Projektiranje putanje horizontalne bušotine

Mijatović, Irena

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:527279

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







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

PROJEKTIRANJE PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE

Diplomski rad

Irena Mijatović
N197

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

PROJEKTIRANJE PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE

IRENA MIJATOVIĆ

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

Sažetak

Iako se bušotine s obzirom na putanju mogu podijeliti u 3 skupine: vertikalne, koso usmjerene i horizontalne bušotine, većina današnjih bušotina, osobito na moru, ima složenu konstrukciju koja se sastoji od nekoliko vertikalnih, zakrivljenih, koso usmjerenih i horizontalnih dionica kanala bušotine. Danas se u svijetu sve više koriste horizontalne bušotine, a temeljna svrha izrade horizontalnih bušotina, tj. bušotina kojima dio kanala zauzima horizontalan položaj u prostoru, jest povećanje kontaktne površine kanala bušotine s ležištima nafte, plina ili geotermalne vode te na taj način povećanje proizvodnosti tih bušotina. U radu su prikazani osnovni konstrukcijski elementi horizontalnih bušotina, projektiranje i proračun putanje horizontalne bušotine te je dan i primjer jedne horizontalne bušotine.

Ključne riječi: projektiranje, putanja, horizontalna bušotina

Diplomski rad sadrži: 69 stranica, 29 slika, 7 tablica, 4 priloga i 19 referenci.

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. Vladislav Brkić, docent RGNF-a.

Datum obrane: 19. siječnja 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's thesis

HORIZONTAL WELL TRAJECTORY DESIGN

IRENA MIJATOVIĆ

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

Summary

Although wells can be divided into 3 groups: vertical, directional and horizontal wells, most of today's wells, especially at sea, have a complex construction consisting of several vertical, directional and horizontal well sections. Nowadays, horizontal wells are increasingly used, and the main purpose of drilling horizontal wells i.e. wells whose production comes from the horizontal section, is to enhance the wellbore contact with the reservoir containing oil and/or gas, thus increasing the production of these wells. The thesis presents basic horizontal wells structural elements, the design and calculation of the horizontal well trajectory and provides an example of a horizontal well.

Key words: well planning, trajectory, horizontal well

Master's Thesis contains: 69 pages, 29 figures, 7 tables, 4 appendixes and 18 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD.

Reviewers: 1. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD
2. Full Professor Zdenko Krištafor, PhD
3. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD.

Date of defence: January 19th, 2018
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... **I**
POPIS TABLICA ..... **III**
POPIS PRILOGA ..... **IV**
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA ..... **V**
POPIS KORIŠTENIH KRATICA ..... **VII**
1. UVOD **1**
2. HORIZONTALNA BUŠOTINA **2**
2.1. Podjela horizontalne bušotine 6
3. PUTANJA (TRAJEKTORIJA) HORIZONTALNE BUŠOTINE **11**
4. PROJEKTIRANJE BUŠOTINE **13**
4.1. Geoupravljanje 22
5. PRORAČUN PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE **24**
5.1. Pojednostavljene jednadžbe za planiranje putanje horizontalne bušotine 24
5.2. Zakrivljena sekcija 29
5.3. Položaj dna bušotine i smjer u odnosu na ušće 36
5.4. Vertikalni profil putanje kanala bušotine 38
5.5. Intenzitet povećanja kuta otklona i/ili azimuta kanala bušotine 38
6. PRIMJER PROJEKTIRANJA PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE **40**
6.1. Program bušenja 49
6.1.1. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ ") 49
6.1.2. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ ") 50
6.1.3. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ ") 50
6.1.4. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,1524 m (6 ") 51
6.2. Izrađena bušotina 51
7. ZAKLJUČAK **57**
8. LITERATURA **58**

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz različitih tipova usmjerenih bušotina 2

Slika 2-2. Podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja 8

Slika 2-3. Odnos stvarne uspravne dubine kanala bušotine i horizontalnog dosega za različite bušotine 9

Slika 2-4. Lokacija projekta Sakhalin-1 10

Slika 3-1. Putanja horizontalne bušotine 11

Slika 3-2. Horizontalna bušotina sa složenom putanjom 12

Slika 4-1. Prikaz planirane i stvarne trajektorije horizontalne bušotine 15

Slika 4-2. Položaj horizontalne bušotine u frakturiranom ležištu 16

Slika 4-3. Usporedba pogreški nastalih kad je stvarno povećanje kuta otklona ± 10% od planiranog povećanja kuta otklona 17

Slika 4-4. Izrade zakrivljene dionice kanala bušotine 19

Slika 4-5. Izrada zakrivljenih dionica povećanjem i smanjenjem intenziteta kuta otklona 21

Slika 4-6. Neki od razloga za geoupravljanje 23

Slika 5-1. Tipična putanja horizontalne bušotine 25

Slika 5-2. Putanja bušotine velikog dosega ili usmjerene bušotine koja sadrži dvije dionice povećanja kuta otklona 28

Slika 5-3. Metoda tangente 30

Slika 5-4. Metoda uravnotežene tangente 31

Slika 5-5. Metoda srednjeg kuta 31

Slika 5-6. Metoda polumjera zakrivljenja 32

Slika 5-7. Metoda minimalne zakrivljenosti 33

Slika 5-8. Grafički prikazu razlike između najmanje udaljenosti posljednje točke mjerenja i vertikalne projekcije ušća te vertikalnog presjeka 37

Slika 6-1. Lokacija planirane bušotine (3) i dvije susjedne bušotine (1 i 2) 40

Slika 6-2. Karta tektonskih odnosa na području izrade planirane horizontalne bušotine ... 41

Slika 6-3. Geološka struktura u kojoj je planirana izrada nove horizontalne bušotine..... 42

Slika 6-4. Putanja planirane horizontalne bušotine i putanja već postojeće usmjerene susjedne bušotine 42

Slika 6-5. Horizontalna projekcija planirane bušotine 46

Slika 6-6. Vertikalni profil kanala planirane bušotine 47

Slika 6-7. Horizontalna projekcija planirane i izrađene bušotine 54

Slika 6-8. Vertikalni profil kanala planirane i izrađene bušotine..... 55

Slika 6-9. Prikaz planiranog i stvarnog vremena potrebnog za izradu nove horizontalne bušotine..... 56

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Primjeri primjene horizontalnih bušotina 3

Tablica 5-1. Jednadžbe kod metoda za proračun zakrivljenih dionica 34

Tablica 6-1. Projektirane točke kroz koje bi trebao proći kanal bušotine 44

Tablica 6-2. Sažetak planirane putanje bušotine 45

Tablica 6-3. Konstrukcija planirane horizontalne bušotine 48

Tablica 6-4. Popis dubinske opreme za mjerenje tijekom izrade pojedinih dionica kanala bušotine i interval mjerenja 48

Tablica 6-5. Pretpostavljene i stvarne krovine formacije kroz koje se bušilo 52

POPIS PRILOGA

Prilog 1: Projekt horizontalne bušotine 60

Prilog 2: Podaci koji su dobiveni mjerenjem u kanalu bušotine tijekom bušenja i podaci o položaju kanala bušotine dobiveni metodom minimalne zakrivljenosti 61

Prilog 3a: Prognozni geološki profil, osnovni podaci o bušotini i putanji kanala bušotine te osnovni podaci o programu bušenja projektirane horizontalne bušotine 68

Prilog 3b: Prognozni geološki profil, osnovni podaci o bušotini i putanji kanala bušotine te osnovni podaci o programu bušenja izrađene horizontalne bušotine 69

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A_1 – azimut kanala bušotine u gornjoj točki mjerenja, º

A_2 – azimut kanala bušotine u donjoj točki mjerenja, º

A_{CD} – azimut razlike između položaja ušća i dna bušotine, º

A_{VS} – azimut vertikalnog presjeka, º

DLS – intenzitet povećanja kuta otklona na određenoj duljini kanala bušotine, º/30 m

HD_2 – horizontalni pomak prve zakrivljene dionice kanala bušotine s povećanjem kuta otklona, m

HD_3 – horizontalni pomak tangencijalne dionice kanala bušotine, m

HD_4 – horizontalni pomak do točke ulaska u ležište, m

HD_5 – horizontalni pomak do točke ulaska u ležište horizontalne bušotine koja sadrži dvije sekcije povećanja kuta otklona, m

I_1 – kut otklona kanala bušotine u gornjoj točki mjerenja, º

I_2 – kut otklona kanala bušotine u donjoj točki mjerenja, º

L_{CD} – najmanja udaljenost između projekcije ušća u horizontalnoj ravnini položenoj kroz dno bušotine i samog dna bušotine u trenutku bušenja, m

L_{VS} – vertikalni presjek, m

r - polumjer zakrivljenja kanala bušotine, m

r_1 – polumjer zakrivljenja prve zakrivljene dionice kanala bušotine, m

r_2 – polumjer zakrivljenja druge zakrivljene dionice kanala bušotine, m

RF – faktor omjera

q – intenzitet povećanja kuta otklona, º/30 m

TVD_1 - stvarna uspravna dubina točke skretanja kanala bušotine, m

TVD_2 – stvarna uspravna dubina prve zakrivljene dionice kanala bušotine, m

TVD_3 – stvarna uspravna dubina tangencijalne dionice kanala bušotine, m

TVD_4 – stvarna uspravna dubina ležišta, m

TVD_5 – stvarna uspravna dubina do točke ulaska u ležište horizontalne bušotine koja sadrži dvije dionice povećanja kuta otklona, m

θ – kut otklona kanala bušotine, °

ΔHD – horizontalni pomak (doseg) kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, m

$\Delta Istok$ – položaj koordinata kanala bušotine u odnosu na sjever između dviju točaka mjerenja, m

ΔMD – duljina kanala bušotine po kojoj se vrši mjerenje kuta otklona i azimuta, m

ΔMD^* – duljina kanala bušotine po kojoj se želi iskazati promjena kuta otklona, m

ΔTVD – stvarna vertikalna dubina kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, m

$\Delta Sjever$ – položaj koordinata kanala bušotine u odnosu na sjever između dviju točaka mjerenja, m

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BHA (engl. *Bottom Hole Assembly*) – dubinski bušaći sklop

CD (engl. *Closure Distance*) – najmanja udaljenost između dna bušotine (zadnje točke mjerenja) i projekcije ušća bušotine u horizontalnu ravninu položenu kroz zadnju točku mjerenja

DLS (engl. *Dogleg severity*) – intenzitet povećanja kuta otklona na određenoj duljini kanala bušotine, °/30 m

EOB (engl. *End Of Build*) – točka u kojoj je postignut željeni kuta otklona kanala bušotine

EOC (engl. *End Of Curve*) – točka u kojoj je postignut željeni kuta otklona

EOR (engl. *Enhanced Oil Recovery*) – povećanje iscrpka naftnih ležišta

ERD (engl. *Extended Reach Well*) – bušotine iznimno velikog dosega

GOR (engl. *Gas-Oil Ratio – GOR*) – plinski faktor

HD (engl. *Horizontal Displacement*) – horizontalni doseg kanala bušotine

KOP (engl. *Kick Off Point*) – točka skretanja kanala bušotine

LWD (engl. *Logging While Drilling*) – sklop za karotažna mjerenja tijekom bušenja

MD (engl. *Measured Depth*) – mjerena duljina kanala bušotine

MWD (engl. *Measurment While Drilling*) – uređaj za kontinuirano mjerenje bušaćih parametara za vrijeme bušenja

PDC (engl. *Polycrystalline Diamond Compact bits*) – polikristalinska dlijeta

PHPA (engl. *Partially Hydrolyzed Polyacrylamide*) – djelomično hidrolizirani poliakrilamid

ROP (engl. *Rate of Penetration*) – brzina bušenja

RSS (engl. *Rotary Steerable System*) – rotirajući upravljivi bušaći sklopovi

TVD (engl. *True Vertical Depth*) – stvarna uspravna dubina kanala bušotine

TVDSS (engl. *True Vertical Depth SubSea*) – stvarna uspravna dubina kanala bušotine umanjena za nadmorsku visinu podišta tornja

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje dlijeta

1. UVOD

Bušotina je rudarski objekt koji predstavlja otvor okruglog presjeka izrađen u litosferi koji se izgrađuje nekom od mehaničkih metoda, najčešće rotacijskim bušenjem. Cilj izrade bušotine je pridobivanje fluida iz podzemlja i istraživanje i otkrivanje ležišta fluida ili rudnih ležišta. S obzirom na putanju, bušotine se mogu podijeliti u 3 skupine:

1. vertikalne,
2. koso usmjerene i
3. horizontalne bušotine.

Međutim, većina današnjih bušotina, osobito na moru, ima složenu konstrukciju koja se sastoji od nekoliko vertikalnih, zakrivljenih, koso usmjerenih i horizontalnih dionica kanala bušotine.

Postoje dva tipa bušotina koje imaju horizontalne dionice kanala (Joshi, 1991):

1. bočne (lateralne) bušotine te
2. horizontalne bušotine.

Bočne (lateralne) bušotine su bušotine izrađene iz postojećih kanala vertikalnih ili koso usmjerenih bušotina, a duljina horizontalnog dijela kanala iznosi između 30 i 200 m. Za razliku od spomenutih bočnih bušotina, horizontalne bušotine se projektiraju od površine i kao takve se izrađuju.

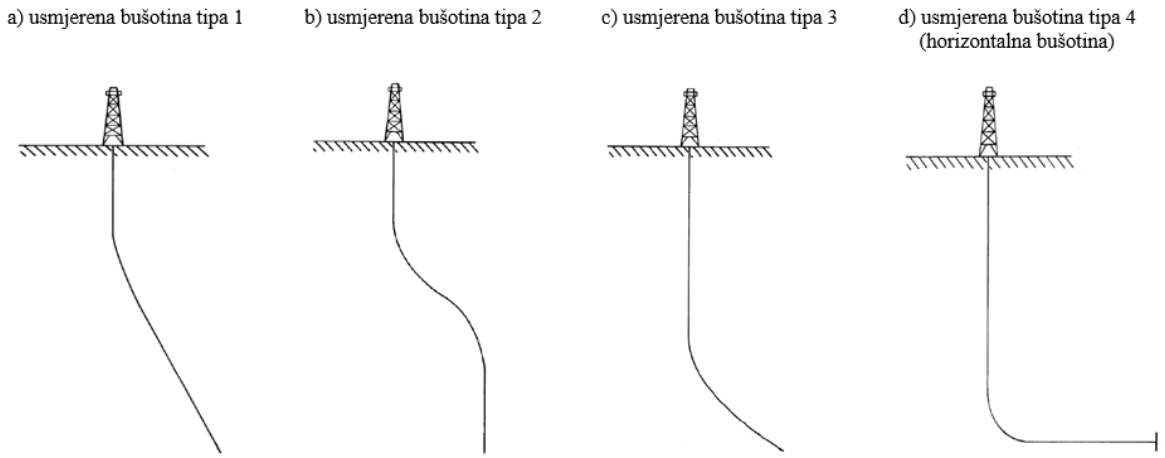
Prilikom definiranja horizontalne bušotine mogu se izdvojiti dvije definicije. Prema prvoj definiciji, horizontalna bušotina je svaka bušotina koja ima kut otklona kanala veći od 86º, a samo dijelovi kanala bušotine čiji je kut otklona veći od 86º predstavljaju horizontalnu dionicu kanala bušotine. Prema drugoj definiciji, bilo koji dio kanala bušotine nakon što bušotina dosegne kut otklona od 80º smatra kao dio horizontalne bušotine, čak i kad se kut otklona u nastavku bušenja smanji ispod 80º (Carden i Grace, 2007).

