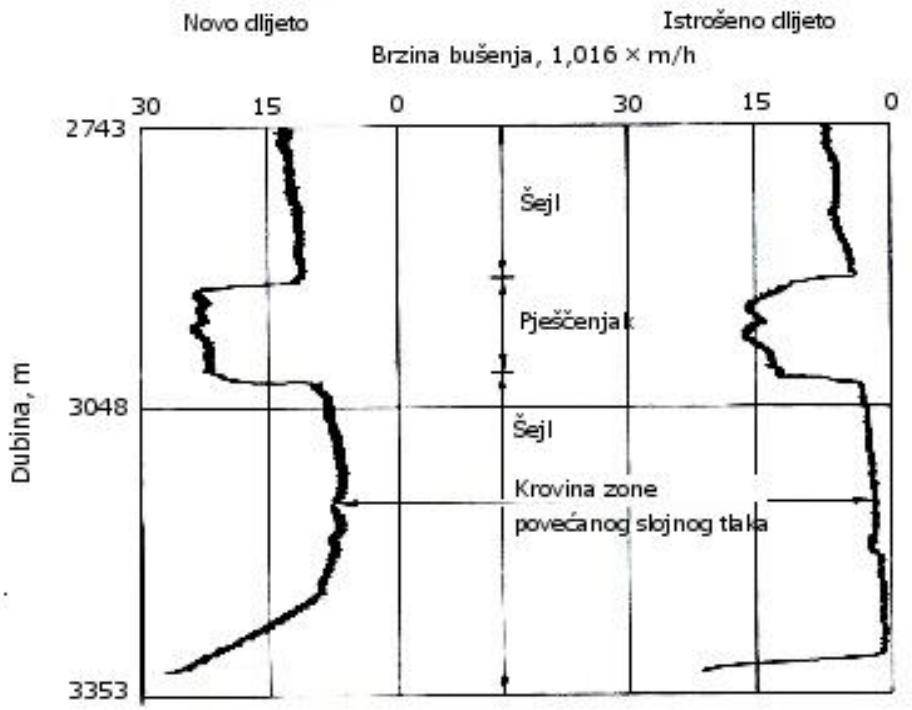
dubini. Međutim, prilikom bušenja kroz zonu povećanog slojnog tlaka dolazi do naglog povećanja mehaničke brzine bušenja. Na slici 3-6 prikazana je promjena mehaničke brzine bušenja u odnosu na dubinu. Osim promjene mehaničke brzine bušenja s dubinom, na slici 3-6 prikazana je i korelacija rezultata elektrokarotažnih mjerenja i brzine bušenja, čime se dobivaju još točniji podaci o dubini na kojoj dolazi do pojave povećanog slojnog tlaka.



Slika 3-6. Korelacija mehaničke brzine bušenja i rezultata elektrokarotažnih ispitivanja (Jorden i Shirley, 1966)

Iako je povećanje mehaničke brzine bušenja prva indikacija u procesu otkrivanja povećanog slojnog tlaka tijekom bušenja, treba imati u vidu i utjecaj različitih parametara

bušenja i stanja dlijeta na promjenu mehaničke brzine bušenja. Naime, ukoliko je dlijeto oštećeno ili istrošeno ono može dati krive podatke o mehaničkoj brzini bušenja kroz određenu geološku formaciju i tako prikriti zonu povećanog slojnog tlaka. Na slici 3-7 prikazan je utjecaj istrošenosti dlijeta na mehaničku brzinu bušenja.



Slika 3-7. Utjecaj istrošenosti dlijeta na mehaničku brzinu bušenja (Matthews, 1969)

Na slici 3-7 uočljivo je kako istrošeno dlijeto neće adekvatno reagirati prilikom nailaska na zonu povećanog slojnog tlaka te će na ovaj način prikriti postojanje zone povećanog slojnog tlaka. Također, promjena litološkog sastava stijene biti će slabije uočljiva nego prilikom bušenja s ispravnim dlijetom.

3.2.1.2. d – Eksponent (normalna mehanička brzina bušenja)

Kako nije uvijek moguće održavati konstantno opterećenje na dlijeto i konstantnu brzinu okretaja dlijeta prilikom bušenja razvijena je nova metoda koja omogućava predviđanje normalne mehaničke brzine bušenja u odnosu na dubinu. Predviđanjem normalne mehaničke brzine bušenja i njezinim uspoređivanjem sa stvarnom mehaničkom brzinom bušenja moguće je prepoznati zonu povećanog slojnog tlaka. Metodu su osmislili i publicirali 1966 godine Jorden i Shirley, a temelji se na izračunavanju bezdimenzionalnog broja *d* koristeći mehaničku brzinu bušenja, promjer dlijeta, opterećenje na dlijeto i broj okretanja dlijeta. U Prilogu 3.1 prikazan je originalni nomogram za određivanje *d*- eksponenta u anglo-američkom sustavu jedinica.

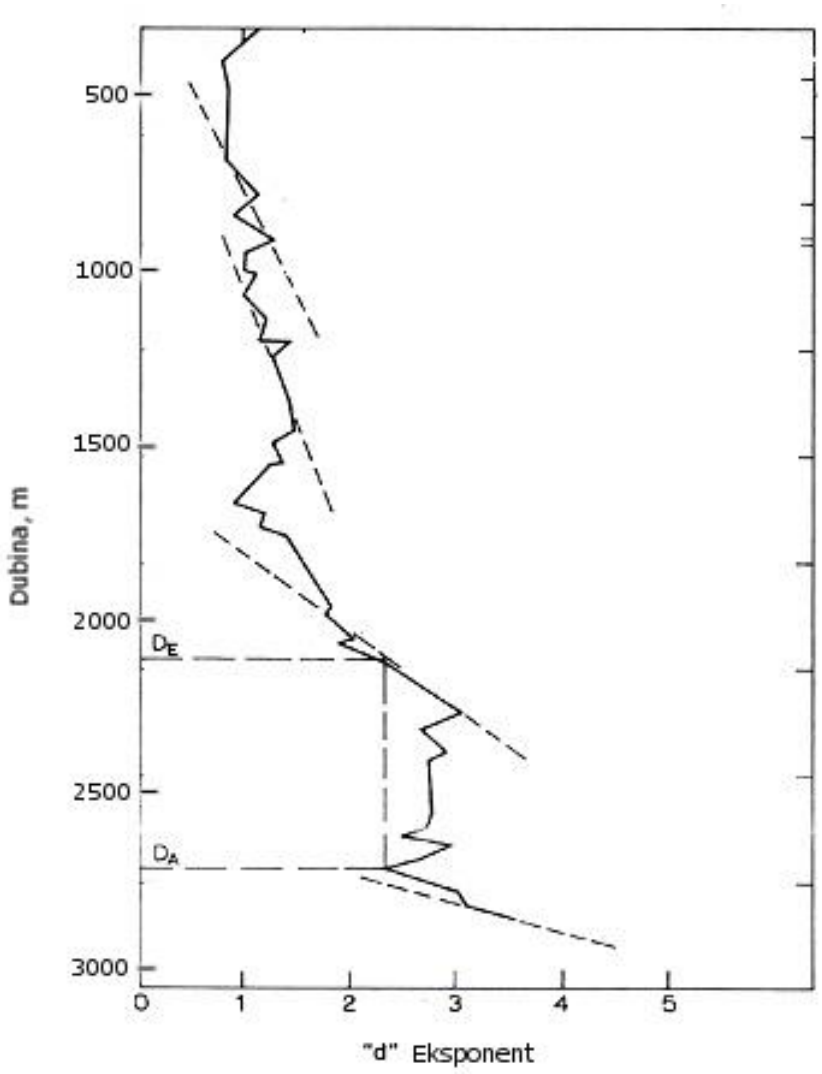
U zonama povećanog slojnog tlaka izračunata vrijednost *d* – eksponenta je manja nego što je uobičajeno za formacije s normalnim slojnim tlakom.

Nakon određivanja *d* – eksponenta iz parametara bušenja moguće je kvantitativno procijeniti tlak pomoću jednadžbe 3-1:

$$P_s = G_O \times D_A - D_E \times (G_O - G_H) \qquad (3\text{-}1)$$

gdje su: P_s - slojni tlak (*Pa*)
G_O - gradijent geostatičkog tlaka (*Pa/m*)
D_A - dubina za koju se želi dobiti slojni tlak (*m*)
D_E - normalna, odgovarajuća ekvivalentna dubina *Da* (*m*)
G_H - gradijent hidrostatičkog tlaka (*Pa/m*)

Na slici 3-8 prikazana je primjena jednadžbe za kvanititativno računanje slojnog tlaka u bušotini lociranoj na Sjevernom moru.



Slika 3-8. Odnos izračunatog d eksponenta i dubine za bušotinu koja se nalazi na Sjevernom moru (Bolt, 1972)

Primjer kvantitativnog računanja slojnog tlaka za bušotinu sa slike 3-8 koristeći jednadžbu 3-1 : Ulazni podaci

G_O = 22620 Pa/m

D_A = 2713 m

G_H = 10518,3 Pa/m

D_E = 2106 m

Rješenje

P_s = (22620 × 2713) – (2106) × (22620 – 10518,3)

P_s = 35881879,8 Pa

Vrijednosti *d* – eksponenta mijenja se između ostalog i s bilo kojom promjenom tipa i promjera dlijeta kao i promjenom litološkog sastava stijene. Također, promjena gustoće isplake utječe na vrijednost *d* – eksponenta što može utjecati na otkrivanje zona povećanog slojnog tlaka. Kako bi se smanjio utjecaj promjene gustoće isplake na ispravnu interpretaciju dobivenih podataka uvedena je modifikacija *d* – eksponenta.