Glavni ciljevi uspješnog bušenja su izgradnja tehnički sigurnih i ekonomski isplativih bušotina, a taj uspjeh ovisi o tome je li postignut cilj. Uspješna operacija bušenja ovisi o dobrom projektu i planiranju radova. Planiranje putanje bušotine uključuje nekoliko aspekata (geološke, geomehaničke i dr.) koji u konačnici trebaju rezultirati optimalnom putanjom kanala bušotine. Za projektiranje putanje se koriste različiti matematički modeli kako bi se precizno izračunala buduća putanja bušotine.

2. HORIZONTALNA BUŠOTINA

Usmjerene bušotine se najčešće mogu svrstati u jednu od četiri skupine kao što je prikazano na slici 2-1 (Carden i Grace, 2007):

1. usmjerena bušotina tipa 1,
2. usmjerena bušotina tipa 2 (takozvana usmjerena bušotina "S" oblika),
3. usmjerena bušotina tipa 3 i
4. usmjerena bušotina tipa 4 (klasična horizontalna bušotina).



Slika 2-1. Prikaz različitih tipova usmjerenih bušotina (Carden i Grace, 2007)

Temeljna svrha izrade horizontalnih bušotina, tj. bušotina kojima dio kanala zauzima horizontalan položaj u prostoru, jest povećanje kontaktne površine kanala bušotine s ležištima nafte, plina ili geotermalne vode te na taj način povećanje proizvodnosti tih bušotina. Osim eksploatacijskih bušotina s horizontalnim dionicama, horizontalne kanale mogu imati i utisne bušotine, čime se postiže veća kontaktna površina kanala bušotine i ležišnih stijena te samim tim djelotvornost utiskivanja fluida (injektivnost), što u konačnici značajno povećava iscrpak naftnih ležišta (engl. *Enhanced Oil Recovery – EOR*) (Steiner i Boškov Steiner, 1994).

Vertikalni kanal bušotine je onaj koji presijeca horizontalne naslage pod kutom od 90˚, a horizontalni je onaj koji ide usporedno s horizontalnim naslagama (Steiner i Boškov Steiner, 1994).

Horizontalno bušenje je širu primjenu našlo pri razradi brojnih bušotina u ležištima čija bi razrada vertikalnim bušotinama bila neekonomična. Stoga se horizontalne bušotine najčešće koriste kod razrade sljedećih ležišta (Bizjak, 2004):

1. ležišta s vertikalnom pukotinskom propusnošću;
2. ležišta u kojima postoje zone zaostalih ugljikovodika;
3. ležišta male propusnosti;
4. ležišta zasićena teško pokretljivim ugljikovodicima;
5. ležišta malih debljina i
6. ležišta s vodonapornim režimom gdje tijekom eksploatacije postoji opasnost od konusiranja podinske slojne vode.

U tablici 2-1 prikazani su različiti primjeri primjene horizontalnih bušotina. Navedeni su podaci o ležištu, debljini proizvodne zone, poroznosti (šupljikavosti) i horizontalnoj propusnosti.

Tablica 2-1. Primjeri primjene horizontalnih bušotina (Joshi, 2007)

Tip ležišta	Naziv ležišta	Debljina proizvodne zone (m)	Šupljikavost (%)	Horizontalna propusnost (m^2)
Ležište male debljine	Bakken Shale, ND, SAD	3,05 – 9,14	1,5 – 12,9	$< 9{,}86 \times 10^{-16}$
Prirodno frakturirano ležište	Austin Chalk, Texas, SAD	7,62 – 21,34	3 – 12	$< 9{,}86 \times 10^{-16}$
	Bakken Shale, ND, SAD	3,05 – 9,14	1,5 – 12,9	$< 9{,}86 \times 10^{-16}$
	Mancos Shale, NM	18,29 (maksimalna)	2	$< 9{,}86 \times 10^{-17}$
	Niobrara, Wyoming, SAD		< 10	$< 9{,}86 \times 10^{-17}$
Ležište s mogućnošću formiranja plinskih i vodenih konusa	Prudhoe Bay, Alaska, SAD (pješčenjak)	30,48 – 60,96	22	$1{,}97 \times 10^{-13}$
	Elk Hills, Kalifornija (pješčenjak)	457,2 (početno) 83,82 (trenutno)	23	$7{,}89 \times 10^{-15}$ – $7{,}89 \times 10^{-14}$
	Bima Field, Indonezija (vapnenac)	6,1 – 30,48	31 – 36	$9{,}86 \times 10^{-14}$ – $9{,}86 \times 10^{-13}$
	Gunung Kembang, Indonezija (vapnenac)	10,67	24	$2{,}27 \times 10^{-13}$
	Rospo Mare Fields, Italija (vapnenac)	39,62	1,80	$1{,}97 \times 10^{-15}$ – $1{,}48 \times 10^{-12}$

	Helder Field, Sjeverno more (pješčenjak)	24,38 – 39,62		$9,87 \times 10^{-13}$ – $5,92 \times 10^{-12}$
	Empire Abo Unit, NM, SAD (Reef)	27,43	8,60	$2,47 \times 10^{-14}$
	Troll Field, Sjeverno more (pješčenjak)	22,86	30	$5,92 \times 10^{-12}$ – $9,87 \times 10^{-12}$
	S. Pepper Field, Australija (pješčenjak)	7,62 – 22,86	20	$9,87 \times 10^{-13}$
	Loma de la Lata, Argentina (pješčenjak)	35,05	14	$9,86 \times 10^{-16}$
	Chihuido de la Sierra Negra, Argentina (pješčenjak)	22,86	19 – 21	$8,48 \times 10^{-14}$ – $1,66 \times 10^{-13}$
	Nimr Area, S. Oman (pješčenjak)	83,82		
	Safah Field, Oman (pješčenjak)		19 – 23	$4,93 \times 10^{-15}$
	Saih Ruwi Field, Oman (pješčenjak)	24,99	21 – 27	$9,86 \times 10^{-16}$ – $1,18 \times 10^{-14}$
	Hayat & Salam Fields, Egipat (pješčenjak)	9,14 – 24,38	14 – 20	$9,87 \times 10^{-13}$ – $2,96 \times 10^{-12}$
Ležište s teško pokretljivim ugljikovodicima	Countless Upper Manville “RR”, Kanada		18 – 24	$2,47 \times 10^{-13}$ – $5,13 \times 10^{-12}$
	Cactus Lake North McLaren, Kanada	12,19	30 – 33	$4,94 \times 10^{-12}$
	Winter Field, Kanada	30,48	30	$5,92 \times 10^{-12}$
	Edam West, Sparky Sandstone, Kanada	19,81	34	$9,87 \times 10^{-13}$ – $9,87 \times 10^{-12}$
	Midway Sunset Field, SAD, Kalifornija	121,92	28	$9,87 \times 10^{-13}$ – $5,92 \times 10^{-12}$
	Lake Maracaibo, Venecuela	6,1	17	$4,34 \times 10^{-13}$
	Jobo Field, Venecuela	30,48	27	$1,68 \times 10^{-12}$
	Cerro Negro Sector, Orinoco Belt, Venecuela		34	$1,18 \times 10^{-11}$
Ležišta plina	Devonian (L. Huron Shale), SAD	4,57 – 15,24	2	$1,28 \times 10^{-16}$ – $4,24 \times 10^{-16}$
	Big Sandy Field Devonian (L. Huron Shale), SAD	76,2	2	$4,44 \times 10^{-17}$
	Gulf Coast, SAD (pješčenjak)	12,19	33	$5,92 \times 10^{-12}$

	Zuidwal Field, Nizozemska	42,67 – 60,96	10 – 15	$9{,}86 \times 10^{-16}$ – $9{,}86 \times 10^{-15}$
Zavodnjavanje ležišta	Weyburn Field, Kanada	6,096	3 – 26	$9{,}86 \times 10^{-18}$ – $4{,}93 \times 10^{-13}$
	Yowlumne Field, California Waterflood (pješčenjak)	0 – 121,92 (prosječno) 16,76 – 22,86 (net)	15 - 20	
	Texaco New Hope Shallow Unit, Franklin Co. TX Horizontal Injector Waterflood Project	5,49	12	$1{,}97 \times 10^{-15}$
EOR	Rainbow Keg River G Pool, Kanada, mješivost	10,69 – 12,19	10	$5{,}57 \times 10^{-13}$
	Pembu Nisku Field, Kanada, mješivost	39,62 – 100,58	10 - 30	$1{,}48 \times 10^{-12}$ – $9{,}87 \times 10^{-12}$
	Chateaurenard Field, Francuska polimeri	0 – 7,01	30	$7{,}89 \times 10^{-13}$ – $2{,}96 \times 10^{-12}$ $1{,}58 \times 10^{-12}$ (prosječno)
	Cold Lake, Kanada,termička	10,67 – 12,19	10	$5{,}57 \times 10^{-13}$
	Talnglflags North Field, Kanada, termička	27,43	33	$3{,}95 \times 10^{-12}$

Iz tablice 2-1 je vidljivo da horizontalne bušotine imaju široku primjenu u ležištima male debljine, prirodno frakturiranim ležištima, ležištima gdje može doći do formiranja plinskog ili vodenog konusa, ležištima s teškim ugljikovodicima te u plinskim ležištima. Također su navedeni i primjeri kombinacije primjene horizontalnih bušotina za zavodnjavanje odnosno podržavanje ležišnog tlaka, metoda istiskivanjem CO_2 i termičkog dobivanja nafte te povećanje iscrpka naftnih ležišta *EOR* (engl. *Enhanced Oil Recovery – EOR*).

Horizontalne bušotine su bušene i u ležištima male debljine, približno 3 m. U nekim ležištima u kojima se metan dobiva iz ugljena horizontalne bušotine su bušene u ležištu debljine manje i od 1,5 m. Iz toga je moguće zaključiti da su horizontalne bušotine isplative čak i u ležištima izrazito male debljine. Međutim, ako se horizontalne bušotine buše kako bi se pridobila nafta i smanjilo neželjeno pridobivanje vode i/ili plina (odnosno konusiranje vode i plina), kao što je vidljivo i iz tablice 2-1, minimalna debljina ležišta u tom slučaju je

od 4,5 do 6 m. Za smanjenje konusiranja neophodno je imati određeno odstupanje (okomitu udaljenost) između kontakta nafta – voda ili plin – nafta i kanala bušotina kako bi se spriječio brzi ulazak vode ili plina u horizontalni dio kanala bušotine, odnosno uspješna primjena horizontalne bušotine u ovom slučaju zahtjeva debljinu ležišta najmanje od 4,5 do 6 m kako bi se time osiguralo minimalno 3 m udaljenosti između horizontalnog kanala bušotine i kontakta nafta – voda ili plin – nafta. Slično je i kod horizontalnih bušotina iz kojih se pridobiva plin, a u kojima je potrebno minimalizirati konusiranje vode. I u ovom slučaju potrebno je osigurati od 3 do 4,5 m udaljenost između horizontalne bušotine i kontakta plin – voda. Međutim, kao što je i ranije rečeno, ukoliko se buši horizontalna bušotina u ležištu gdje ne postoji opasnost od konusiranja vode, onda je moguće izraditi horizontalnu bušotini u ležištu debljine 1,5 do 3 m.

Ovakva široka primjena horizontalnih bušotina u odnosu na vertikalne bušotine posljedica je njenih prednosti poput (PetroWiki, 2017):

1. smanjeno konusiranje vode i plina;
2. povećano davanje bušotine zbog veće kontaktne površine bušotine s ležištem;
3. manje smanjenje tlaka oko kanala bušotine;
4. manja brzina protjecanja ležišnog fluida oko kanala bušotine;
5. općenito smanjenje pridobivanja pijeska i
6. učinkovitije iskorištavanje ležišta koje vodi do povećanja pridobivih rezervi ugljikovodika.

2.1. Podjela horizontalne bušotine

Horizontalne bušotine se s obzirom na polumjer zakrivljenja zakrivljene dionice kanala bušotine mogu podijeliti u 4 skupine (Steiner i Boškov Steiner, 1994):

1. horizontalne bušotine s izuzetno malim polumjerom zakrivljenja;
2. horizontalne bušotine s malim polumjerom zakrivljenja;
3. horizontalne bušotine sa srednjim polumjerom zakrivljenja;
4. horizontalne bušotine s velikim polumjerom zakrivljenja.