Jednadžba za modificirani *d* – eksponent (3-2) je sljedeća:

$$d_c = d \times (\rho_1 / \rho_2) \tag{3-2}$$

gdje su : d_c – modificirani (korigirani) *d* – eksponent
ρ_1 – normalna gustoća isplake (kg/m^3)
ρ_2 – stvarna gustoća isplake (kg/m^3)

3.2.1.3. Jednadžbe brzine bušenja

Brzina bušenja može se izraziti na više načina. Neke od njih su matematičke metode koje svojom kompleksnošću pristupa omogućavaju uspostavljanje korelacija između brzine bušenja i slojnog tlaka. Za upotrebu takvih metoda nužno je poznavati konkretne podatke pridobivene za određeno razmatrano područje. Neki od tih podataka su pridobiveni iz ranije izbušenih bušotina ili iz podataka dobivenih testiranjem kratkih intervala bušotine koja se trenutno izrađuje.

Glavni nedostatak primjene ovakvih jednadžbi za računanje brzine bušenja je promjena litološkog sastava stijena. Naime, za računanje brzine bušenja na ovakav način, litološki sastav stijene mora biti konstantan. Kako to obično nije slučaj ovu metodu bi bilo poželjno koristiti kao nadopunu ostalima.

3.2.1.4. Promjena poroznosti tijekom bušenja

Koristeći računalni model koji opisuje relaciju između slojnog tlaka i bušaćih parametara, moguće je prepoznati tip formacije, poroznost i potencijalne promjene u

slojnom tlaku prilikom izrade kanala bušotine (Zoeller, 1970). Odstupanje vrijednosti poroznosti od uobičajene za određenu dubinu može ukazivati na postojanje zone nenormalnog tlaka. Svako povećanje primarne poroznosti odgovara postojanju zone povećanog slojnog tlaka. Kako bi se sa sigurnošću mogla utvrditi poroznost formacija i iznos slojnog tlaka predložen je model koji je opisan funkcijama koje utječu na pravilno izračunavanje mehaničke brzine bušenja. Dakle, potrebno je poznavati „konstantu“ bušenja, odnosno trend normalne brzine mehaničkog bušenja za određenu formaciju; funkciju koja definira utjecaj opterećenja na dlijeto; funkciju koja definira utjecaj broja okretanja dlijeta; funkciju koja definira utjecaj istrošenosti zubi dlijeta; funkciju koja definira utjecaj diferencijalnog tlaka u bušotini. Poznavanjem vrijednosti dobivenih ovakvim modelom bušenja moguće je sa sigurnošću utvrditi postojanje zona povećanog slojnog tlaka kao i poroznost stijene.

3.2.1.5. Torzija

Zbog povećanog kontakta između niza bušaćih alatki i stijenki kanala bušotine torzija se povećava s dubinom (Fertl, 1976). Na bušaćim postrojenjima konstanto se prati iznos torzije prilikom bušenja. Svaka drastična promjena, tj. povećanje torzije može biti indikator nailaska na zonu povećanog slojnog tlaka.

3.2.2. Svojstva i sastav isplake

Podaci o različitim promjenama svojstva isplake (promjena gustoće, utok slojnog fluida i dr.) dobiveni tijekom bušenja imaju određeni vremenski pomak između trenutka nastanka promjene i trenutka kada se promjena registrira na površini, odnosno dobivanje podataka je odgođeno za vrijeme potrebno da se isplaka s dna bušotine vrati na površinu. Najznačajniji podaci koji mogu ukazivati na postojanje zone povećanog slojnog tlaka su promjene gustoće isplake, prisutnosti različitih fluida u isplaci, pliniziranje isplake te promjena temperature isplake.

3.2.2.1. Povećanje udjela plina u isplaci

Mjerenje prisutnosti plina u isplaci vrlo je bitno zbog više razloga. Ne samo da može otkriti postojanje zone povećanog slojnog tlaka nego može biti i prvi indikator neželjenog dotoka slojnog fluida u bušotinu. Treba napomenuti da uočavanje spomenutih promjena u svojstvima i sastavu isplake ne mora nužno značiti i nailazak na zonu povećanog slojnog tlaka. Postoje mnogi drugi faktori koji mogu utjecati i na taj način otežati upotrebu ovih podataka za otkrivanje zona povećanog slojnog tlaka. Neki od njih su: zone povećane propusnosti za plin, plin koji uđe u bušotinu svakim zadizanjem niza bušaćih alatki, zrak koji uđe u bušaće alatke prilikom dodavanja nove bušaće šipke na bušaćem tornju, povećana količina plina u isplaci nakon prestanka cirkulacije, sastav plina te postojanje rasjeda.

3.2.2.2. Gustoća isplake

Svaka promjena u gustoći isplake koja odstupa od normalne može biti indikator postojanja zone povećanog slojnog tlaka kao i prisustva plina u isplaci. Konstanto mjerenje gustoće isplake prilikom bušenja omogućava kvalitetniju interpretaciju podataka i veću sigurnost u određivanju mogućih uzroka promjene gustoće isplake.

3.2.2.3. Dotok slojnog fluida u bušotinu

Prodor fluida iz sloja u bušotinu koji ima veću gustoću od gustoće isplake često predstavlja indikaciju zone povećanog slojnog tlaka. U praksi, ukoliko je razlika u gustoći između slojnog fluida i isplake jednaka ili veća od 60 kg/m^3 radi se o nailasku na zonu povećanog slojnog tlaka. Zabilježeni su pojedini slučajevi dotoka slojnog fluida u iznosu od 960 kg/m^3. Iako je indikacija zone povećanog slojnog tlaka, dotok slojnog fluida u bušotinu može uzrokovati ozbiljne probleme od zaglave bušaćih alatki uslijed diferencijalnog prihvata pa sve do nekontroliranog dotoka slojnog fluida u bušotinu.

3.2.2.4. Promjena temperature isplake

Dokazano je da se povećanje temperature u zonama povećanog slojnog tlaka odvija brže s porastom dubine nego u normalnim formacijama. Međutim, kako je točnu temperaturu isplake na određenoj dubini moguće izmjeriti samo u temperaturno stabilnim uvjetima poslije bušenja, za određivanje zona povećanog slojnog tlaka mjeri se promjena temperature isplake prilikom njenog povratka na površinu. Također, vodljivost topline pojedine formacije može biti indikator postojanja zone povećanog slojnog tlaka. S povećanim slojnim tlakom, poroznost je veća sto znači da se u sloju nalazi veća količina fluida. S povećanjem količine fluida smanjuje se toplinska vodljivost formacije te se tako može uočiti sloj s povećanim slojnim tlakom.

3.2.2.5. Razina isplake u bušotini

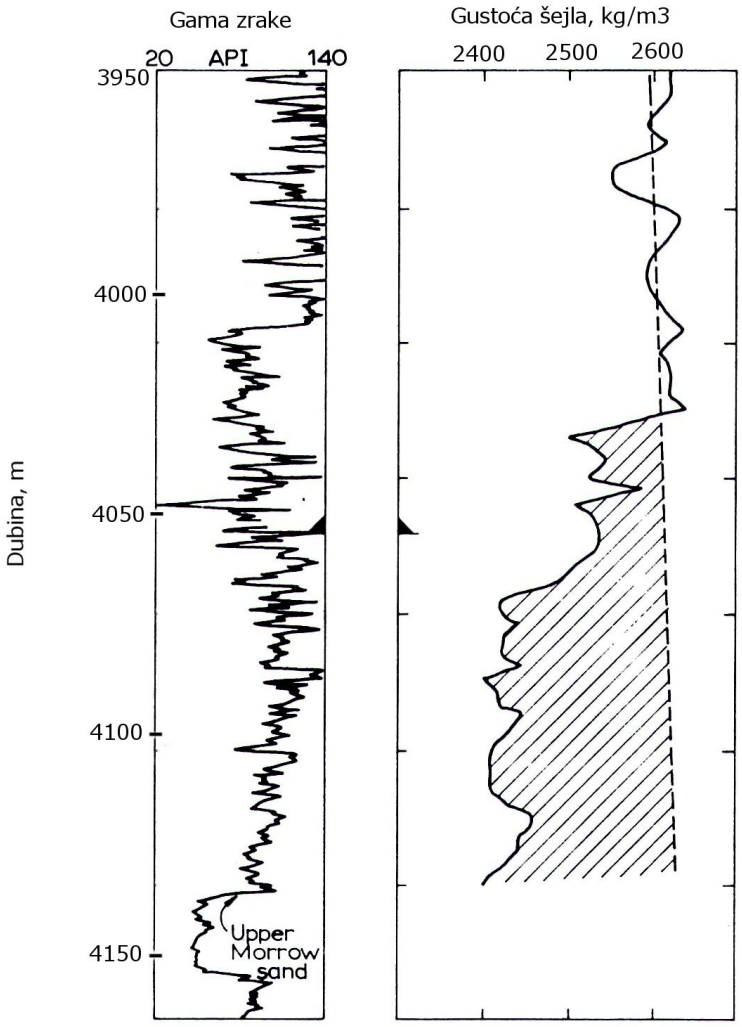
Svaka promjena ukupnog volumena isplake u sustavu može se kontrolirati pomoću indikatora razine isplake. Smanjenje volumena isplake u bušotini uzrokovano je gubitkom isplake u stijenu dok svako povećanje volumena isplake u bušotini može indicirati na pojavu zone povećanog slojnog tlaka. Također, prilikom izvlačenja alatki iz bušotine, odgovarajući volumen isplake treba biti utisnut u bušotinu kako bi nadomjestio volumen izvučenih alatki. Ukoliko se izvučeni bušaći niz ne bi nadoknadio istim volumenom isplake došlo bi do drastičnog pada razine isplake u bušotini. Takav scenarij bi rezultirao smanjenim hidrostatičkim stupcem isplake što bi predstavljalo opasnost od pojave dotoka slojnog fluida u bušotinu, a samim time i opasnost od gubitka kontrole nad bušotinom.