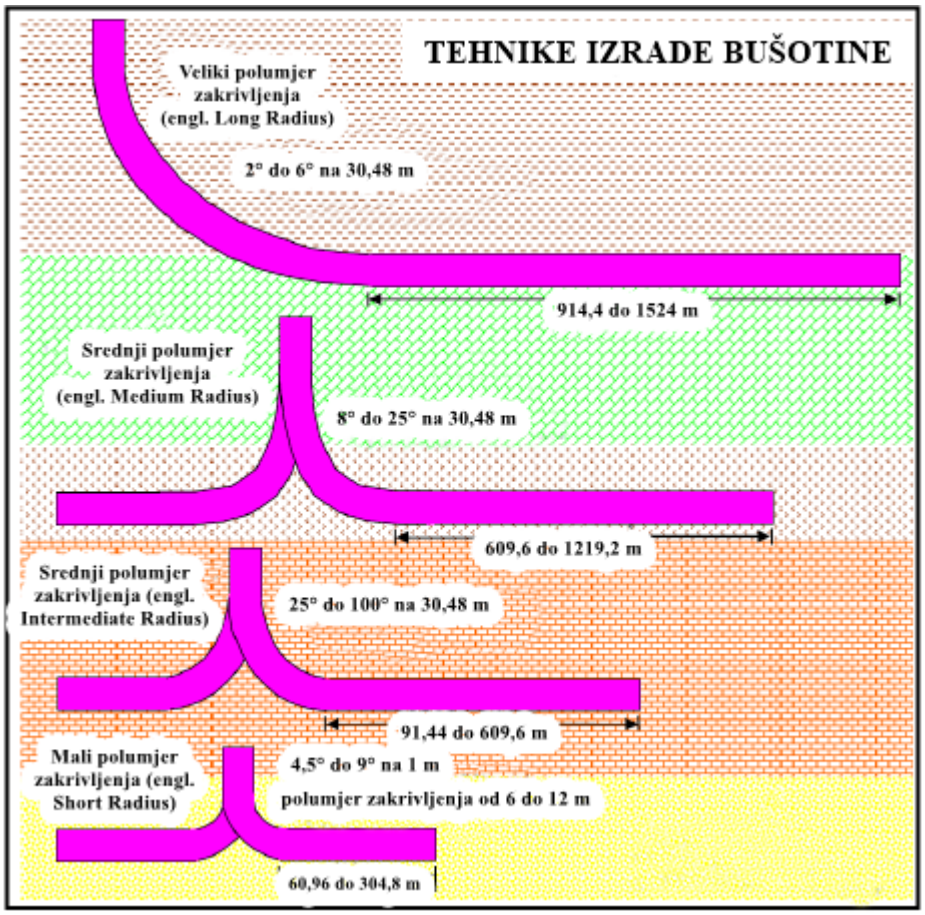
Horizontalne bušotine s izuzetno malim polumjerom zakrivljenja su bušotine kod kojih se kut otklona povećava intenzitetom od 45º do 90º na 0,3048 m (1 ft) duljine kanala bušotine. Povećanje kuta otklona se izvodi iz već postojeće vertikalne ili koso usmjerene bušotine. Polumjeri zakrivljenja iznose 0,3 do 0,6 m, dok horizontalna dionica kanala bušotine može biti duljine od 30 do 60 m (Carden i Grace, 2007). Za bušenje horizontalne sekcije kod ovog tipa bušotine koristi se posebne alatke i tehnike (Gaurina – Međimurec, 2015). S obzirom na specifičnost tehnologije za izradu ovakvih bušotina te tipu ležišta gdje se može primijeniti, ovaj tip horizontalne bušotine dosta se rijetko primjenjuje u praksi.

Horizontalne bušotine s malim polumjerom zakrivljenja imaju povećanje kuta otklona od 4,5º do 9º na 1 m (3 ft) duljine kanala bušotine. Polumjeri zakrivljenja ovih horizontalnih bušotina su od 6,096 do 12,192 m (Carden i Grace, 2007).

Horizontalne bušotine sa srednjim polumjerom zakrivljenja mogu se podijeliti na 2 skupine (engl. *intermediate radius i medium radius*). Bušotine iz prve skupine izrađuju se s povećanjem kuta otklona od 8 do 25º na 30,48 m (100 ft) i s polumjerom zakrivljenosti od 18,288 do 68,58 m dok bušotine iz druge skupine imaju povećanje kuta otklona od 25º do 100º na 30,48 m i polumjer zakrivljenosti od 68,58 do 213,36 m (Carden i Grace, 2007). Za bušenje horizontalne sekcije kod ovog tipa bušotine koristi se klasični upravljivi motor (Gaurina – Međimurec, 2015).

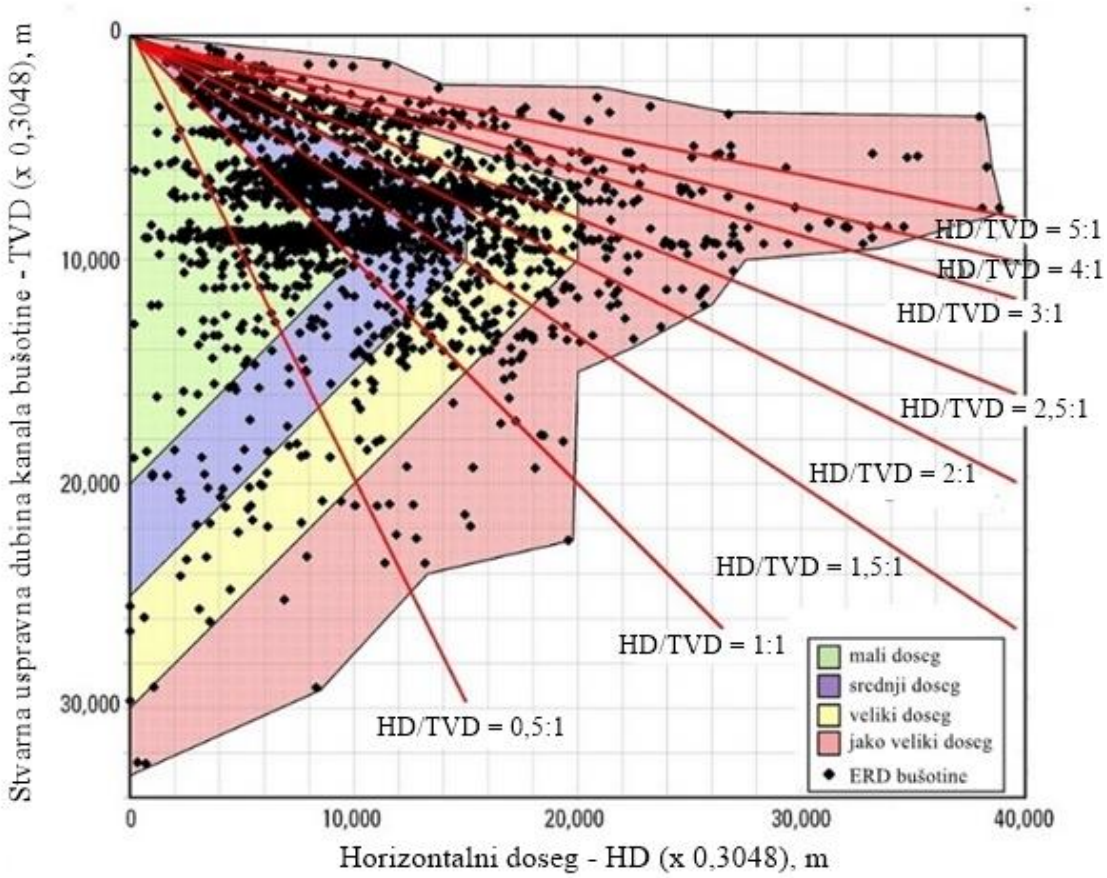
Horizontalne bušotine s velikim polumjerom zakrivljenja imaju promjenu kuta otklona od 2º do 6º na 30,48 m (100 ft) dok su polumjeri zakrivljenja u rasponu od 300 do 1000 m (Carden i Grace, 2007). Za bušenje horizontalne sekcije kod ovog tipa bušotine koristi se rotirajući upravljivi bušaći sklopovi (engl. *Rotary Steerable System - RSS*) (Gaurina – Međimurec, 2015).

Na slici 2-2 prikazana je podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja.



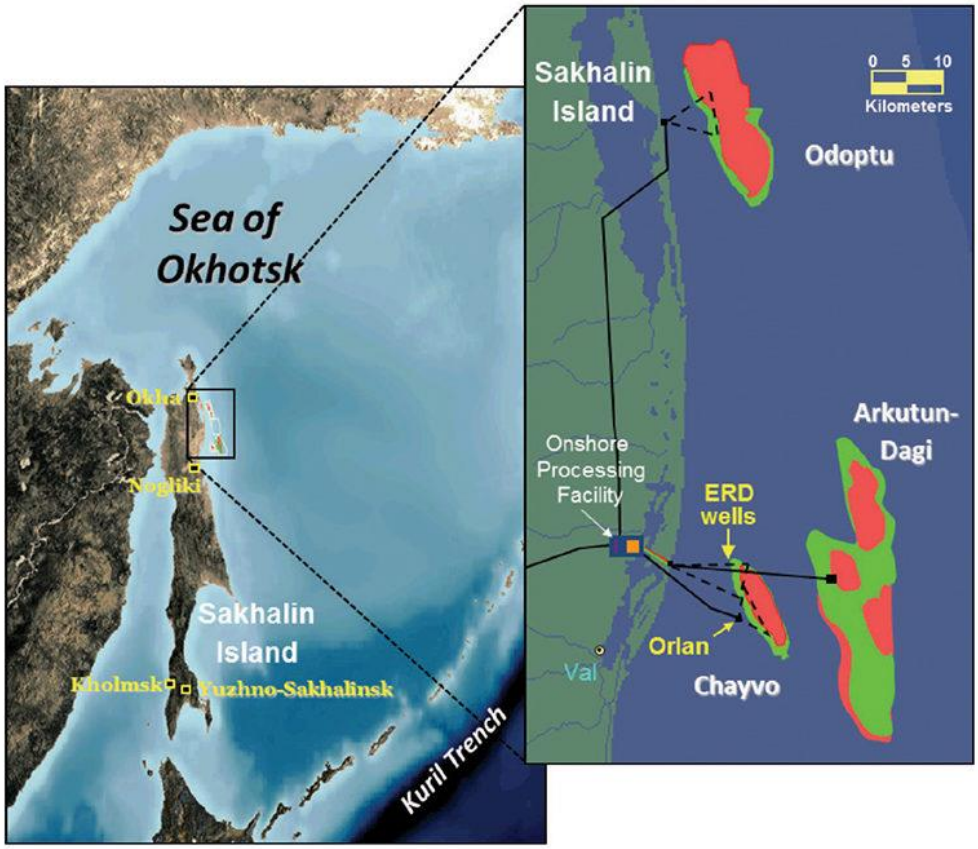
Slika 2-2. Podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja (Carden i Grace 2007)

Ova podjela je općeprihvaćena podjela, međutim danas se izrađuju horizontalne bušotine s daleko većim duljinama horizontalnih dionica. Također, danas se izrađuju i bušotine velikog dosega (engl. *Extended Reach Well – ERD*) čija je putanja jednostavna, ali duljina kanala značajno prelazi ograničenja dana na slici 2-2. Na slici 2-3 prikazan je odnos stvarne uspravne dubine kanala bušotine (engl. *True Vertical Depth – TVD*) i horizontalnog dosega (engl. *Horizontal Displacement – HD*) kod bušotina velikog dosega.



Slika 2-3. Odnos stvarne uspravne dubine kanala bušotine i horizontalnog dosega za različite bušotine (Kwantis, 2018)

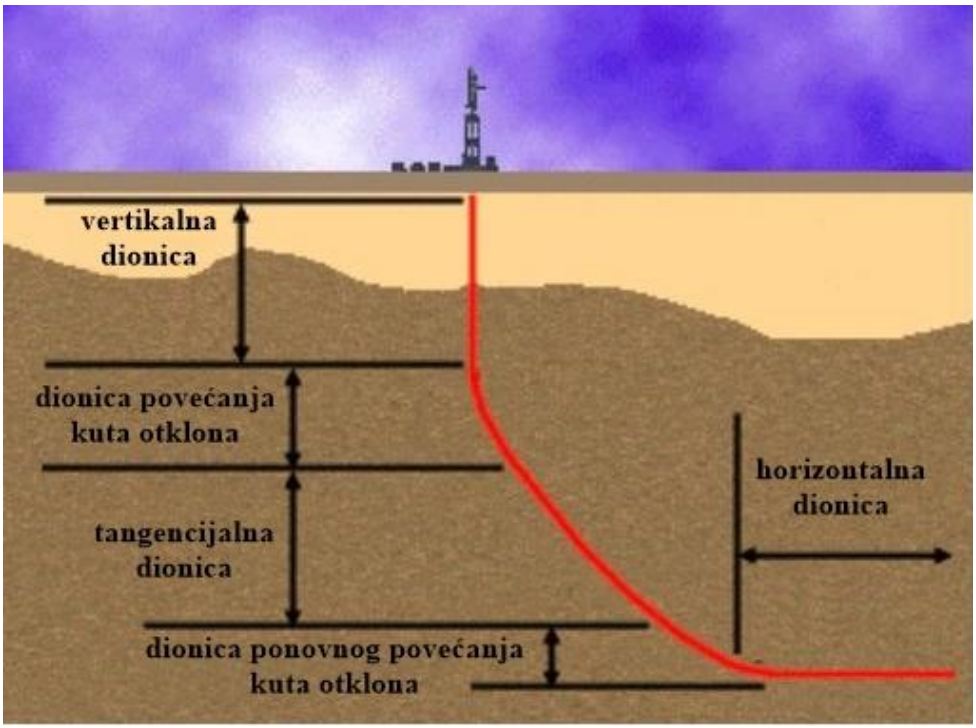
Trenutno najdulja bušotina velikog dosega izbušena je u studenom 2017. godine u sklopu projekta Sakhalin-1. Projekt obuhvaća tri odobalna polja, Chayvo, Odoptu i Arkutun-Dagi koja se nalaze uz istočnu obalu otoka Sakhalin u Rusiji (slika 2-4). Najdulja bušotina izbušena je na polju Chayvo i duljine je 15000 m, dok su dosadašnje najdulje bušotine bile duljine između 12450 i 13500 m te su izbušene u periodu između 2013. i 2015. godine (Zborowski, 2017). U sklopu projekta Sakhalin-1 postignuto je nekoliko rekorda u bušenju bušotina velikog dosega, a trenutno je 9 od 10 najduljih bušotina velikog dosega izbušeno upravo u sklopu ovog projekta (Subsea World News, 2017).