3.2.3. Krhotine stijena

Krhotine probušenih stijena zajedno s isplakom dolaze na površinu te na rezultate njihove analize treba pričekati za vrijeme potrebno da krhotina s dna bušotine dođe na površinu.

3.2.3.1. Gustoća šejla

Kao što je već navedeno ranije u tekstu, zone povećanog slojnog tlaka odlikuje mala gustoća. Dakle, svako uočavanje krhotina na vibracijskim sitima manje gustoće od očekivane za određenu dubinu i prognozni litološki profil može ukazivati na postojanje zone povećanog slojnog tlaka. Na slici 3-9 prikazan je dijagram promjene gustoće šejla u odnosu na dubinu bušotine u području Teksasa, S.A.D.



Slika 3-9. Promjena gustoće šejla s dubinom bušotine (Fertl, 1976)

3.2.3.2. Volumen, oblik i veličina krhotina

Prilikom analize nabušenih krhotina, osim njihove gustoće najviše pažnje posvećuje se njihovom volumenu, obliku i veličini. Povećanjem mehaničke brzine bušenja doći će i do povećanja broja i volumena krhotina na vibracijskom situ. Oblik i veličina krhotina će se promijeniti pa će krhotine nabušene iz zone povećanog slojnog tlaka biti velike i tanke. Krhotine nepropusne formacije iznad zone povećanog tlaka biti će uglatog oblika i oštre.

3.2.3.3. Faktor šejla

Zbog ograničenosti primjene difrakcije X – zraka na laboratorij, razvile su se jednostavnije metode za određivanje tipa i količine pojedinih mineralnih komponenti u pojedinoj stijeni. Jedna od takvih metoda je primjena metil blue testa (MTB). Pomoću nje, odmah po izlasku krhotina iz bušotine, moguće je odrediti sastav glinovite komponente kao i odnos između gline i pjesčenjaka u nabušenim krhotinama. Određivanje udjela glinovite komponente kao i omjera između udjela pješčenjaka i šejla ukazuje na litološku promjenu, odnosno često na prijelaz iz krovine u sloj koji potencijalno može biti s povećanim slojnim tlakom.

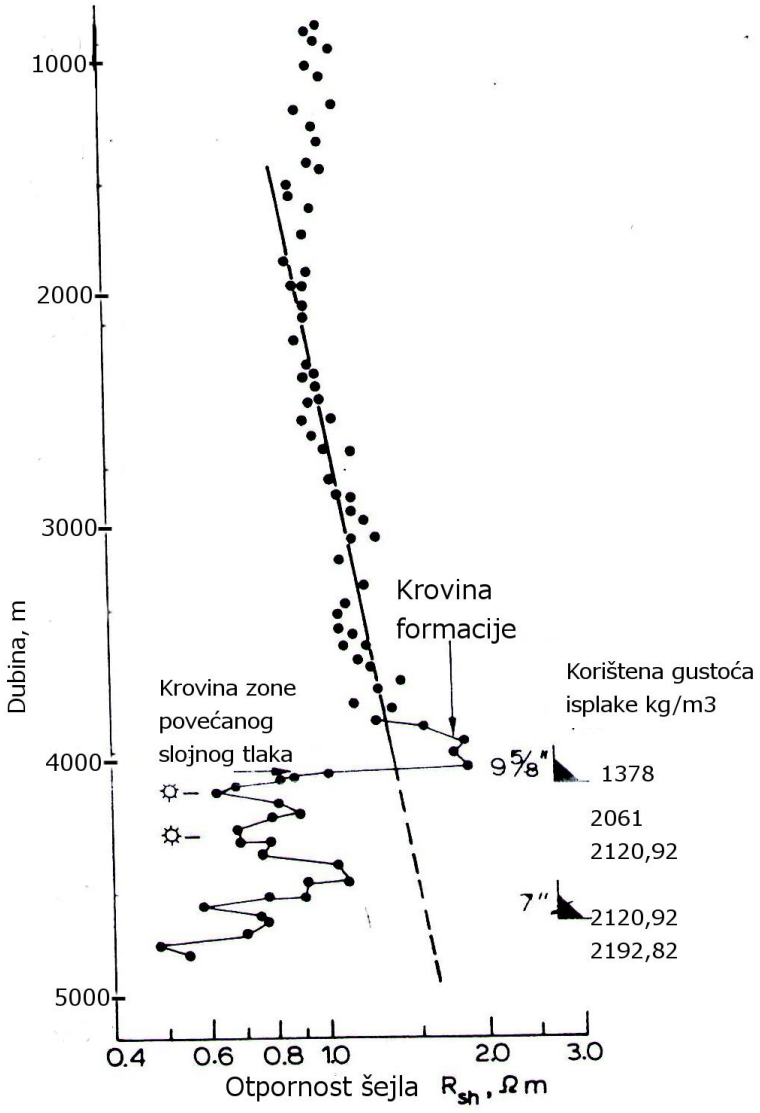
3.3. Bušotinska karotaža

Jedna od najboljih metoda za otkrivanje zona povećanog slojnog tlaka je bušotinska karotaža. Iako se može izvoditi tek nakon penetracije dlijeta u određeni sloj ona uvelike pomaže u daljnjem procesu izrade bušotine i prikupljanju geoloških podataka određenog polja. Zone povećanog slojnog tlaka mogu se otkriti primjenom električnih mjerenja, akustičnih mjerenja, mjerenja gustoće i mjerenja radioaktivnosti. Interpretacija navedenih metoda temelji se na uočavanju anomalija, odnosno na uspostavi konstantnog trenda kretanja vrijednosti krivulja s obzirom na dubinu i uočavanja svakog otklona krivulje od konstantnih vrijednosti.

3.3.1. Konvencionalna elektrokarotaža

Klasični elektrokarotažni uređaji sastoje se od četiri elektrode. Dvije elektrode su strujne, a ostale dvije su potencijalne elektrode. Metoda se temelji na stvaranju elektromagnetskog polja čiji će oblik ovisiti o relativnoj električnoj otpornosti stijena, tj. mjeri se potencijal na nekoj udaljenost od strujne elektrode. Dubina prodiranja struje ovisi o razmaku potencijalne i strujne elektrode. Najčešće se koristi sonda duljine oko 41 cm („mala normala“) koja služi za određivanje granica sloja. Ovakav način mjerenja nije moguć ukoliko se elektrode nalaze unutar fluida koji ne provode struju (poput uljne isplake).

Uslijed normalne kompakcije stijena s povećanjem dubine povećava se električna otpornost zbog smanjenja poroznosti stijena. Na slici 3-10 prikazana je otpornost šejlova s porastom dubine bušotine u Meksičkom zaljevu.

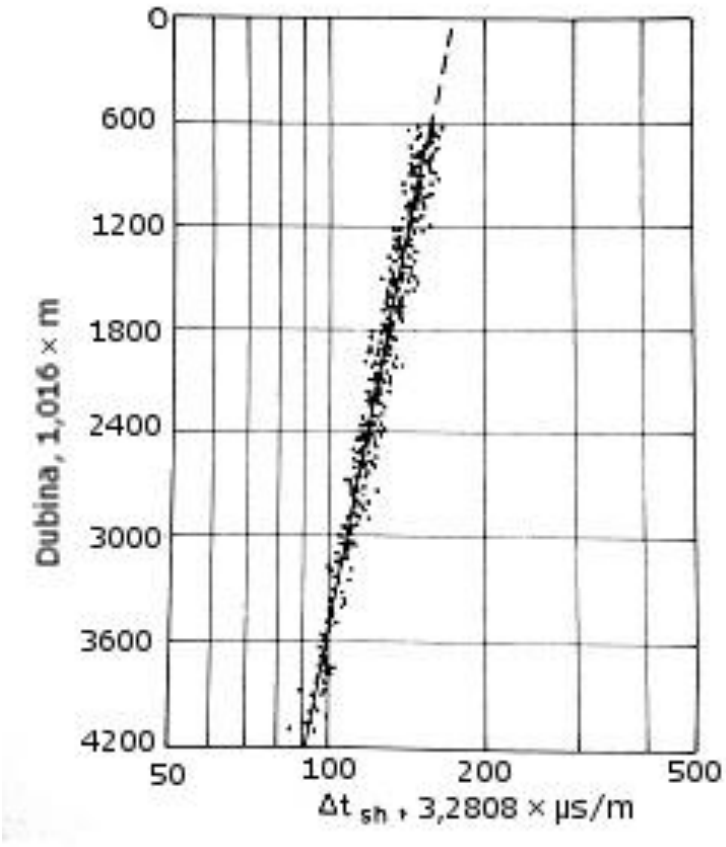


Slika 3-10. Električna otpornost stijena u odnosu na dubinu (Fertl, 1976)

Na slici 3-10 može se primijetiti linija konstantnih vrijednosti otpornosti stijena do dubine od približno 3700 m. U zoni povećanog slojnog tlaka uočava se otklon linije otpornosti u odnosu na uspostavljeni normalni trend kretanja. Zone povećanog slojnog tlaka imaju povećanu poroznost i sadrže više slojne vode (Hottmann i Johnson,1965; Ham, 1966). Zbog toga će linija otpornosti poprimiti vrijednosti manje od uobičajenih u zonama povećanog slojnog tlaka.

3.3.2. Akustična karotaža

Akustičnom karotažom mjeri se vrijeme potrebno za prolazak elastičnih valova kroz stijenu na nekoj određenoj udaljenosti. Dobiveni rezultati koriste se za procjenjivanje poroznosti stijene. Također, u cementiranim bušotinama akustičnom karotažom može se odrediti kvaliteta vezanja cementnog kamena, odnosno kvaliteta obavljene cementacije. Na slici 3-11 prikazana je linija normalne kompakcije stijena dobivene analizom podataka akustične karotaže. Recipročna vrijednost brzini kretanja elastičnih valova (*Δt;* intervalno vrijeme) nalazi se na apcisi dijagrama.



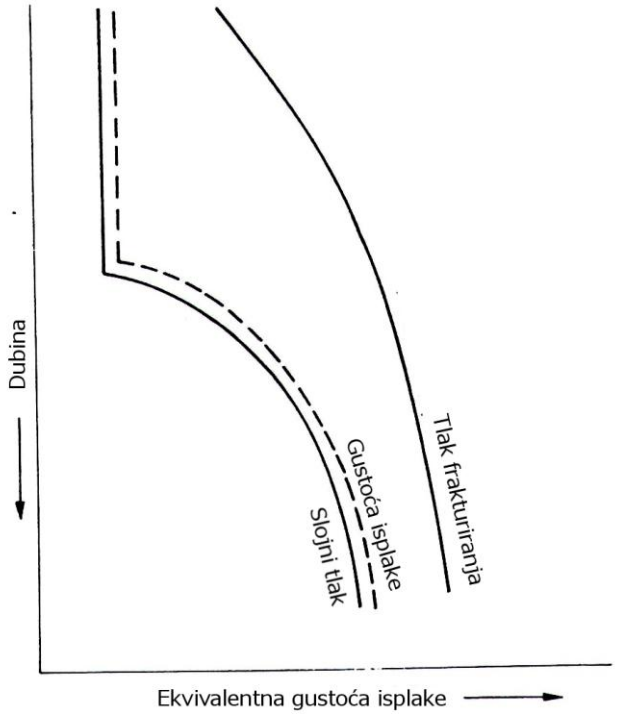
Slika 3-11. Vrijeme putovanja akustičnog vala u odnosu na dubinu (Hottman; Johnson, 1965)

Iznos *Δt* ovisi o litološkom sastavu stijena, stupnju komakcije stijena, poroznosti i sadržaju fluida u pornom prostoru razmatranih stijena. U geološkim formacijama s

normalnom promjenom tlaka mjerene vrijednosti akustične karotaže slijede liniju kompakcije kako je to prikazano na slici 3-11. Nailazak na zonu povećanog slojnog tlaka odrazit će se na povećanje vrijednosti Δt u odnosu na trend kretanja normalnih vrijednosti. To je posljedica izrazitog povećanja poroznosti u zonama povećanog slojnog tlaka.

4. PROJEKTIRANJE I IZRADA BUŠOTINA USLIJED POVEĆANOG SLOJNOG TLAKA

Cilj svakog projektiranja bušotine te planiranja operativnog provođenja bušenja na terenu je izrada tehnički i ekonomski optimalne bušotine, što podrazumijeva u što kraćem roku te uz što manje troškove izraditi bušotinu uz poštivanje svih ekoloških i sigurnosnih normi. Prije samog planiranja programa ugradnje kolone zaštitnih cijevi, cementacije, hidrauličkog frakuriranja, utiskivanja fluida, određivanja svojstva isplake potrebno je poznavati dva ključna parametra bez kojih je nemoguće postići optimalni odnos ekonomsko - tehničkih parametara. Dakle, poznavanje vrijednosti slojnog tlaka i tlaka frakturiranja u odnosu na vertikalnu dubinu bušotine od ključne je važnosti za uspješnu izvedbu svakog projekta izrade bušotina. Kao što je ranije navedeno, slojni tlak je tlak koji ostvaruju fluidi (slojna voda, nafta, plin) u pornom prostoru razmatrane geološke formacije. Tlak frakturiranja definiran je kao vrijednost tlaka potrebnog za početak loma (frakturiranja) određene stijene. Zahvaljujući geofizičkim mjerenjima i naknadno bušotinskoj karotaži moguće je odrediti vrijednost slojnog tlaka i tlaka frakturiranja određene stijene prije/tijekom bušenja što uvelike olakšava cijeli proces planiranja i izrade bušotina. Također, točno poznavanje slojnog tlaka i tlaka frakturiranja smanjuje mogućnost pojavljivanja problema tijekom bušenja kao što su diferencijalni prihvat bušaćih alatki, gubitak isplake, dotok slojnog fluida u bušotinu itd. Na slici 4-1 prikazan je izgled dijagrama tlaka frakturiranja, slojnog tlaka i ekvivalentne gustoće isplake u odnosu na vertikalnu dubinu bušotine.



Slika 4-1. Ilustrativni prikaz promjene odnosa slojnog tlaka, tlaka frakturiranja i gustoće isplake s povećanjem dubine bušotine (Fertl, 1976)

Iznos gustoće isplake, bez obzira radilo se o zoni normalnog ili povećanog slojnog tlaka, trebao bi u svakom trenutku bušenja biti veći od iznosa slojnog tlaka izraženog kao ekvivalent gustoće za 24 - 48 kg/m^3 (Fertl, 1976). Uz takav faktor sigurnosti pojavljivanje neželjenih problema poput diferencijalnog prihvata bušaćih alatki svest će se na minimum. Također, ostvarit će se uvjeti za normalan napredak bušenja uz optimalnu mehaničku brzinu bušenja te će se cijena isplake kretati u ekonomski prihvatljivim granicama.

4.1. Metode za predviđanje gradijenta tlaka frakturiranja

Pravilnom interpretacijom rezultata dobivenih geofizičkim i naknadno karotažnim mjerenjima može se odrediti trend promjene slojnog tlaka s dubinom bušotine. Za određivanje tlaka frakturiranja koriste se razne metode osmišljene od strane više autora. Među najpoznatijim metodama za određivanje gradijenta tlaka frakturiranja je metoda autora Hubberta i Willisa (1957.).

4.1.1. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Hubberta i Willisa

Hubbert i Willis su nakon teoretskih i eksperimentalnih pokusa hidrauličkog frakturiranja stijena došli do zaključka da najmanje naprezanje djeluje u horizontalnom smjeru na stijenu i njegova vrijednost iznosi između jedne trećine i jedne polovine tlaka koju ostvaruje težina pokrovnih stijena. Dakle, može se zaključiti da će iznos tlaka frakturiranja ovisiti o zbroju vrijednosti slojnog tlaka i minimalnog horizontalnog naprezanja. U jednadžbi 4.1 prikazana je ovisnost geostatičkog tlaka o slojnom tlaku i vertikalnom naprezanju stijene.

$$P_g = P_s + \sigma \tag{4-1}$$

gdje su: P_g – geostatički tlak (Pa)
P_s – slojni tlak (Pa)
σ – vertikalno naprezanje stijene (Pa)

Dok je tlak frakturiranja moguće dobiti iz sljedećeg izraza:

$$P_f = P_s + \sigma_H \tag{4-2}$$

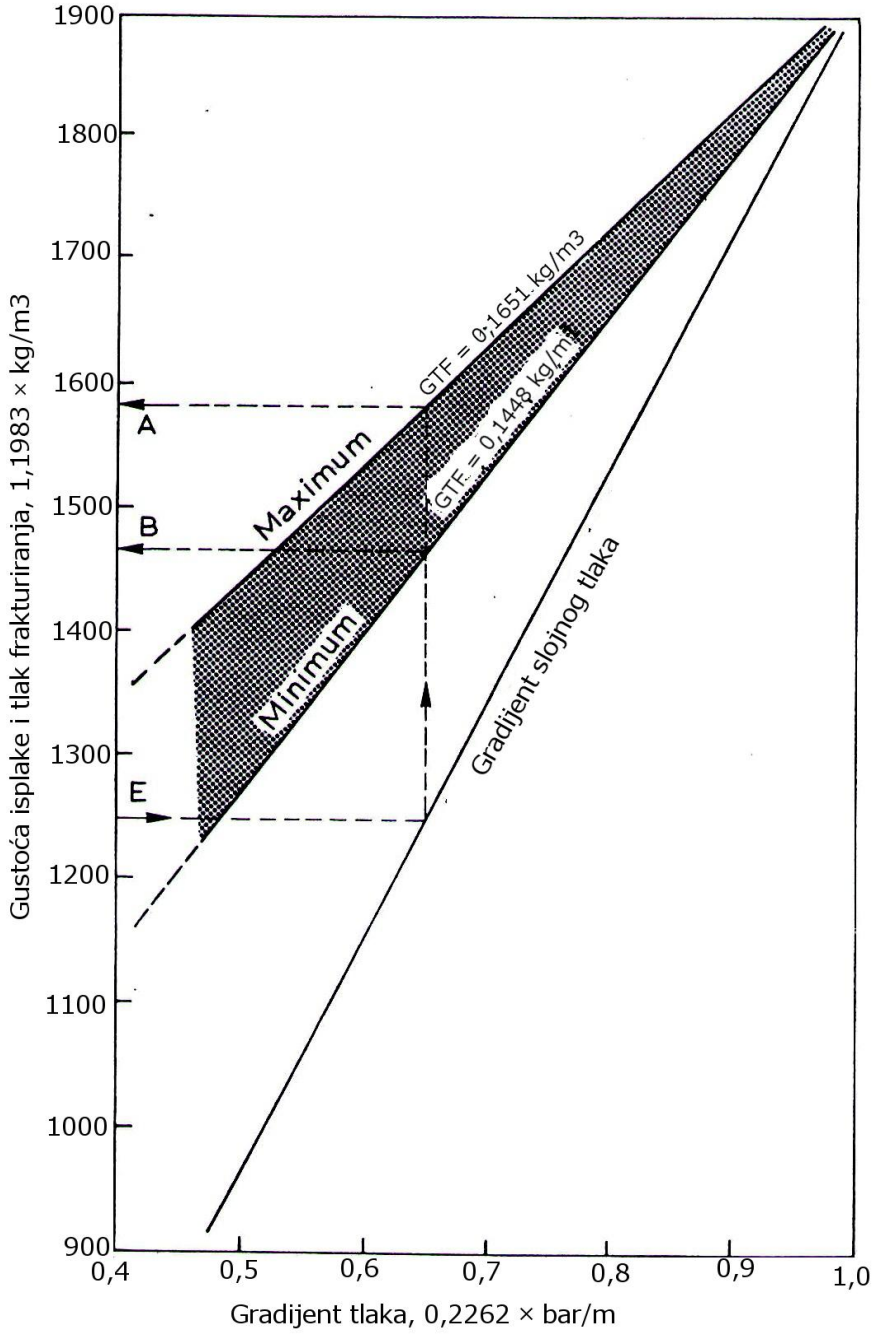
gdje su: P_f – tlak frakturiranja [Pa]
P_s – slojni tlak (Pa)
σ_H – horizontalno naprezanje stijene (Pa)

$$\sigma_H = (1/3 \text{ to } ½) \times \sigma = (1/3 \text{ to } ½) \times (P_g - P_s) \tag{4-3}$$