Slika 2-4. Lokacija projekta Sakhalin-1 (Wilson, 2016)

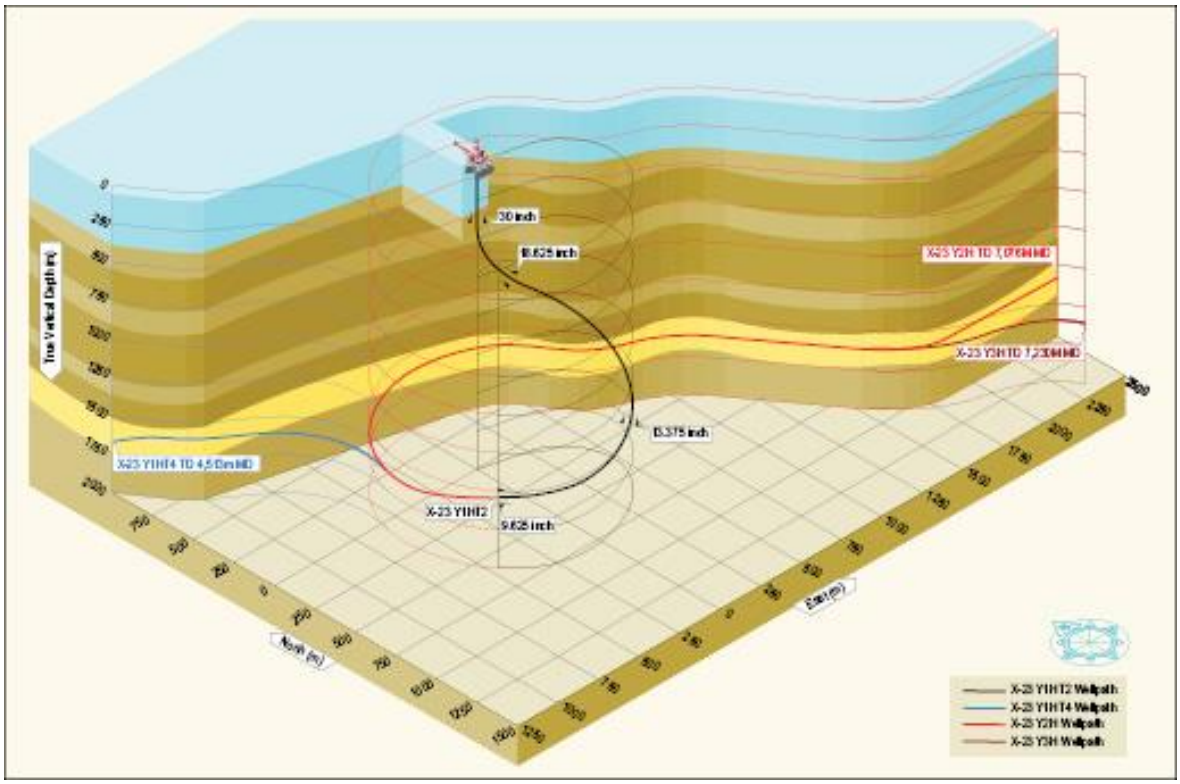
3. PUTANJA (TRAJEKTORIJA) HORIZONTALNE BUŠOTINE

Putanja horizontalne bušotine u pravilu se sastoji od sljedećih dionica kanala bušotine kao što je prikazano na slici 3-1.



Slika 3-1. Putanja horizontalne bušotine (Directionaldrilling, 2017)

Osim prikazane putanje, koja predstavlja poopćeni (2D) prikaz horizontalne bušotine bez ulaženja u njene prostorne promjene, moguće su i putanje s jednostrukom zakrivljenom dionicom ali i putanje s daleko složenijom konstrukcijom. Na slici 3-2 prikazana je horizontalna bušotina čija putanja odstupa od putanje prikazane na slici 3-1.



Slika 3-2. Horizontalna bušotina sa složenom putanjom (Drilling Contractor, 2018)

4. PROJEKTIRANJE BUŠOTINE

Važnu ulogu u razvoju i optimizaciji eksploatacije svakog plinskog i naftnog polja ima projektiranje bušotina budući da broj i konstrukcija bušotina utječe ne samo na količinu pridobivenih ugljikovodika nego i na jednostavnost (složenost) njihove izrade, dugoročni integritet bušotine kao i mogućnost obavljanja rudarskih radova u njima poput npr. hidrauličkog frakturiranja. Razvoj novih tehnologija u bušenju, kao i unaprjeđenje procesa bušenja u smislu točnog praćenja i kontrole putanje kanala bušotine te mogućnost bušenja bušotina složenih putanja rezultirali su i unapređenjem postupka projektiranja (planiranja) putanje horizontalnih i usmjerenih bušotina (Himmelberg i Eckert, 2013).

Ključni parametri prilikom planiranja putanje horizontalne bušotine su definiranje mjerene duljine (engl. *Measured Depth – MD*) i stvarne uspravne dubine kanala bušotine (engl. *True Vertical Depth – TVD*), azimuta (engl. *Azimuth*) kanala bušotine, točke skretanja kanala bušotine (engl. *Kick Off Point – KOP*), duljine zakrivljene dionice kanala bušotine s povećavanjem kut otklona (engl. *build rate* ili *build curve*), duljine dionice kanala bušotine gdje se postignuti kut otklona održava konstantnim (engl. *tangent section*) te duljine horizontalne dionice kanala bušotine. Zbog složene geološke građe stijena kroz koje se buši horizontalna bušotina se najčešće sastoji od dvije zakrivljene dionice s povećanjem kuta otklona i tangencijalne dionice između njih u kojoj se zadržava postignuti kut otklona. Pravilno projektiranje putanje horizontalne bušotine također podrazumijeva izbjegavanje doticaja (kolizije) s kanalima susjednih bušotina (ukoliko ih ima u blizini) ili izlazak izvan područja definiranog koncesijskim ugovorom.

Kod izrade usmjerenih (horizontalnih) bušotina putanju je moguće pratiti pomoću dubinskog sklopa mjernih uređaja za kontinuirano mjerenje parametara kanala bušotine tijekom bušenja (engl. *Measurment While Drilling – MWD*). Njime se vrši neprekidno mjerenje kuta otklona i azimuta u pravilnim intervalima povećanja duljine kanala bušotine (najčešće 30 m) na temelju kojih je moguće praćenje i korekcija putanje kanala bušotine. Također, bitno je i korištenje sklopa za karotažna mjerenja tijekom bušenja (engl. *Logging While Drilling – LWD*) koji omogućava mjerenja koja nije moguće izvesti konvencionalnim karotažnim mjerenjima (osobito u bušotinama s velikim kutom otklona kanala od vertikale) na način da se mjerenja obavljaju tijekom bušenja ili ubrzo nakon završetka bušenja primjenom karotažnih alatki koje su integrirane u kolonu bušaćih alatki. Podaci mjerenja

registrirani u bušotini direktno se prenose na površinu s pomoću impulsa tlaka (odnosno restrikcije u protoku isplake kroz bušaći niz) ili preuzimaju nakon mjerenja i izvlačenja alatki na površinu (Perić, 2007).

Projektiranje horizontalne bušotine znatno se razlikuje od projektiranja vertikalne bušotine. Kod vertikalne bušotine planirani cilj odnosno planirana točka dna kanala bušotine obično je opisana stvarnom uspravnom dubinom kanala bušotine s određenom tolerancijom (pomakom) ciljane točke u horizontalnoj ravnini. Kod projektiranja horizontalne bušotine cilj je obično izrada bušotine s određenom stvarnom uspravnom dubinom kanala bušotine uz određena odstupanja i s određenim horizontalnim otklonom od vertikale. U svakom slučaju lakše je bušiti bušotinu kojoj je primarni cilj određeni horizontalni doseg nego održavanje vrijednosti stvarne uspravne dubine kanala bušotine.

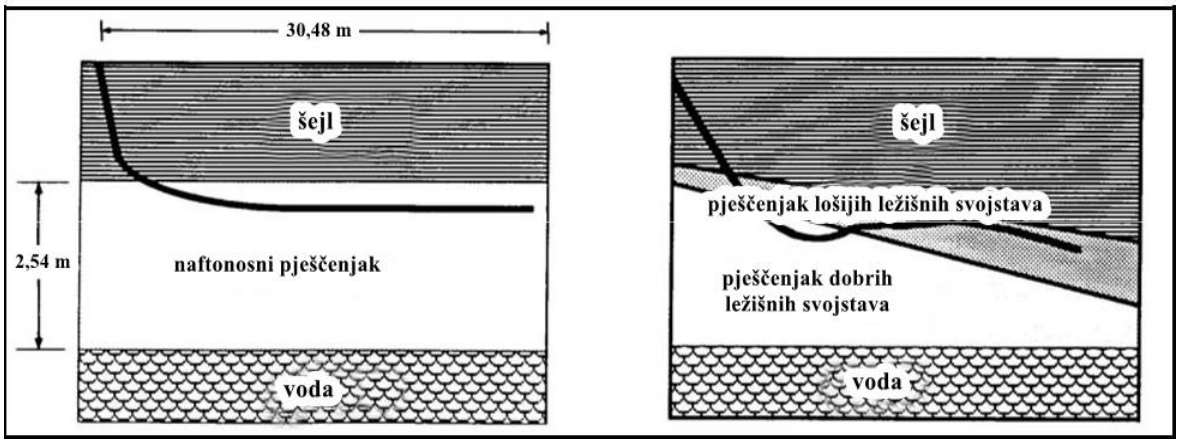
Prvi korak prilikom planiranja bušotine je sakupiti sve dostupne informacije sukladno tehničkim zahtjevima samog rudarskog objekta te stijenama kroz koje se planira bušiti. U ovoj fazi sve dostupne informacije o susjednim bušotinama (njihovom projektiranju, konstrukciji i izradi) mogu biti od velike koristi. Od postojećih podataka posebno mogu biti korisni karotažni dijagrami izbušenih susjednih bušotina, zapisnici o korištenim dlijetima, dnevni izvještaji s bušenja, izvještaji jedinice za operativni geološki nadzor bušenja i dr. Čak i susjedne vertikalne bušotine mogu pružiti korisne informacije za bušenje horizontalne bušotine. Ukoliko su rađene istraživačke bušotine na određenom području, to znači da su dostupne informacije za jednu ili više susjednih bušotina.

Također, prije planiranja potrebno je definirati razlog za bušenje horizontalne bušotine. Neki od razloga mogu biti sprječavanje formiranja plinskog ili vodenog konusa, presijecanje vertikalnih pukotina i slično. Često razlozi za izradu horizontalne bušotine utječu i na projektiranje njihovog opremanja. Zbog toga je uvijek potrebno uzeti u obzir i opremanje bušotine već kod samog planiranja horizontalne bušotine (Carden i Grace, 2007).

Za kvalitetno projektiranje i izradu horizontalne bušotine bitno je poznavanje geoloških podataka. Zbog toga je iznimno bitno prisustvo geologa u projektantskom timu čije će znanje iz paleontologije, petrografije, paleogeografije, stratigrafije, tektonike i geofizike doprinijeti izradi kvalitetnog projekta buduće bušotine. Osim tijekom projektiranja, bitno je prisustvo geologa na terenu gdje tijekom izrade bušotine geolog blisko surađuje s bušačima i stručnjacima za razradu ležišta ugljikovodika. Prilikom istraživanja ležišta ugljikovodika potrebno je istovremeno primijeniti i geološke metode istraživanja te

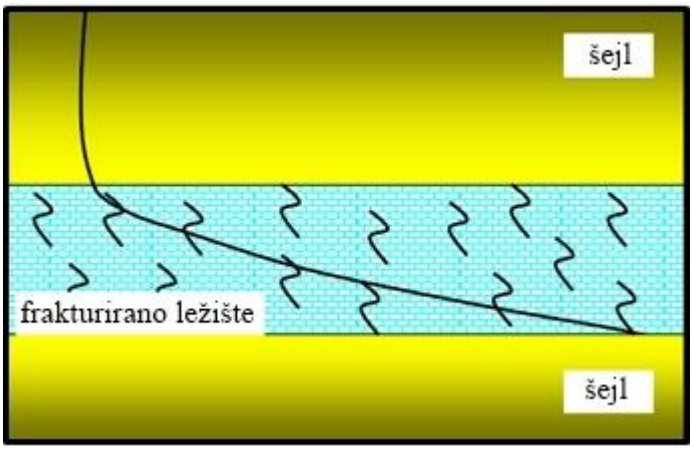
geofizičke i geokemijske metode kako bi se dobila što jasnija slika podzemlja odnosno položaja i karakteristika ležišta u njemu (Steiner i Boškov Steiner, 1994).

Najbitniji predmet geološkog promatranja je jezgra budući da ona služi kao direktni pokazatelj litološkog sastava, mogućeg sadržaja fluida, tektonskih značajki te pada i pružanja jezgrom zahvaćenih naslaga (slojeva). Brojnim analizama i neizravnim proučavanjem jezgre otkrivaju se osobitosti stijena nositelja fluida. Tu je posebno važno obratiti pozornost na način pakiranja zrnaca u njima budući da o njima ovisi šupljikavost i propusnost same stijene. Također tim istraživanjima moguće je saznati i vrste i moguće količine fluida u stijeni te promjene u smjerovima pada i pružanja razmatranih naslaga (slojeva). Nagib sloja od samo 2 ili 3º može uzrokovati da horizontalna bušotina izađe izvan granica ležišta na vrlo maloj udaljenosti. Također, geološki podaci o različitim stijenama kroz koje se buši mogu biti različiti od očekivanih. Na slici 4-1 je prikazan primjer kako je moguće odstupanje putanje horizontalne bušotine zbog nedovoljnog poznavanja geoloških struktura u podzemlju. Na lijevoj strani slike prikazana je planirana putanja kao i položaj slojeva u podzemlju, dok desna strana pokazuje stvarnu putanju bušotine kao i stvarnu geološku strukturu podzemlja. Nagibi slojeva u konkretnom slučaju nisu odgovarali pretpostavljenim uvjetima pa je rezultat toga bila izrada horizontalne bušotine u nepovoljnom dijelu ležišta (pješčenjak lošijih ležišnih svojstava) (Carden i Grace, 2007).



Slika 4-1. Prikaz planirane i stvarne trajektorije horizontalne bušotine (Carden i Grace, 2007)

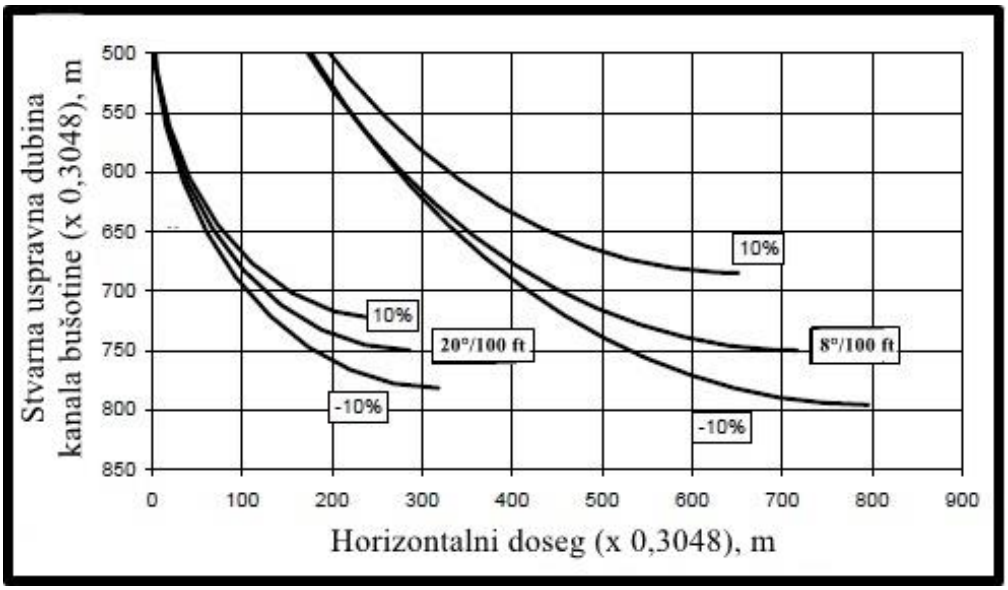
Sljedeće što treba razmotriti kod projektiranja putanje je razlog izrade horizontalne bušotine. Ukoliko je razlog bušenja sprječavanje formiranja vodenog konusa, onda se kanal bušotine postavlja bliže krovini ležišta odnosno dalje od podinske vode, dok opasnost od formiranje plinskog konusa utječe na smještanje kanala bušotine bliže podini ležišta. Ukoliko je bušotina izbušena kako bi se povezale prirodne frakture onda bi trebala biti izrađena od krovine ležišta uz zadržavanje postignutog kuta otklona do podine ležišta na kraju horizontalne dionice kao što je prikazano na slici 4-2.