Substitucijom jednadžbi 4.2 i 4.3 te dijeljenjem novo dobivene jednadžbe s dubinom (D), gradijent tlaka frakturiranja se može izraziti kao 4.4:

$$P_f/D = P_s/D + (1/3 \text{ to } ½)(P_g - P_s)/D \tag{4-4}$$

Na slici 4-2 prikazani su minimalni i maksimalni gradijenti tlaka frakturiranja za bušotinu u Meksičkom zaljevu.



Slika 4-2. Promjena minimalnog i maksimalnog gradijenta tlaka frakturiranja s dubinom (Hubbert i Willis, 1957)

Koristeći se dijagramom prikazanim na slici 4-2 moguće je grafički odrediti tlak frakturiranja na sljedeći način:

(1) Odredi se potrebna gustoća isplake za kontrolu slojnog tlaka;
(2) Vrijednost isplake se unosi na ordinatu (E) i povlači se horizontalna linija do mjesta presjecišta s gradijentom slojnog tlaka;
(3) Na mjestu gdje horizontalna linija presijeca gradijent slojnog tlaka povlači se vertikalna linija do mjesta presjecišta minimalnog odnosno maksimalnog gradijenta tlaka frakturiranja;
(4) Na mjestu gdje vertikalna linija presijeca gradijente tlaka frakturiranja povlači se horizontalna linija do presjecišta s ordinatom i očitavaju se minimalna i maksimalna vrijednost tlaka frakturiranja (točke B i A) kao ekvivalent gustoće isplake.

S povećanjem dubine bušotine smanjuje se razlika između minimalnog i maksimalnog tlaka frakturiranja dok se gradijent slojnog tlaka povećava. Zbog toga treba biti oprezan prilikom spuštanja bušaćih alatki u bušotinu jer može doći do povećanja tlaka u kanalu bušotine i mogućeg loma stijene.

4.1.2. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Matthewsa i Kellya

Matthews i Kelly preoblikovali su jednadžbu Hubberta i Willisa tako što su u nju dodali varijablu koeficijenta naprezanja stijena K_i (4-5). K_i je definiran kao odnos između horizontalnog i vertikalnog naprezanja stijene.

$$P_f/D = P_s/D + K_i \times \sigma/D \qquad (4\text{-}5)$$

gdje je:

K_i – koeficijent naprezanja stijene za dubinu na kojoj bi vrijednost σ bila jednaka normalnom naprezanju (bezdimenzionalna)

Za određivanje tlaka frakturiranja ovom metodom potrebno je poznavati vrijednost lokalnog K_i i njegovu varijaciju s dubinom.

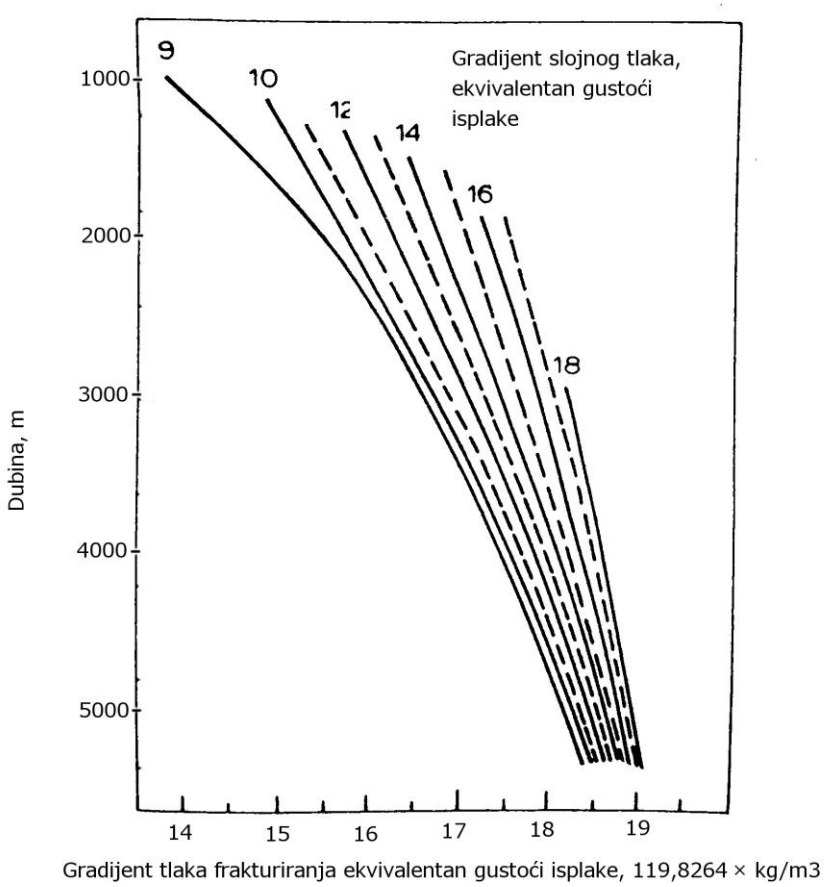
4.1.3. Određivanje gradijenta tlaka frakturiranja pomoću metode Eatona

Eatonova metoda za predviđanje iznosa tlaka frakturiranja stijena jedna je od najboljih i najtočnijih metoda koje se koriste danas. Metoda se temelji na uvođenju i proširenju jednadžbe Matthewsa i Kellya s Poissonovim koeficijentom (4-6).

$$P_{fg} = P_s/D + [v/(1- v)]\times\sigma/D \qquad (4\text{-}6)$$

gdje je: v – Poissonov koeficijent (bezdimenzionalan)

Na slici 4-3 prikazan je gradijent tlaka frakturiranja predviđen Eatonovom metodom u Meksičkom zaljevu.



Slika 4-3. Grafički prikaz procijenjenih krivulja tlaka frakturiranja i slojnog tlaka dobivenih pomoću Eatonove metode (Eaton,1970).

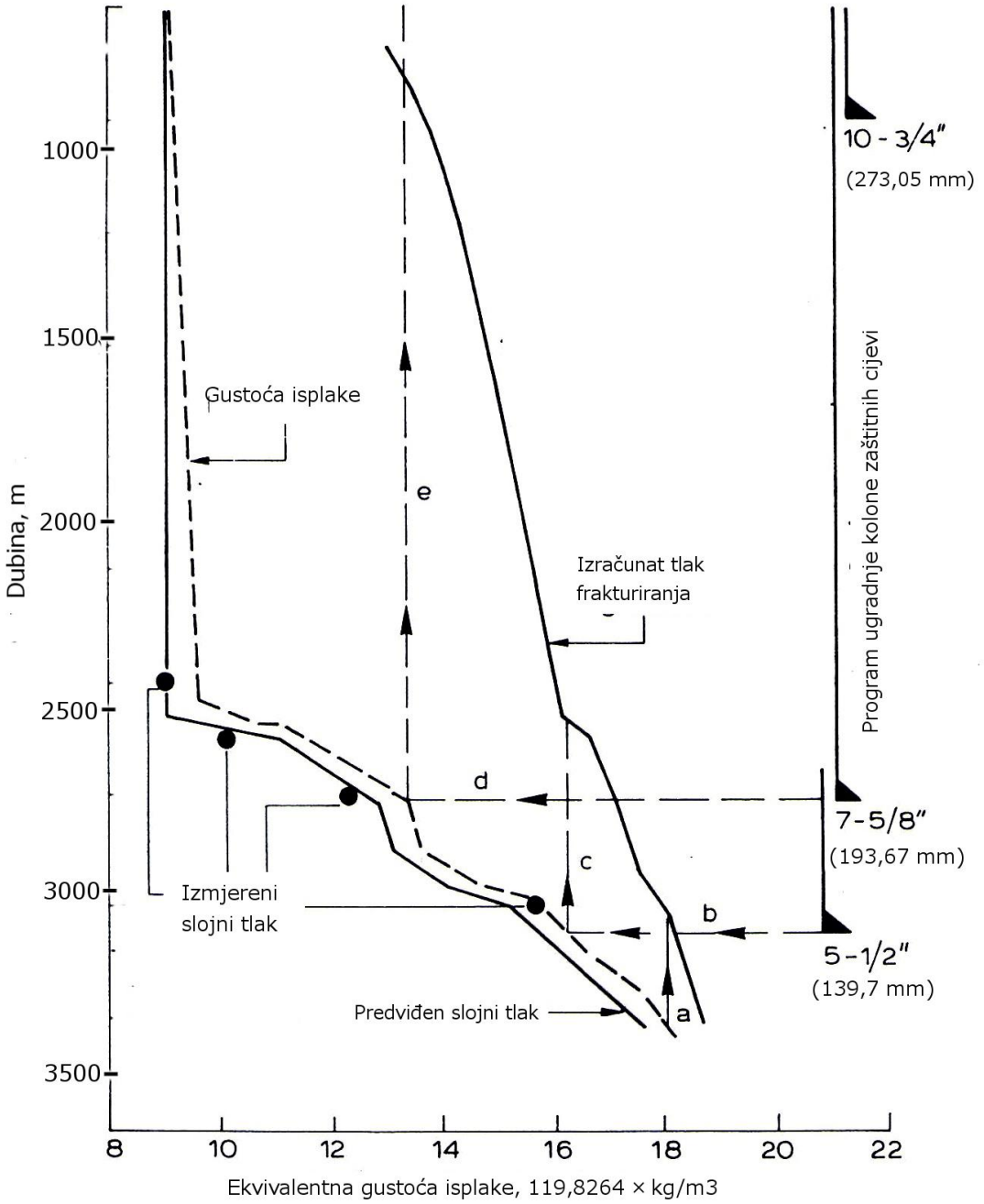
4.2. Ugradnja kolone zaštitnih cijevi u zonama povećanog slojnog tlaka

Projektiranje bušotine i izrada kvalitetnog programa ugradnje kolone zaštitnih cijevi temelji se na poznavanju više čimbenika. Uloga zaštitnih cijevi je da i u najnepovoljnijem okruženju izdrže opterećenja u svim uvjetima, kako tijekom bušenja, ispitivanja i opremanja bušotine, tako i tijekom cjelokupnog proizvodnog vijeka iz određenog ležišta. Također, zaštitne cijevi onemogućavaju hidrauličku komunikaciju između slojnih fluida i fluida koji se nalaze u bušotini što je vrlo važno prilikom izoliranja zona povećanog slojnog tlaka. Konvencionalni programi ugradnje kolone zaštitnih cijevi sastoje se od sljedećih tipova kolona zaštitnih cijevi: vodeće ili strukturalne kolone, usmjerivača ili površinske kolone, uvodne kolone, jedne ili više tehničkih kolona, proizvodne kolone i, ukoliko je potrebno lajnera. Treba napomenuti da se cijeli proces projektiranja bušotine odvija odozdo prema gore. Dakle, prvo se odabire odgovarajuća proizvodna kolona i sukladno tome se nastavlja odabir ostalih kolona zaštitnih cijevi sve do vrha bušotine.

Za izoliranje zona povećanog slojnog tlaka koriste se tehničke/proizvodne kolone. Dakle, tehničke/proizvodne kolone obično se ugrađuju u prijelazne zone ispod ili iznad stijena pod povećanima slojnim tlakom. Također, kako su za savladavanje velikih tlakova potrebne veće gustoće isplake, slabije naslage stijena treba zaštitit od gubljenja optoka i mogućeg loma stijene. Prilikom određivanja dubine ugradnje tehničke kolone treba voditi računa da se peta smjesti u nepropusne naslage. Sama dubina ugradnje također je određena gradijentom slojnog tlaka i gradijentom tlaka frakturiranja.

4.2.1. Primjer ugradnje kolone zaštitnih cijevi u bušotinu pod povećanim slojnim tlakom

Prilikom planiranja ugradnje kolone zaštitnih cijevi u bušotine s povećanim slojnim tlakom potrebno je poznavati gradijent slojnog tlaka i gradijent tlaka frakturiranja. Na slici 4-4 prikazan je program ugradnje kolone zaštitnih cijevi za odobalnu bušotinu lociranu u Louisiana-i, S.A.D.



Slika 4-4. Program ugradnje kolone zaštitnih cijevi (Eaton, 1970)

Na slici 4-4 vidljiv je proces određivanja dubine ugradnje kolone zaštitnih cijevi na temelju vrijednosti slojnog tlaka i tlaka frakturiranja uz korištenje sigurnosnog faktora. Bušenje je bilo započeto s dlijetom promjera 339,7 mm do dubine od 914,4 m. Nakon toga ugrađena je kolona zaštitnih cijevi 273,05 mm (10 ¾“). Bušenje je nastavljeno s dlijetom

promjera od 244,5 mm do dubine od 2758 m te je ugrađena kolona zaštitnih cijevi 193,67 mm (7 5/8“). Bušenje do dubine od 3352,8 m nastavljeno je dlijetom promjera 168,275 mm te je ugrađen lajner promjera 139,7 mm (5 ½“) do dubine 3078 m.

4.3. Cementiranje zona povećanog slojnog tlaka

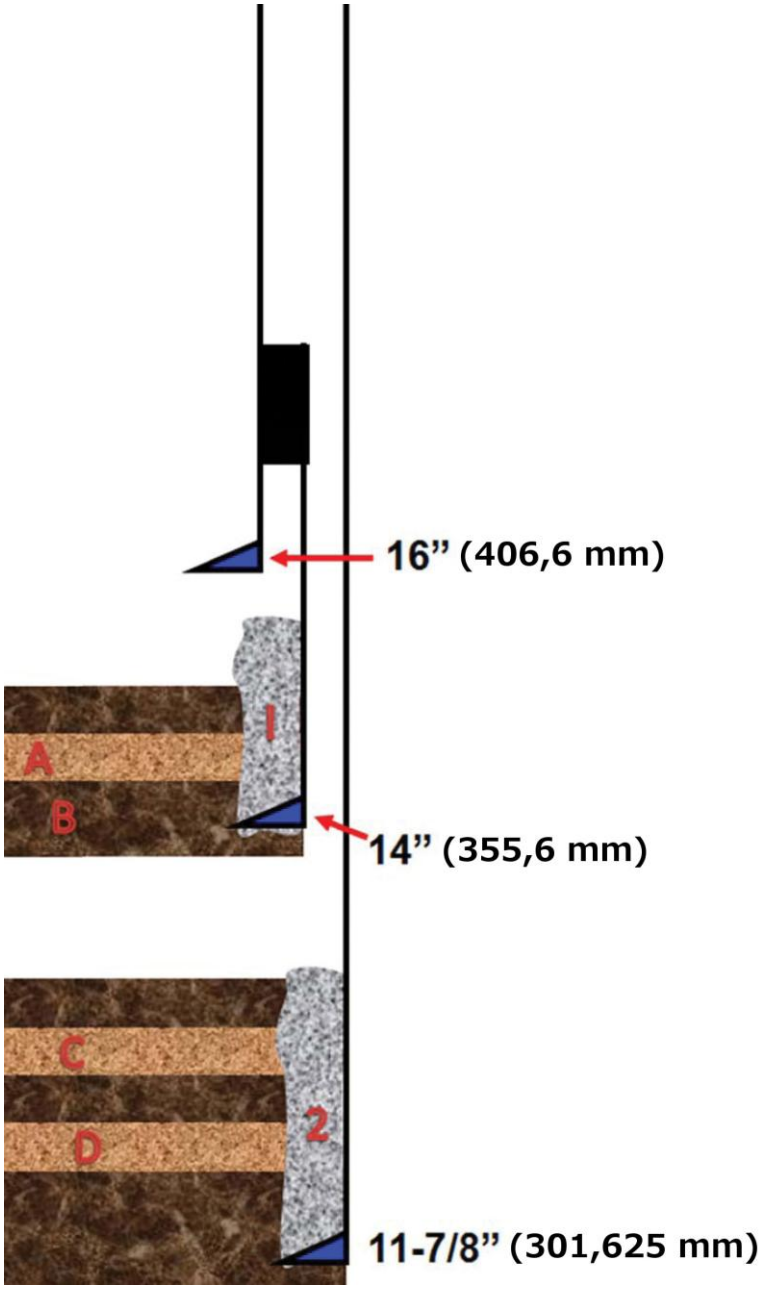
Nakon ugradnje odgovarajuće kolone zaštitnih cijevi potrebno je cementirati prstenasti prostor između kolone zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine. Svrha cementacije nije samo onemogućavanje komuniciranja slojnih fluida prstenastim prostorom iza zaštitnih cijevi nego i učvršćenje kolone zaštitnih cijevi, sprečavanje dotoka slojnih fluida u kanal bušotine ili gubljenje isplake u nabušene slojeve te sprečavanje korodirajućeg djelovanja slojnih fluida na ugrađene zaštitne cijevi. Niz zaštitnih cijevi može se cementirati po cijeloj svojoj duljini ili samo u jednom dijelu, ovisno o uvjetima u bušotini te o namjeni niza zaštitnih cijevi.

Prilikom samog planiranja programa cementacije potrebno je poznavati tip geološke formacije, svojstva i vrstu slojnog fluida koji se u njima nalazi, karakteristike ugrađenje kolone zaštitnih cijevi i gradijent tlaka frakturiranja. Također, potrebno je napraviti proračune turbulentnog protjecanja, optimalnog obujma razdjeljivača, te optimalnog broja centralizera i strugača za opremanje kolone zaštitnih cijevi.

Za cementiranje zona povećanog slojnog tlaka cementima se dodaju različiti aditivi koji poboljšavaju svojstva cementnog kamena ili cementne kaše tijekom cementacije. Aditivi mogu usporiti ili ubrzati vrijeme zgušćavanja cementne kaše, promijeniti njenu gustoću i način protjecanja, pomoći u kontroli filtracije i gubitku cirkulacije. Za najučinkovitije cementiranje zona povećanog tlaka potrebno je odrediti koliko će iznositi maksimalni tlak koji će se morati savladati prilikom cementiranja. Također, u obzir se mora uzeti i temperatura koja zajedno s tlakom čini najbitnije čimbenike prilikom cementiranja.