Slika 4-2. Položaj horizontalne bušotine u frakturiranom ležištu (Carden i Grace, 2007)

Moguće je ponekad da određeni bitni geološki podaci za određeno područje nisu poznati za vrijeme projektiranja određene horizontalne bušotine pa je izrada bušotine zamišljena tako da se prvo buši vertikalna bušotina (pilot bušotina), zatim se obavljaju karotažna ispitivanja i/ili uzorkovanje fluida i jezgrovanje stijena prije bušenja horizontalnog dijela. Takva vertikalna bušotina služi kao istraživačka bušotina za definiranje stvarne uspravne dubine ležišta i litoloških promjena. Na osnovu tih informacija moguće je planiranje cementacijskih radova s ciljem zatvaranja donjeg dijela vertikalne bušotine u ležištu, skretanje kanala bušotine i bušenje horizontalne dionice bušotine u povoljnijem položaju u odnosu na razmatrano ležište. Stoga je i nakon početka bušenja potrebno cijelo vrijeme pratiti tijek izrade bušotine na način da se analiziraju krhotine stijene koje su iznesene budući da pogonski geolog pomoću njih može odrediti tip stijene kroz koju se buši, ali i promjene u samom ležištu (isklinjenje, postojanje rasjeda i dr.). Također, na temelju tih krhotina moguće je donijeti odluku o tome treba li bušotinu završiti i opremiti za buduće pridobivanje fluida ili je potrebno nastaviti bušenje kroz ležište (Carden i Grace, 2007).

Prilikom planiranja putanje kanala bušotine, odnosno definiranja povećanja kuta otklona zakrivljene dionice u obzir treba uzeti nekoliko čimbenika. Izrada zakrivljene dionice velikog polumjera zakrivljenja iziskuje više vremena, skuplja je i puno je teže izraditi ciljanu putanju uz minimalna odstupanja u stvarnoj uspravnoj dubini kanala bušotine osim ako se ne buši s upravljivim sustavom. Na slici 4-3 prikazano je kako će se stvarna uspravna dubina kanala bušotine promijeniti kad je stvarno povećanje kuta otklona ± 10% planiranog povećanja kuta otklona za izradu zakrivljene dionice. Izradom bušotine s malim polumjerom zakrivljenja olakšava se izrada projektirane putanje kanala bušotine, ali dolazi do povećanog naprezanja u cijevnim alatkama te postoje izvjesna ograničenja vezana uz njihovu izradu i opremanje. Osim toga, horizontalnim bušotinama s malim polumjerom zakrivljenja postići će se i najkraća horizontalna dionica kanala bušotine. Horizontalne bušotine sa srednjim polumjerom zakrivljenja predstavljaju kompromis između velikog i malog polumjera zakrivljenja. Kod njihove izrade koristi se konvencionalna oprema, relativno su jeftinije od horizontalnih bušotina s malim polumjerom zakrivljenja te se otvara mogućnost različitim načinima opremanja bušotine i zbog toga je najčešći izbor za većinu horizontalnih bušotina. Mali polumjer zakrivljenja se većinom koristi za skretanje kanala bušotine iz već postojeće bušotine, dok se veliki polumjer ne koristi na kopnenim bušotinama nego je većinom izbor za bušotine na moru budući da su ponekad ciljani dijelovi ležišta dosta udaljeni od lokacije ušća bušotine (Carden i Grace, 2007).



Slika 4-3. Usporedba pogreški nastalih kad je stvarno povećanje kuta otklona ± 10% od planiranog povećanja kuta otklona (Carden i Grace, 2007)

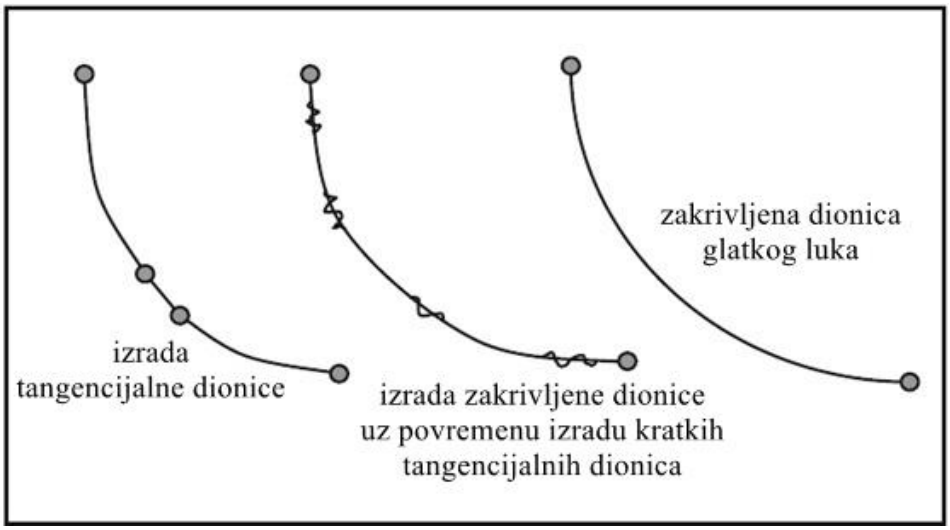
Stvarno povećanje kuta otklona obično se temelji na unaprijed definiranim vrijednostima ili dostupnim točkama skretanja kanala bušotine. Obično, veće povećanje kuta otklona kanala bušotine koristi se u bušotinama manjeg promjera, dok se manje povećanje kuta otklona kanala bušotine koristi u bušotinama većeg promjena. Vrijednost povećanja kuta otklona kanala bušotine ograničena je zbog mogućeg oštećenja bušaćih alatki, prvenstveno bušaćih šipki. Tako npr. za bušaće šipke promjera 0,1143 m (4 ½ ") maksimalno povećanje kuta otklona iznosi 18 º /30 m, dok je za bušaće šipke promjera 0,0889 m (3 ½ ") 24 º/30 m. Ukoliko je vrijednost povećanja kuta otklona kanala bušotine veća od ovih vrijednosti, mogući su problemi zbog zamora materijala, no unatoč tome ukoliko je to potrebno bušaće alatke se mogu koristiti i pri većem povećanju kuta otklona od preporučenog. Također, alatke koje se koriste za povećanje kuta otklona ne mogu povećati kut otklona jednako brzo u bušotinama manjeg promjera kao u bušotinama većeg promjera. Tako je npr. u bušotinama promjera 0,2159 m (8 ½ ") povećanje kuta otklona ograničeno na 15 do 18 º/30 m ovisno o tome koji se upravljivi motor koristi. Kod izrade bušotina sa srednjim polumjerom zakrivljenja moguće je koristiti alatke koje mogu povećati kut otklona čak i do 50 º/30 m. U bušotinama promjera 0,1524 m (6 ") povećanje kuta otklona ograničeno je na 25 º/30 m, iako su kod bušotina s malim polumjerom zakrivljenja dostupne i alatke koje mogu povećati kut otklona za veće vrijednosti. Kod bušotina promjera 0,31115 m (12 ¼ ") maksimalno povećanje kuta otklona je od 12 do 14 º/30 m. Naravno, uvijek postoje slučajevi kad se vrijednosti povećanja kuta otklona razlikuju od navedenih (Carden i Grace, 2007).

Odluku koliko će biti povećanje kuta otklona kao i potrebne korekcije odabrane vrijednosti donosi operator. U principu, veće povećanje kuta otklona znači da je za bušenje kanala bušotine potrebno manje vremena, a samim time i troškovi su manji. Povećanje kuta otklona može biti uvjetovano i problemima tijekom bušenja ili dubinom postavljenih kolona zaštitnih cijevi. Operator definira povećanje kuta otklona i dubinu točke skretanja kanala bušotine. Ukoliko je definirana dubina točke skretanja kanala bušotine, onda će povećanje kuta otklona kanala bušotine biti prilagođeno njoj i obrnuto.

U većini odobalnih bušotina, operator mora izbušiti usmjerenu bušotinu kako bi se došlo do dijela ležišta u kojem se bušotina nastavlja bušiti horizontalno. Stoga su većina odobalnih bušotina izbušene s velikim polumjerom zakrivljenja ili malim povećanjem kuta otklona.

U određenim slučajevima (mala debljina ležišta i sl.) potrebno je napraviti neke prilagodbe putanje zakrivljene dionice kanala bušotine kako bi se dosegnuo željeni cilj, odnosno izradio projektirani horizontalni dio kanala kroz ležište. Poznavajući određeno područje, moguće je lakše pretpostaviti povećanje kuta otklona, a danas je i povećanje kuta otklona s većinom sklopova motora moguće postići s pogreškom od 10 do 15%. U nepoznatim područjima prilikom planiranja horizontalne bušotine nije neuobičajeno primijeniti neki od postupaka za točnu izradu zakrivljene dionice i horizontalnog dijela na unaprijed definiranoj određenoj stvarnoj uspravnoj dubini: izrada tangencijalne dionice kao sastavnog dijela zakrivljene dionice kanala bušotine (engl. *tangent section*), izrada zakrivljene dionice uz povremenu izradu kratkih tangencijalnih dionica (engl. *fractional orientation*) te izrada zakrivljene dionice smanjenjem intenziteta povećanja kuta otklona kanala bušotine kako se približava horizontali 90º (engl. *soft landing*) (Carden i Grace, 2007).

Korekcija putanje zakrivljene dionice izradom tangencijalne dionice je postupak u kojem se između 2 zakrivljena dijela (dionice) izrađuje relativno kratki pravocrtni dio s konstantnim kutom otklona bušotine kao što je prikazano na slici 4-4. Npr. bušotina može biti izbušena s povećanjem kuta otklona od 12 º/30 m do postizanja kuta otklona od 45º, a zatim se buši dionica pod kutom otklona od 45º nakon čega se nastavlja s povećanjem kuta otklona od 12 º /30 m.



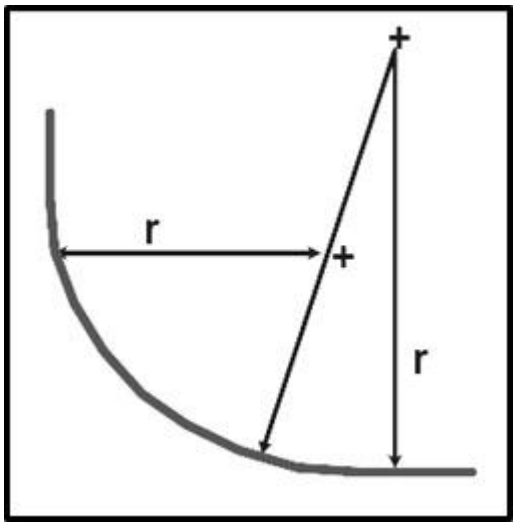
Slika 4-4. Izrade zakrivljene dionice kanala bušotine (Carden i Grace, 2007)

Ukoliko je stvarno povećanje kuta otklona manje nego je planirano, bušotina će kut otklona od 90º dosegnuti na većoj dubini od planirane, a ukoliko je stvarno povećanje kuta otklona veće nego je planirano bušotina će kut otklona od 90º dosegnuti na manjoj dubini kao što je prikazano na slici 4-3. U tom slučaju izradom tangencijalne dionice moguće je korigiranje putanje zakrivljenog dijela kanala bušotine. Ako je povećanje kuta otklona veće nego očekivano, tangencijalna sekcija može biti produljena kako bi se dosegnula određena planirana uspravna dubina kanala bušotine i obrnuto, ako je povećanje kuta otklona manje nego je predviđeno, tangencijalna sekcija može biti skraćena kako bi se dosegnula određena planirana uspravna dubina kanala bušotine (Carden i Grace, 2007).

Izrada tangencijalne sekcije izbjegava se u praksi ako se ne radi s upravljivim sustavima, odnosno upravljivim dubinskim motorima ili rotirajućim upravljivim bušaćim sklopovima, budući da bi u tom slučaju izrada tangencijalne dionice zahtijevala 2 izvlačenja sklopa (sklopa za izradu tangencijalne sekcije i sklopa za izradu zakrivljene dionice) te su samim tim troškovi izrade zakrivljene dionice veći. Korištenje ove metode izbjegava se kod bušotina sa srednjim polumjerom zakrivljenja i kod bušotina s većom stvarnom uspravnom dubinom kanala bušotine.

Kod sljedeće metode se korištenjem sklopa upravljivog dubinskog motora ili rotirajućeg upravljivog bušaćeg sklopa buši dionica s većim povećanjem kuta otklona nego što je planirano, a zatim se nakon ostvarivanja određenog kuta otklona rade male tangencijalne sekcije koje u kontinuitetu predstavljaju zakrivljenu dionicu (slika 4-4) Kod ove metode nema izmjene alata te samim time su i troškovi manji. Nažalost, nije moguće postići veliko povećanje kuta otklona korištenjem sklopa upravljivog dubinskog motora ili rotirajućim upravljivim bušaćim sklopovima.

Sljedeći postupak je izrada zakrivljenih dionica povećanjem i smanjenjem intenziteta kuta otklona kako se kanal bušotine približava kutu otklona od 90º (engl. *soft landing*) te je prikazan na slici 4-5. Kod ove metode izrađuje se prvi dio zakrivljene dionice s jednim većim povećanjem kuta otklona (do 70 ili 75º), a nakon što se postigne određeni kut otklona u niz bušaćih alatki postavlja se upravljivi sklop alatki i bušotina se nastavlja bušiti s manjim povećanjem kuta otklona. Ovaj postupak omogućava veći horizontalni doseg kanala bušotine (Carden i Grace, 2007).



Slika 4-5. Izrada zakrivljenih dionica povećanjem i smanjenjem intenziteta kuta otklona (Carden i Grace, 2007)

Kao što je dosad rečeno, planiranje (projektiranje) horizontalne bušotine je puno složenije nego planiranje vertikalne bušotine. Planiranje horizontalne bušotine uključuje osobe iz različitih područja kao što su geologija, bušenje, razrada ležišta i proizvodnja, ali i iz servisnih kompanija. Budući da se prilikom izrade horizontalnih bušotina postavljaju mnoga pitanja kao što su tlakovi u dionicama koje će biti bušene prilikom izrade horizontalne bušotine, oštećenja koja nastaju zbog korištenja isplake, potencijalne stimulacije bušotine kako bi se povećalo davanje bušotina te očekivano davanje bušotine. Upravo zbog toga potrebno je uključiti sve navedene osobe u planiranje bušotina te definirati odgovore na ta pitanja kako bi se isplanirala efektivna putanja kanala bušotine. Također, potrebno je uključiti i osoblje iz servisnih kompanija koje je iskusnije u primjeni određene opreme nego ostali te mogu pomoći operatoru tijekom faze planiranja bušotine. Najbolje bi bilo prije početka bušenja poznavati sva ograničenja vezana uz opreme i alate, što uključuje i opremu i alatke koja se koristi za bušenje ali i za opremanje bušotine.