Najveći problemi kod cementacije zona povećanog slojnog tlaka javljaju se za vrijeme cementiranja lajnera, odnosno izgubljene kolone. Za rješavanje tog problema koriste se dvije metode, odnosno dva različita tipa cementacije. Prvi tip cementacije, odnosno jednostepena cementacija provodi se na način da se lajner cementira u jednoj kontinuiranoj operaciji protiskivanja cementne kaše od dna prema vrhu. Takav način

cementiranja omogućava operateru održavanje konstantnog tlaka na zonu povećanog slojnog tlaka. Drugi tip cementacije, odnosno dvostepena cementacija izvodi se cementiranjem dvije trećine lajnera konvencionalnom (jednostepenom) cementacijom. Nakon toga cement se pod tlakom protiskuje (*engl. squeeze job*) od vrha lajnera prema dnu. (Fertl, 1976). Na slici 4-5 prikazana je cementacija zona povećanog slojnog tlaka.



Slika 4-5. Ilustrativni prikaz cementacije zona povećanog slojnog tlaka (Shaughnessy, 2013)

Na slici 4-5 zone povećanog slojnog tlaka A, C i D cementirane su kako bi se spriječila njihova međusobna komunikacija i komunikacija s fluidima u bušotini. U konkretnom slučaju, cementni kamen u području 1 zajedno s lajnerom izolirao je sloj pješčenjaka A od slojeva pješčenjaka C i D koji se nalaze na većoj dubini. Cementni kamen u području 2 izolirao je slojeve pješčenjaka C i D i tako spriječio njihovu međusobnu komunikaciju.

4.4. Mogući problemi prilikom izrade bušotina u zonama povećanog slojnog tlaka

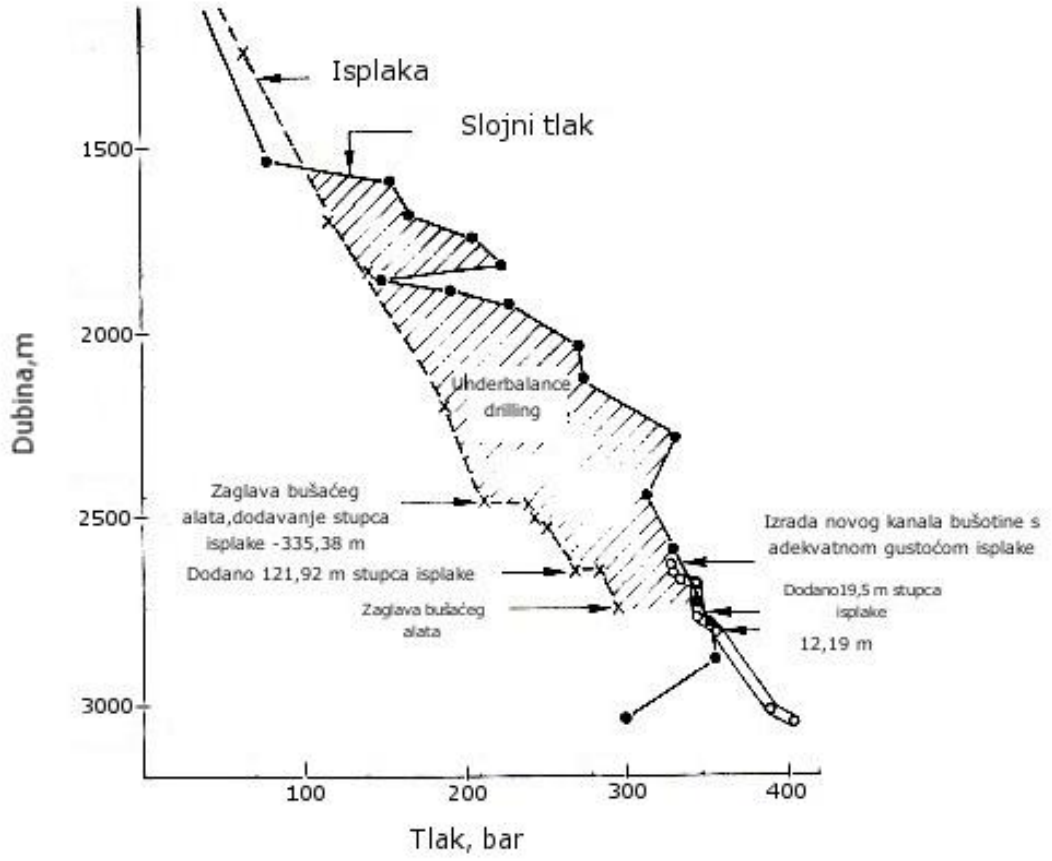
Kako je navedeno ranije u tekstu, cilj planiranja operacija kod izrade kanala bušotina je smanjiti ili u potpunosti izbjeći probleme koji se mogu pojaviti tijekom izrade bušotina. Poznavanje vrijednosti povećanog slojnog tlaka omogućiti će odabir isplake odgovarajućih svojstava. Da bi se povećani slojni tlak nadvladao potrebno je koristiti isplake povećane gustoće koje će djelovati kao protumjera povećanom tlaku. Iako isplake tako velike gustoće uspješno rješavaju pitanje povećanog slojnog tlaka one mogu biti i uzročnik dodatnih problema prilikom bušenja. Najčešći problemi s kojima se naftni inženjeri susreću prilikom izrade bušotina s izrazito velikim gustoćama isplake su zaglavljenje bušaćih alatki i gubitak cirkulacije.

4.4.1. Diferencijalni prihvat bušaćih alatki

Diferencijalni prihvat bušaćih alatki ovisi o vremenu u kojem su bušaće alatke bile u stanju mirovanja i u kontaktu s formacijom. Također, na pojavu diferencijalnog prihvata bušaćih alatki utječu i svojstva isplačnog obloga, propusnost i debljina formacije. Međutim, najvažniji uzroka diferencijalog prihvata bušaćih alatki je diferencijalni tlak između tlaka stupca isplake i slojnog tlaka na određenoj dubini.

Diferencijalni prihvat bušaćih alatki može se dogoditi tijekom bušenja određenog sloja uz upotrebu isplake gustoće manje od potrebne gustoće za uravnoteženje slojnog tlaka (*engl. underbalance drilling*) ili prilikom bušenja stijena uz upotrebu isplake čija je gustoća daleko veća od gustoće potrebne za savladavanje slojnog tlaka (*engl. overbalance drilling*). Također, diferencijalni prihvat bušaćih alatki može se dogoditi i tijekom

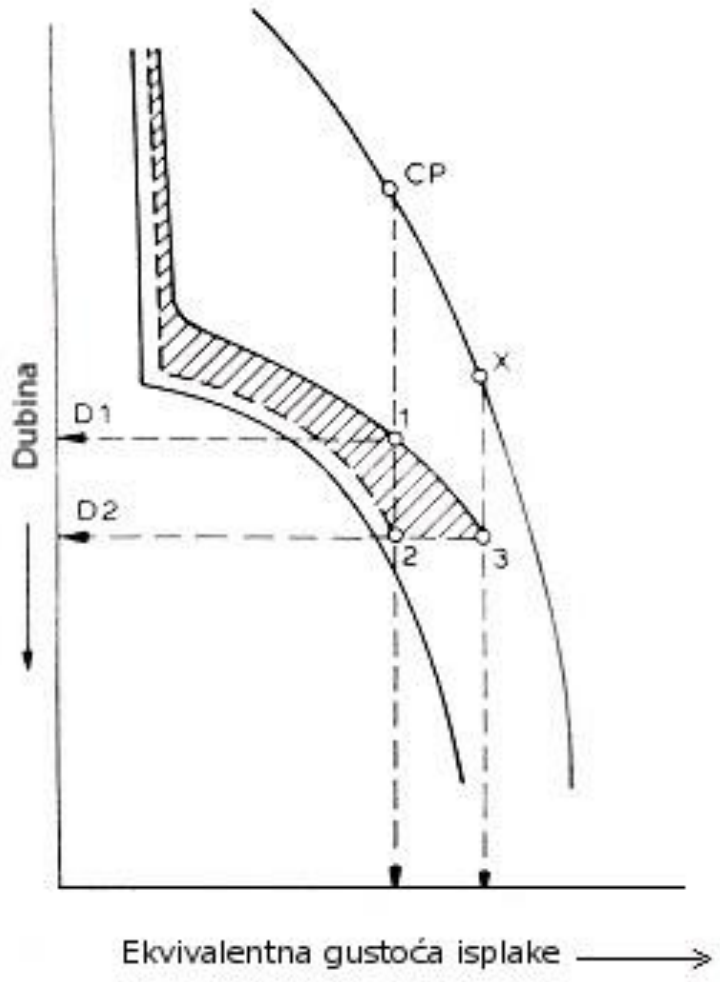
neželjenog dotoka slojnog fluida u bušotinu. Na slici 4-6 prikazan je primjer zaglave bušaćih alatki uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka na bušotini u Oklahomi, S.A.D.



Slika 4-6. Odnos između dubine, slojnog tlaka i gustoće isplake (Fertl, 1976)

4.4.2. Gubitak cirkulacije

Gubitak cirkulacije najčešće se događa tijekom izrade bušotine uz upotrebu isplake neodgovarajuće gustoće. Također, gubitak cirkulacije može biti uzrokovan bušenjem kroz vrlo propusne formacije malog slojnog tlaka te bušenjem kroz ispucale i kavernozne formacije. Kako bi se smanjila mogućnost gubitka cirkulacije potrebno je poznavati gradijent slojnog tlaka i gradijent tlaka frakturiranja. Poznavanjem ta dva faktora moguće je odrediti optimalnu gustoću isplake i smanjiti mogućnost pojave gubitka cirkulacije tijekom bušenja. Na slici 4-7 prikazana je promjena slojnog tlaka, tlaka frakturiranja i gustoće isplake s dubinom, s tim da su tlakovi izraženi također kao ekvivalent gustoće isplake.



Slika 4-7. Dijagram gubitka cirkulacije zbog neadekvante gustoće isplake (Fertl, 1976)

Na slici 4-7 iscrtkani dio predstavlja nepotrebno veliku razliku između potrebne gustoće isplake i korištene gustoće isplake. Zbog korištenja isplake tako velike gustoće bušenje se moralo zaustaviti na dubini D_1. Korištenjem isplake odgovarajuće gustoće bušenje bi se moglo nastaviti do dubine D_2 bez ugradnje kolone zaštitnih cijevi. Točka 3 označava mjesto na kojem bi potencijalno moglo doći do diferencijalnog prihvata bušaćih alatki i gubitka cirkulacije isplake ukoliko bi se nastavilo bušenje uz primjenu isplake nepotrebno velike gustoće.

Dakle, korištenjem isplake odgovarajuće gustoće povećava se dubina bušenja pojedine dionice kanala bušotine, kao i dubina ugradnje pojedine kolone zaštitnih cijevi, a samim time se smanjuje mogućnost od diferencijalnog prihvata bušaćih alatki i gubitka cirkulacije.

5. ZAKLJUČAK

Planiranje i izrada bušotina u područjima sa zonama povećanog slojnog tlaka zahtjeva pomnu obradu velike količine podataka dobivenih geofizičkim mjerenjima, zatim podataka dobivenih praćenjem različitih parametara tijekom bušenja te različitim karotažnim mjerenjima za vrijeme i neposredno nakon bušenja određene dionice. Određivanje i vrednovanje zona povećanog slojnog tlaka moguće je jedino uz kvalitetnu i preciznu interpretaciju dobivenih podataka. Poznavanje dubine pojave povećanog slojnog tlaka i njegove vrijednosti preduvjet je za pravilno planiranje ugradnje kolone zaštitnih cijevi i za primjenu odgovarajućeg programa zacjevljenja. Kako je svaka bušotina svojim geološkim profilom posebna, tako je i plan njene izrade specifičan. Danas, glavni cilj prilikom izrade svake bušotine je ostvariti maksimalnu kontrolu tlakova koji se pojavljuju tijekom bušenja kroz različite stijene uz što manje troškove. Kako ekonomski faktor ima veliku važnost prilikom odabira tehničkih parametara bušotine potrebna je velika stručnost i znanje naftnih inženjera da bi se odabrale optimalne bušaće alatke, kolone zaštitnih cijevi, optimalni programi zacijevljenja i parametri isplake bez da se dovede u pitanje kontrola nad bušotinom. Dakle, izazov se pronalazi u odabiru ekonomski prihvatljivih, a opet tehnički zadovoljavajućih karakteristika opreme za izradu bušotine, kao i optimiranje samog procesa bušenja i prilagođavanje projekta izrade kanala bušotine s obzirom na pojavu zona povećanog slojnog tlaka.

6. LITERATURA

1. BIGELOW, E.L.,1994. Studies in abnormal pressures. Chapter 1: Global occurrences of abnormal pressures. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

2. BOLT, D.B., 1972. How to detect overpressure in drilling worldwide. World Oil, 174(6): str. 107 – 111.

3. DICKINSON, G., 1953. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 37: 410-432.

4. DONALDSON E.C., CHILINGAR, G.V., ROBERSTON JR. J.O., SEREBRYAKOV V., 2002. Origin and prediction of abnormal formation pressures. Chapter 1: Introduction to abnormally pressured formations. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

5. EATON, B.A., 1970. How to drill offshore with maximum control. World Oil, 171(5): str. 73 – 77.

6. FERTL, W.H., 1976. Abnormal formation pressures. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

7. FERTL, W.H., Timko, D.J., 1972. How downhole temperatures, pressures affect drilling, 1. Origin of abnormal formation pressures. World Oil, 174(7): str. 67 – 71, Lipanj.

8. HAM, H.H., 1966. A method of estimating formation pressures from Gulf Coast well logs. Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc., 16: str. 185 – 197.

9. HARKINS, K.L., BAUGHER, J.W., 1969. Geological significance of abnormal formation pressures. J. Pet. Technol., 21: 961-966.

10. HERRING, E.A., 1973. North Sea abnormal pressures determined from logs. Pet. Eng., 45: str. 72 – 84, Studeni.

11. HOTTMAN, C.E., JOHNSON, R.K., 1965. Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. J. Pet. Technol. 17: str. 717 – 723.

12. HUBBERT, M.K., WILLIS, D.G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing. Trans. AIME, 210: str. 153 – 168.

13. JORDEN, J.R., SHIRLEY, O.J., 1966. Application of drilling preformance data to overpressure detection. J. Pet. Technol., 18: str. 1387 – 1394.

14. LOUDEN, L.R., MATTHEWS, W.R., MCCLENDON, R.T., REHM, W.A., AUD, B.W., 1971. Ultra-deep drilling guided by seismic data, 1.World Oil, 172: str. 67 – 72, Svibanj; Part 2, 172: str. 97 – 105, Lipanj.

15. MATTHEWS, W.R., 1969. Drilling variables show transition zone. Oil Gas J., 67(44): str. 69 – 76.

16. PENNEBAKER, E.S., 1968a. Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressures. World Oil, 166: str. 73 – 78, Lipanj.

17. PERIĆ, M., 2007. Englesko – hrvatski enciklopedijski riječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.

18. REYNOLDS, E.B., 1973. The application of seismic techniques to drilling techniques. SPE 4643, 48th AIME Fall Meet., Las Vegas, Nevada., Listopad.

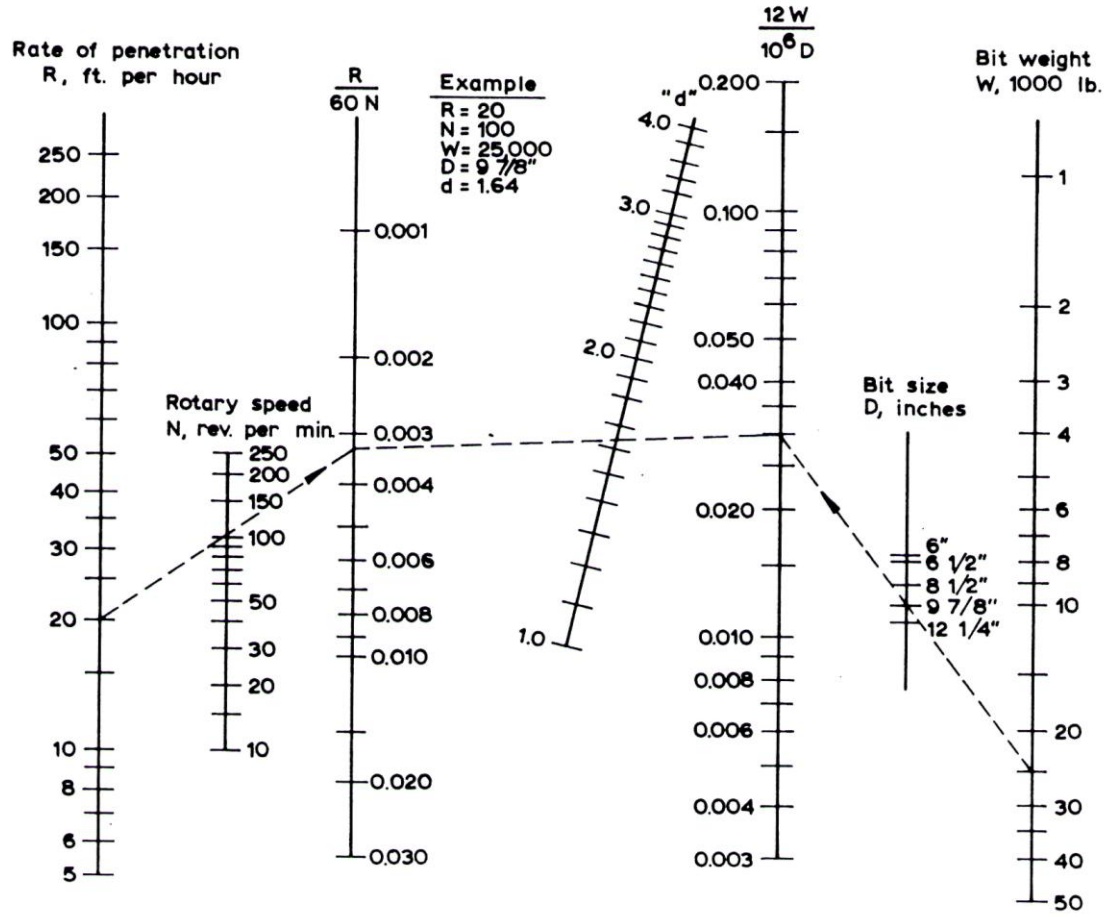
19. SHAUGHNESSY, J. 2013. Improving well control calls for continuous evaluation of barriers.

    URL: http://www.drillingcontractor.org/improving-well-control-calls-for-continuous-evaluation-of-barriers-21463 (14.6.2015.).

20. WOEBER, A.F., PENHOLLOW, J.O., 1973. The accuracy of depth predictions from velocity profiles on the Texas Gulf Coast. *SEG Paper, 43rd Annu. Int. SEG Meet.*, Mexico City.

21. ZOELLER, W.A., 1970. The drilling porosity log. *SPE 3066, 45th AIME Fall Meet.*, Houston, Texas, Listopad.

Prilozi:



d = (3.1)

Prilog 3.1. Nomogram za određivanje d – eksponenta (Jorden i Shirley, 1966)

IZJAVA

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

_____

Luka Bajan