U planiranju bilo koje usmjerene bušotine, pa tako i horizontalne bušotine, potrebno je poznavanje različitih podataka. Stvarna uspravna dubina kanala bušotine je ključni podatak za planiranje horizontalne bušotine, dok horizontalni doseg nije ključan podatak osim kod bušenja u odobalnim područjima. U tom slučaju bušotina prvo mora dosegnuti dio ležišta gdje će horizontalna dionica kanala bušotina biti izbušena. Kod odobalnih bušotina azimut točke ulaska u ležište ne poklapa se s azimutom horizontalne dionice zbog kompleksnosti izrade horizontalnih bušotina na moru. Također, bitno je uzeti u obzir i

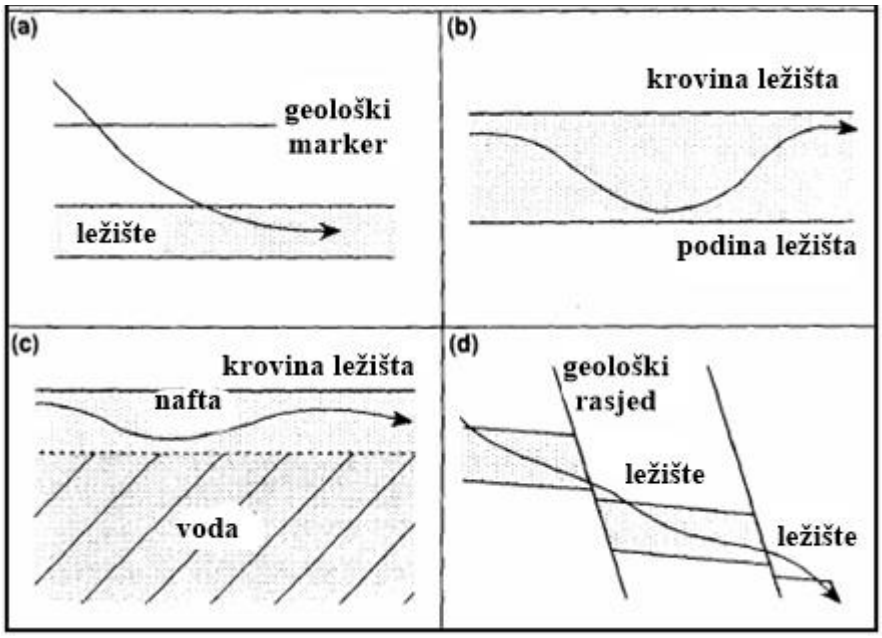
povećanje kuta otklona te točku skretanja kanala bušotine kako bi se obuhvatile sve potrebne informacije za planiranje putanje horizontalne bušotine.

4.1. Geoupravljanje

Geoupravljanje (engl. *geosteering*) je definirano kao bušenje horizontalne ili druge koso usmjerene bušotine, gdje su odluke o prilagodbi putanje bušotine baziraju na stvarnim podacima dobivenim u realnom vremenu mjerenjem u kanalu bušotine. U konvencionalnom koso usmjerenom bušenju, putanjom kanala bušotine se upravlja u skladu s predviđenim geometrijskim planom. Cilj je slijediti projektiranu putanju što je više moguće. Geoupravljanje je zapravo odstupanje od ove konvencionalne metode, a potrebno je kad je geološki marker pogrešno definiran, kad je mala debljina ležišta ili je geologija ležišta toliko komplicirana da je nepraktično korištenje konvencionalne metode bušenja. Karotažna mjerenja tijekom bušenja (gama karotaža, karotaža otpornosti i gustoće) (engl. *Logging While Drilling – LWD*) mogu se koristiti kako bi se horizontalna bušotina pozicionirala unutar ležišta. Stoga, putanja usmjerene bušotine može biti prilagođena na temelju karotažnih podataka dobivenih u realnom vremenu (Carden i Grace, 2007).

Jedan od glavnih problema pri bušenju horizontalnih bušotina u formacijama male debljine je izrada horizontalne dionice u danoj formaciji. Često je slučaj da se unatoč najvećem naporu osoblja na bušotini, izradi horizontalna dionica ispod ili iznad ciljane stvarne uspravne dubine ležišta. Kao što je prikazano na slici 4-6 (a) geoupravljanje omogućava rano prepoznavanje geoloških markera iznad ležišta i konačno bušenje horizontalnog dijela u skladu s tim. Kako je vidljivo na slici 4-6 (b) moguće je bušenje kroz ležišta male debljine, od 3 do 4,5 m debljine, međutim kod horizontalnih bušotina koje se buše u relativno "uskom" području, potrebno je pravovremeno uočiti približavanja geološkim granicama ležištima (krovini i podini) što prije kako bi se na vrijeme korigirala putanja bušotina. Mjerenjem električne otpornosti i gama karotažom može se na vrijeme otkriti približna krovina i podina ležišta što bi trebalo omogućiti bušenje bez izlaska iz ležišta. Bušenje ovakvih ležišta uvijek je komplicirano zbog mijenjanja kuta otklona, različite debljine ležišta i prisutnosti rasjeda. Iako ležište može biti male debljine, poželjno je održavati određenu udaljenost kanala bušotine od kontakta nafta – voda ili plin – nafta što je prikazano na slici 4-6 (c). U ležištima s brojnim rasjedima (slika 4-6 (d)) moguće je

povezivanje nekoliko ležišta ugljikovodika jednom bušotinom. Uspješna izrada ovakve bušotine ovisi o poznavanju položaja od rasjeda i pravilnim upravljanjem (putanjom) kako bi se dosegnulo sljedeće ležište ugljikovodika. Geoupravljanje omogućava izradu ovakvih bušotina i povećanje pridobivanje ugljikovodika (Carden i Grace, 2007).



Slika 4-6. Neki od razloga za geoupravljanje (Carden i Grace, 2007)

Problem može nastati prilikom upravljanja putanje unutar "uskog" područja zbog udaljenosti senzora od dlijeta. Ova udaljenost može biti između 9,14 i 30,48 m u konvencionalnom sklopu za karotažna mjerenja tijekom bušenja (LWD). Rezultat može biti kašnjenje podataka, odnosno drugim riječima promjene u stijenama bit će poznate tek nakon što se izbuši značajan dio kanala bušotine. Međutim, danas su dostupne alatke koje senzore postavljaju unutar 6 m iza dlijeta, a moguće je i postavljanje senzora na udaljenost manju od 1 m od dlijeta ukoliko je kut otklona veći (Carden i Grace, 2007).

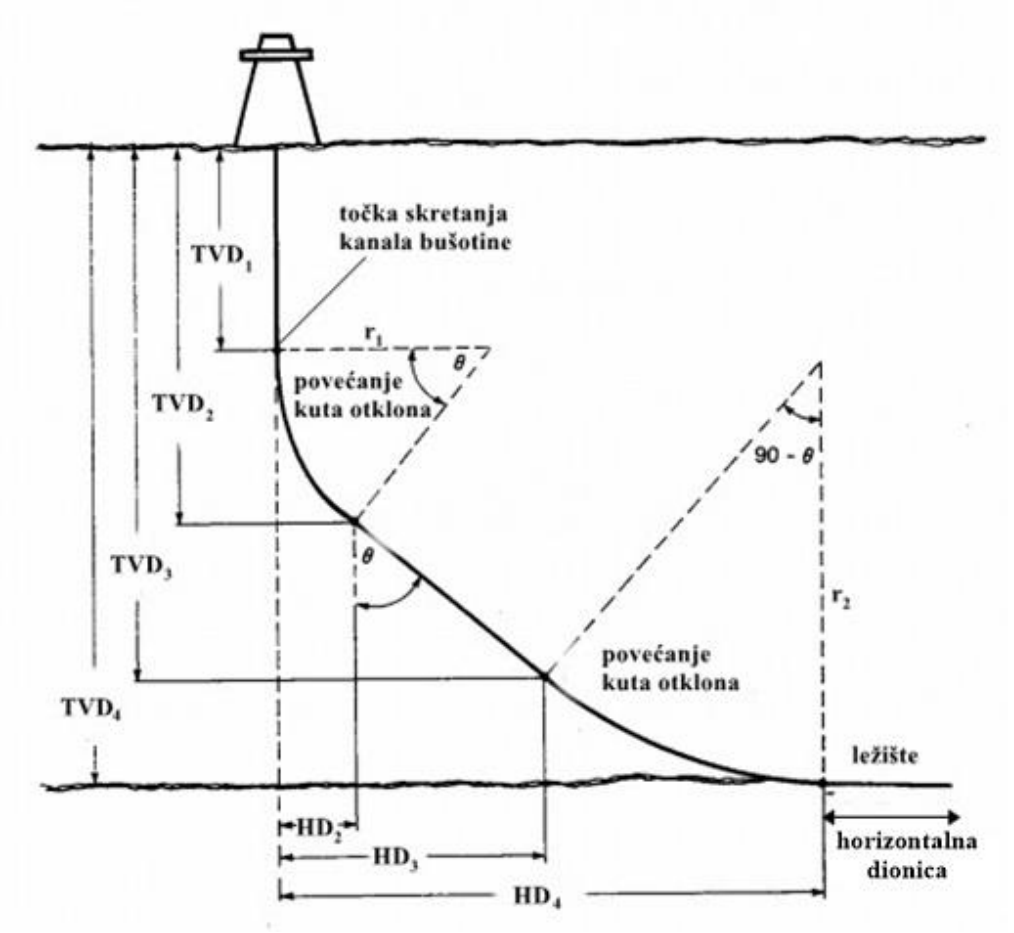
5. PRORAČUN PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE

Kod projektiranja putanje horizontalne bušotine bitno je definirati nekoliko dijelova, odnosno karakterističnih točaka i dionica kanala bušotine. Bušotina započinje vertikalnom dionicom koja završava mjestom gdje dolazi do skretanja kanala bušotine, odnosno povećanja kuta otklona ili azimuta i koje se naziva točka skretanja (engl. *Kick Off Point – KOP*). Slijedi dio bušotine gdje se povećava kut otklona (engl. *build section* ili *build curve*) koji završava točkom u kojoj je postignut željeni kut otklona kanala bušotine (engl. *End of Build – EOB* ili *End of Curve – EOC*). Nakon toga obično se kut otklona održava konstantnim i taj dio bušotine naziva se tangencijalna dionica (engl. *tangent section*) ili održavanje kuta otklona (engl. *hold section*) te zatim slijedi dionica ponovnog povećanja kuta otklona do početka izrade horizontalne sekcije (engl. *horizontal section*). Međutim treba uzeti u obzir da ne koriste sve kompanije iste nazive za pojedine dijelove (sekcije) horizontalne bušotine, niti su sve bušotine jednako projektirane.

Na svakoj bušotini bušač dobiva u određenim vremenskim intervalima podatke o mjerenoj duljini kanala bušotine te azimutu i kutu otklona. Pomoću metoda za proračun putanje bušotine može točno definirati položaj u prostoru bušaćeg niza (dlijeta) kao i cijelog kanala bušotine u bilo kojem trenutku.

5.1. Pojednostavljene jednadžbe za planiranje putanje horizontalne bušotine

Wiggins i Juvakm-Wold su 1990. godine predstavili pojednostavljene jednadžbe za planiranje putanje horizontalne bušotine. Ove jednadžbe su rađene za tipičnu putanju horizontalne bušotine koja je prikazana na slici 5-1.



Slika 5-1. Tipična putanja horizontalne bušotine (Wiggins i Juvkam-Wold, 1990)

Kut otklona tangencijalne dionice kanala bušotine moguće je izračunati prema sljedećoj jednadžbi:

$$\tan\theta = \frac{HD_3 - HD_2}{TVD_3 - TVD_2} \tag{5-1}$$

gdje su:

θ – kut otklona kanala bušotine, °

HD_3 – horizontalni pomak tangencijalne dionice kanala bušotine, m

HD_2 – horizontalni pomak prve zakrivljene dionice kanala bušotine s povećanjem kuta otklona, m

TVD_3 – stvarna uspravna dubina tangencijalne dionice kanala bušotine, m

TVD_2 – stvarna uspravna dubina prve zakrivljene dionice kanala bušotine, m

Polumjer zakrivljenja u dionicama povećanja i smanjenja kuta otklona može biti izračunat uvrštavanjem željenog kuta otklona prema sljedećoj jednadžbi:

$$r = \frac{180 \cdot l}{\pi \cdot q} \tag{5-2}$$

gdje su:

r - polumjer zakrivljenja kanala bušotine, m

q – intenzitet povećanja kuta otklona, °/30

Horizontalni pomak prve zakrivljene dionice kanala bušotine (odnosno do postizanja željenog kuta otklona) i stvarna uspravna dubina kanala bušotine na tom dijelu računaju se pomoću jednadžbi:

$$HD_2 = r_1 - r_1 \cdot \cos\theta \tag{5-3}$$

$$TVD_2 = TVD_1 + r_1 \cdot \sin\theta \tag{5-4}$$

gdje su:

r_1 – polumjer zakrivljenja prve zakrivljene dionice kanala bušotine, m

TVD_1 – stvarna uspravna dubina točke skretanja kanala bušotine, m

Horizontalni pomak tangencijalne dionice kanala bušotine kao i njena stvarna uspravna dubina na tom dijelu računaju se pomoću jednadžbi:

$$HD_3 = HD_4 - r_2 \cdot \cos\theta \tag{5-5}$$

$$TVD_3 = TVD_4 - r_2 + r_2 \cdot \sin\theta \tag{5-6}$$

gdje su:

HD_4 – horizontalni pomak točke ulaska u ležište, m

r_2 – polumjer zakrivljenja druge zakrivljene dionice kanala bušotine, m

TVD_4 – stvarna uspravna dubina ležišta, m

Oduzimanjem jednadžbe 5-3 od jednadžbe 5-5 te jednadžbe 5-4 od jednadžbe 5-6 dobivaju se sljedeće jednadžbe:

$$HD_3 - HD_2 = HD_4 - r_1 - r_2 + (r_1 + r_2) \cdot \cos\theta \tag{5-7}$$

$$TVD_3 - TVD_2 = TVD_4 - TVD_1 - (r_1 + r_2) \cdot \sin\theta \tag{5-8}$$

Uvrštavanjem jednadžbi 5-7 i 5-8 u jednadžbu 5-1 dobiva se sljedeći izraz:

$$\tan\theta = \frac{HD_4 - r_1 \cdot (r_2 - r_1) \cdot \cos\theta}{TVD_4 - TVD_1 - r_2 + (r_2 - r_1) \cdot \sin\theta} \tag{5-9}$$

odnosno

$$\tan\theta \cdot (TVD_4 - TVD_1 - r_2 + (r_2 - r_1) \cdot \sin\theta) = HD_4 - r_1 \cdot (r_2 - r_1) \cdot \cos\theta \tag{5-10}$$

A množenjem jednadžbe 5-10 s *cosθ* dobiva se sljedeća jednadžba:

$$\sin\theta \cdot (TVD_4 - TVD_1 - r_2) + (r_2 - r_1) = \cos\theta \cdot (HD_4 - r_1) \tag{5-11}$$

Iskorištavajući trigonometrijske identitete:

$$\cos 2\theta = 2\cos^2\theta - 1$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin\theta \cos\theta$$

$$\sec^2\theta = 1 + \tan^2\theta$$

te dozvoljavajući pisanje θ u obliku:

$$\theta = 2 \cdot \left(\frac{\theta}{2}\right)$$

i dijeleći s

$$\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

jednadžba 5-11 postaje:

$$2\tan\frac{\theta}{2} \cdot (TVD_4 - TVD_1) = HD_4 + \tan^2\frac{\theta}{2} \cdot (2 \cdot (r_1 + r_2) - HD_4 \tag{5-12}$$

Odnosno u drugom obliku:

$$(2 \cdot (r_1 + r_2) - HD_4) \cdot tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - 2 \cdot (TVD_4 - TVD_1) \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + HD_4 = 0 \tag{5-13}$$

Jednadžbu 5-13 moguće je riješiti pomoću kvadratne jednadžbe za θ, te se u tom slučaju dobiva:

$$\theta = 2 \cdot \tan^{-1}\left[\frac{(TVD_1 - TVD_4 + r_2) + \sqrt{(TVD_1 - TVD_4 - r_2)^2 \cdot (r_2 \cdot 2 \cdot r_1 + HD_4) \cdot (r_2 - HD_4)}}{r_2 - 2 \cdot r_1 + HD_4}\right] \tag{5-14}$$

Jednadžbu 5-13 moguće je koristiti kod horizontalnih bušotina s jednom ili dvije dionice povećanja kuta otklona. Jedina razlika je što kod horizontalne bušotine s jednom dionicom povećanja kuta otklona r_2 je jednak 0.

Također, jednadžbu 5-14 moguće je prilagoditi za planiranje bušotina velikog dosega ili usmjerenih bušotina s kutom otklona manjim od 90º, a koje sadrže dvije dionice s povećanjem kuta otklona kanala bušotine. U tom slučaju se za stvarnu vertikalnu dubinu ležišta i horizontalni pomak do ležišta koriste sljedeće formule:

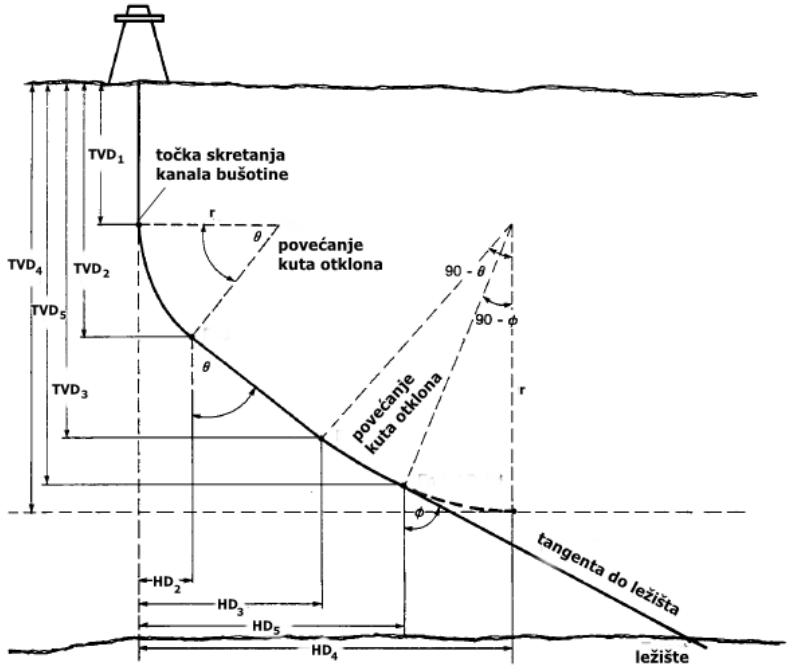
$$TVD_4 = TVD_5 + r_2 \cdot (1 - \sin\theta) \tag{5-15}$$

$$HD_4 = HD_5 + r_2 \cdot \cos\theta \tag{5-16}$$

TVD$_5$ – stvarna uspravna dubina do točke ulaska u ležište horizontalne bušotine koja sadrži dvije dionice povećanja kuta otklona, m

HD$_5$ – horizontalni pomak do točke ulaska u ležište horizontalne bušotine koja sadrže dvije dionice povećanja kuta otklona, m

Putanju bušotine velikog dosega ili usmjerene bušotine koja sadrži dvije dionice povećanja kuta otklona prikazana je na slici 5-2.



Slika 5-2. Putanja bušotine velikog dosega ili usmjerene bušotine koja sadrži dvije dionice povećanja kuta otklona (Wiggins i Juvkam-Wold, 1990)

5.2. Zakrivljena sekcija

Postoji nekoliko metoda koje se mogu koristiti za proračun putanje zakrivljenih dionica usmjerenih bušotina, ali i za potpuno određivanje položaja kanala bušotine u prostoru na temelju obavljenih mjerenja u bušotini. Najčešće korištene metode za proračun putanje u zakrivljenim dionicama kanala bušotine u naftnoj industriji su (Carden i Grace, 2007):

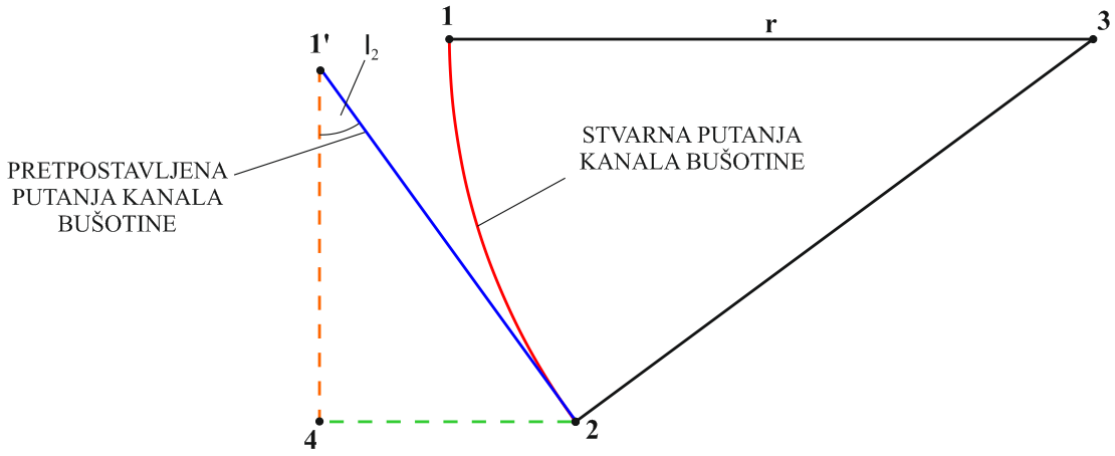
1. metoda tangente,
2. metoda uravnotežene tangente,
3. metoda srednjeg kuta,
4. metoda polumjera zakrivljenja,
5. metoda minimalne zakrivljenosti.

Od navedenih metoda, metoda tangente je najmanje precizna, dok su metode polumjera zakrivljenja i minimalne zakrivljenosti najpreciznije. Trenutno u svijetu najviše kompanija koristi metodu minimalne zakrivljenosti (Carden i Grace, 2007).

Prve tri metode proračuna temelje se na trigonometriji pravokutnog trokuta.

Navedene metode za proračun putanje zakrivljenih dionica kanala bušotine bit će objašnjene u nastavku teksta te je na kraju prikazana sažeta tablica s formulama koje se koriste kod pojedine metode za proračun putanje horizontalne bušotine.

Metoda tangente je jedno vrijeme bila najčešće korištena metoda za proračun putanje zakrivljenih dionica kanala bušotine zbog jednostavnosti. Jednadžbe koje se koriste su relativno jednostavne, a proračun je moguće lako provesti i na samom terenu. Nažalost, zbog svoje jednostavnosti metoda tangente je najmanje precizna od svih metoda i rezultira većim pogreškama nego ostale metode. Osnovna je pretpostavka ove metode da je putanja kanala bušotine između dviju točaka zakrivljene dionice kanala bušotine (točke 1 i 2) za koje su obavljena mjerenja pravocrtna i slijedi tangentu na donju točku putanje (točka 2) (slika 5-3).

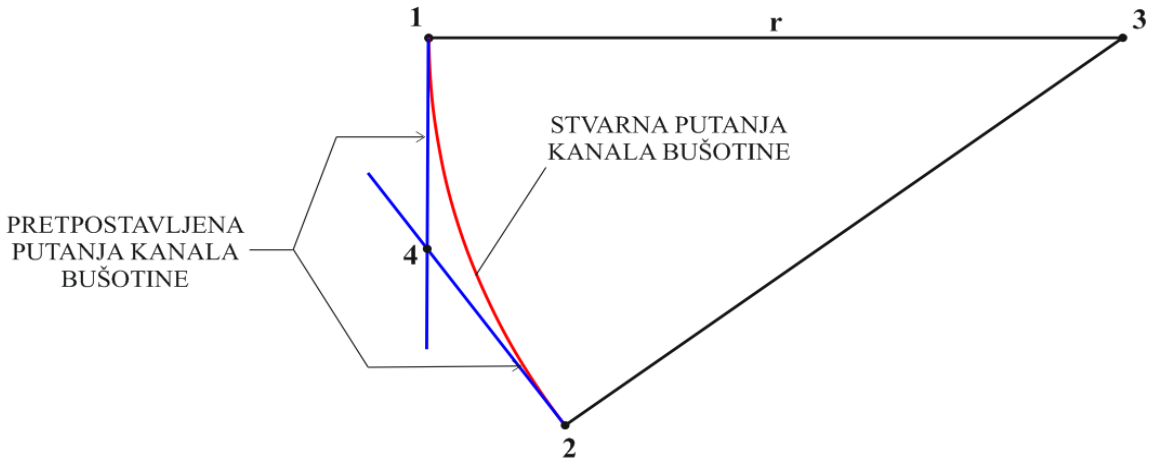


Slika 5-3. Metoda tangente (Carden i Grace, 2007)

Na slici 5-3 kružni luk $\widehat{12}$ (crvena linija) predstavlja stvarnu putanju kanala bušotine, dok dužina $\overline{1'2}$ (plava linija) predstavlja pretpostavljenu putanju kanala bušotine. Iz slike 5-3 vidljivo je da ukoliko se u nižoj točki putanje postavi tangenta na putanju kanala bušotine, odnosno okomito na dužinu $\overline{23}$ kut u točki 1' postaje jednak kutu otklona kanala bušotine u nižoj točki mjerenja (I_2). Dužina $\overline{1'4}$ (narančasta isprekidana linija) predstavlja vertikalni pomak kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, dok dužina $\overline{42}$ (zelena isprekidana linija) predstavlja pomak kanala bušotine u horizontalnom smjeru. Suprotno tome je kad se kut otklona smanjuje. Kod metode tangente udaljenost između točaka mjerenja utječe na veličinu pogreške, osim u slučajevima kada su intervali mjerenja 3 m ili manje, pri čemu nastaje prihvatljivija pogreška. Kod ove metode koordinate koje točno definiraju položaj kanala bušotine (dlijeta) tijekom bušenja u odnosu na sjever određuju se na temelju pretpostavke da se smjer pružanja horizontalnog pomaka kanala bušotine između dviju mjerenih točaka poklapa s azimutom bušotine u nižoj točki mjerenja. Međutim ova pretpostavka je pogrešna, zato što će putanja ovisiti o podacima dobivenim u gornjoj i donjoj točki mjerenja. Dakle, metoda tangente rezultira dodatnom pogreškom, zato što pogreška svakako već postoji zbog načina na koji se računa položaj i duljina putanje između dviju točaka mjerenja.

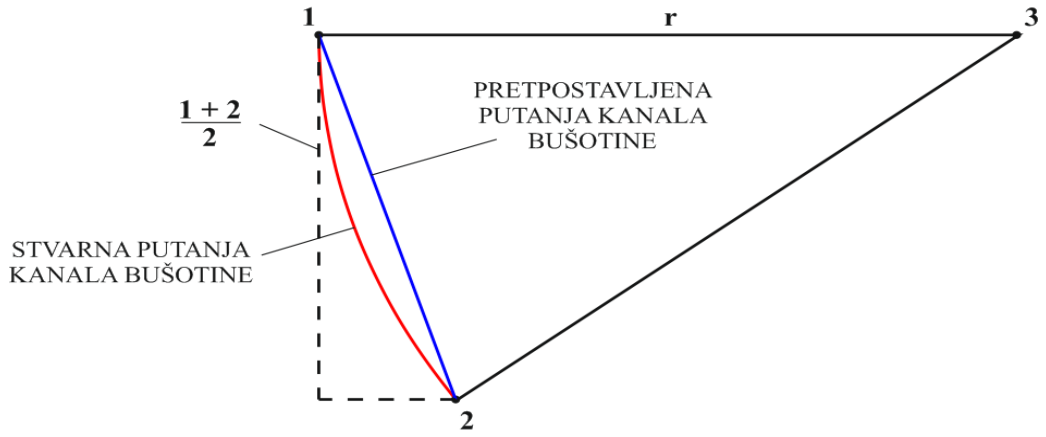
Metoda uravnotežene tangente uzima u obzir prilikom proračuna mjerene kutove otklona i azimute izmjerene u dvije točke mjerenja. Prema ovoj metodi pretpostavljena putanja kanala bušotine definirana je tangentama na krivulju koja predstavlja stvarnu putanju kanala bušotine, odnosno kružni luk $\widehat{12}$ (crvena linija) između točaka mjerenja. Kako se

spomenute tangente (plave linija) sijeku u točki 4, pretpostavljena putanja kanala bušotine je sastavljena od dva istovjetna dijela dužine $\overline{14}$ i $\overline{42}$ pri čemu je $|14| = |42|$ (slika 5-4).



Slika 5-4. Metoda uravnotežene tangente (Carden i Grace, 2007)

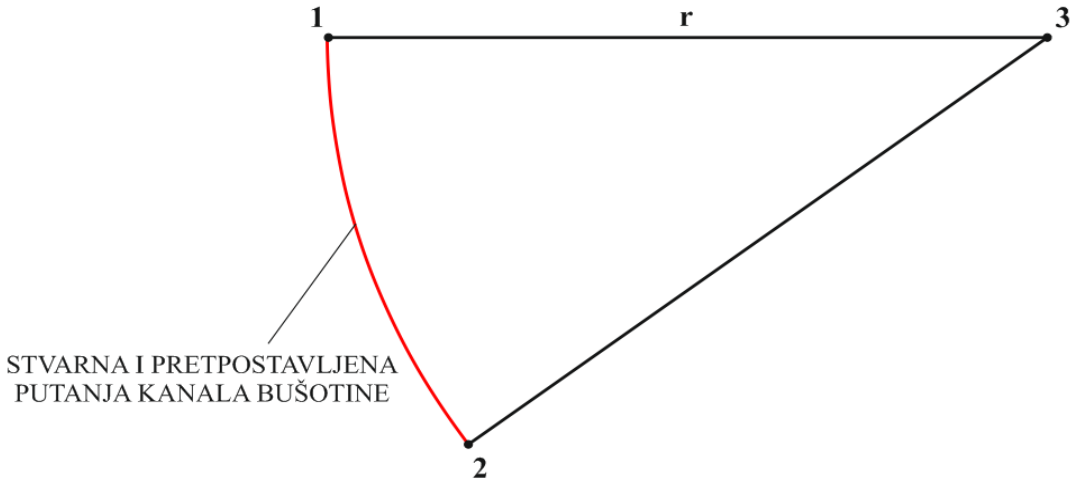
Metoda srednjeg kuta podrazumijeva korištenje srednjeg kuta otklona i azimuta dobivenih na temelju izmjerenog kuta otklona u gornjoj i donjoj točki mjerenja. Kod metode srednjeg kuta pretpostavljena putanja kanala bušotine je tangenta na srednji kut otklona i azimut, odnosno pojednostavljeno predstavlja tetivu između dvije točke mjerenja (plava linija) (slika 5-5).



Slika 5-5. Metoda srednjeg kuta (Carden i Grace, 2007)

Proračuni su vrlo slični onima koji se koriste kod metode tangente, dok su rezultati točnošću približno jednaki onima dobivenim metodom uravnotežene tangente. Pogreška proračuna će biti mala i kanal bušotine će biti unutar planiranih granica, ali pod uvjetom da udaljenost između točaka mjerenja nije prevelika. Također, potrebno je napomenuti da ova metoda nije primjenjiva kod bušotina s malim kutovima otklona i velikim promjenama azimuta.

Metoda polumjera zakrivljenja trenutno se smatra jednom od najtočnijih metoda. Metoda pretpostavlja da je putanja bušotine (između točaka mjerenja) glatka krivulja između gornje i donje mjerene točke. Zakrivljenost luka određena je mjerenim kutom otklona i azimutom na gornjoj i donjoj točki mjerenja. Duljina luka između točaka 1 i 2 predstavlja razliku između duljine kanala bušotine u točkama 1 i 2 (slika 5-6). Zakrivljenost putanje kanala bušotine koja je dobivena na temelju polumjera zakrivljenja (r) bit će približno jednaka stvarnoj zakrivljenosti putanje. Nažalost, jednadžbe su komplicirane i nije ih jednostavno izračunati na terenu bez kalkulatora ili računala.

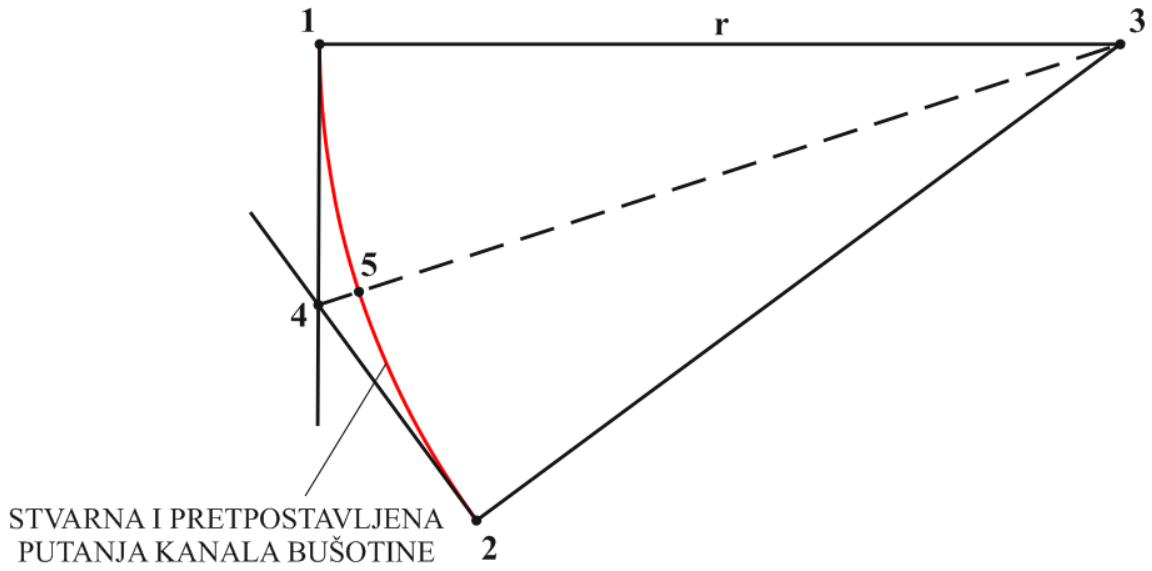


Slika 5-6. Metoda polumjera zakrivljenja (Carden i Grace, 2007)

Detaljnija analiza jednadžbi koje se koriste kod metode polumjera zakrivljenja pokazuje da ukoliko je kut otklona ili azimut jednak za obje točke mjerenja, nazivnik jednadžbe će postati nula, pa samim time jednadžbe više nisu funkcionalne, odnosno dobivene vrijednosti postaju beskonačne. U tom slučaju, za proračun putanje kanala bušotine mogu biti korištene metoda minimalne zakrivljenosti ili metoda srednjeg kuta. Problem se

može izbjeći dodavanjem male vrijednosti (kao što je 1 x 10^{-4}) podacima u jednoj ili drugoj točki mjerenja, a nastala greška bit će zanemariva.

Metoda minimalne zakrivljenost slična je metodi polumjera zakrivljenja, te također pretpostavlja da je kanal bušotine krivulja, odnosno kružni luk (crvena linija) između dviju točaka mjerenja. Proračun kod ove metode provodi se pomoću istih jednadžbi kao i kod metode uravnotežene tangente koje su pomnožene faktorom omjera. Faktor omjera definiran je zakrivljenošću kanala bušotine. Stoga metoda minimalne zakrivljenosti omogućava preciznije određivanje položaja kanala bušotine. Kao i kod metode polumjera zakrivljenja, jednadžbe su kompliciranije i nije ih lako izračunati na terenu bez pomoći kalkulatora ili računala. Metoda minimalne zakrivljenosti prikazana je na slici 5-7. Izračun metode uravnotežene tangente pretpostavlja da se putanja zakrivljene dionice poklapa s tangentama na točkama mjerenja, odnosno s dužinama $\overline{14}$ i $\overline{42}$. Faktor omjera korigira dužine $\overline{14} + \overline{42}$ u kružni luk definiran kutom $\measuredangle 132$. To je matematički ekvivalentno polumjeru zakrivljenja samo za promjenu kuta otklona.



Slika 5-7. Metoda minimalne zakrivljenosti (Carden i Grace, 2007)

Jednadžbe koje se koriste kod opisanih metoda za proračun putanje zakrivljenih dionica kanala bušotine navedene su u tablici 5-1.

Tablica 5-1. Jednadžbe kod metoda za proračun zakrivljenih dionica (Gabolde i Nguyen, 1999; Carden i Grace, 2007; Schlumberger – Anadrill, 1997)

Metoda tangente

$$\Delta TVD = \Delta MD \cdot \cos I_2 \quad (5\text{-}17)$$

$$\Delta HD = \Delta MD \cdot \sin I_2 \quad (5\text{-}18)$$

$$\Delta Sjever = \Delta MD \cdot \sin I_2 \cdot \cos A_2 \quad (5\text{-}19)$$

$$\Delta Istok = \Delta MD \cdot \sin I_2 \cdot \sin A_2 \quad (5\text{-}20)$$

Metoda uravnotežene tangente

$$\Delta TVD = \frac{\Delta MD}{2} \cdot (\cos I_1 + \cos I_2) \quad (5\text{-}21)$$

$$\Delta HD = \frac{\Delta MD}{2} \cdot \sin I_1 + \frac{\Delta MD}{2} \cdot \sin I_2 \quad (5\text{-}22)$$

$$\Delta Sjever = \frac{\Delta MD}{2} [(\sin I_1 \cdot \cos A_1) + (\sin I_2 \cdot \cos A_2)] \quad (5\text{-}23)$$

$$\Delta Istok = \frac{\Delta MD}{2} [(\sin I_1 \cdot \sin A_1) + (\sin I_2 \cdot \sin A_2)] \quad (5\text{-}24)$$

Metoda srednjeg kuta

$$\Delta TVD = \Delta MD \cdot \cos\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right) \quad (5\text{-}25)$$

$$\Delta HD = \Delta MD \cdot \sin\frac{I_1 + I_2}{2} \quad (5\text{-}26)$$

$$\Delta Sjever = \Delta MD \cdot \sin\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) \quad (5\text{-}27)$$

$$\Delta Istok = \Delta MD \cdot \sin\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) \quad (5\text{-}28)$$

Metoda polumjera zakrivljenja

$$\Delta TVD = \frac{180 \cdot \Delta MD \cdot (\sin I_2 - \sin I_1)}{\pi \cdot (I_2 - I_1)} \quad (5\text{-}29)$$

$$\Delta HD = \frac{180\ (\Delta MD)\ \cdot\ (cos\ I_1 - cos\ I_2)}{\pi\ \cdot\ (I_2 - I_1)} \quad (5\text{-}30)$$

$$\Delta Sjever = \frac{(180)^2\ \cdot\ (\Delta MD)\ \cdot\ (cos\ I_1 - cos\ I_2)\ \cdot\ (sin\ A_2 - sin\ A_1)}{\pi^2\ \cdot\ (I_2 - I_1)\ \cdot\ (A_2 - A_1)} \quad (5\text{-}31)$$

$$\Delta Istok = \frac{(180)^2\ \cdot\ (\Delta MD)\ \cdot\ (cos\ I_1 - cos\ I_2)\ \cdot\ (cos\ A_1 - cos\ A_2)}{\pi^2\ \cdot\ (I_2 - I_1)\ \cdot\ (A_2 - A_1)} \quad (5\text{-}32)$$

$$r = \frac{180\ \cdot\ \Delta MD}{\pi\ (I_2 - I_1)} \quad (5\text{-}33)$$

Metoda minimalne zakrivljenosti

$$DLS = \cos^{-1}[\cos(I_2 - I_1) - \sin I_1\ \cdot\ \sin I_2\ \cdot\ (1 - \cos(A_2 - A_1))] \quad (5\text{-}34)$$

$$RF = \frac{360}{DLS\ \cdot\ \pi}\ \cdot\ \tan\frac{DLS}{2} \quad (5\text{-}35)$$

$$RF = \frac{360}{DLS\ \cdot\ \pi}\ \cdot\ \frac{1 - \cos DLS}{\sin DLS} \quad (5\text{-}36)$$

$$\Delta TVD = \frac{\Delta MD}{2}\ \cdot\ (\cos I_1 + \cos I_2)\ \cdot RF \quad (5\text{-}37)$$

$$\Delta HD = \frac{\Delta MD}{2}\ \cdot\ (\sin I_1 + \sin I_2)\ \cdot RF \quad (5\text{-}38)$$

$$\Delta Sjever = \frac{\Delta MD}{2}\ \cdot\ (\sin I_1\ \cdot\ \cos A_1 + \sin I_2\ \cdot\ \cos A_2)\ \cdot RF \quad (5\text{-}39)$$

$$\Delta Istok = \frac{\Delta MD}{2}\ \cdot\ (\sin I_1\ \cdot\ \sin A_1 + \sin I_2\ \cdot\ \sin A_2)\ \cdot RF \quad (5\text{-}40)$$

U navedenim jednadžbama korištene su sljedeće oznake:

A_1 – azimut kanala bušotine u gornjoj točki mjerenja, °

A_2 – azimut kanala bušotine u donjoj točki mjerenja, °

DLS (engl. *Dogleg severity*) – intenzitet povećanja kuta otklona na određenoj duljini kanala bušotine, °/30 m

I_1 – kut otklona kanala bušotine u gornjoj točki mjerenja, °

I_2 – kut otklona kanala bušotine u donjoj točki mjerenja, °

r – polumjer zakrivljenosti kanala bušotine, m

RF – faktor omjera

ΔHD – horizontalni pomak (doseg) kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, m

$\Delta Istok$ – položaj koordinata kanala bušotine u odnosu na sjever između dviju točaka mjerenja, m

ΔMD – stvarna duljina kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, m

ΔTVD – stvarna vertikalna dubina kanala bušotine između dviju točaka mjerenja, m

$\Delta Sjever$ – položaj koordinata kanala bušotine u odnosu na sjever između dviju točaka mjerenja, m

5.3. Položaj dna bušotine i smjer u odnosu na ušće

Udaljenost između dna bušotine (zadnje točke mjerenja) i projekcije ušća bušotine u horizontalnu ravninu položenu kroz zadnju točku mjerenja predstavlja pravac i najkraća je udaljenost između te dvije točke (engl. *Closure Distance - CD*) (slika 5-8).

Osim definiranja najkraće udaljenosti između ovih dviju točaka potrebno je definirati i azimut. Bez definiranja azimuta, dno kanala bušotine u horizontalnoj ravnini moglo bi biti bilo gdje duž opsega kruga s radijusom kruga koji je jednak spomenutoj udaljenosti između projekcije ušća i dna bušotine. Azimut (A_{CD}) i udaljenost (L_{CD}) između projekcije ušća u horizontalnoj ravnini položenoj kroz dno bušotine i samog dna bušotine točno određuju gdje se dno bušotine nalazi u odnosu na ušće bušotine, odnosno spomenute vrijednosti su ujedno i polarne koordinate dna kanala bušotine. Izračunavaju se pomoću sljedećih jednadžbi ukoliko se pretpostavi da su pravokutne koordinate sjever i istok ušća bušotine jednake 0 (Carden i Grace, 2007):

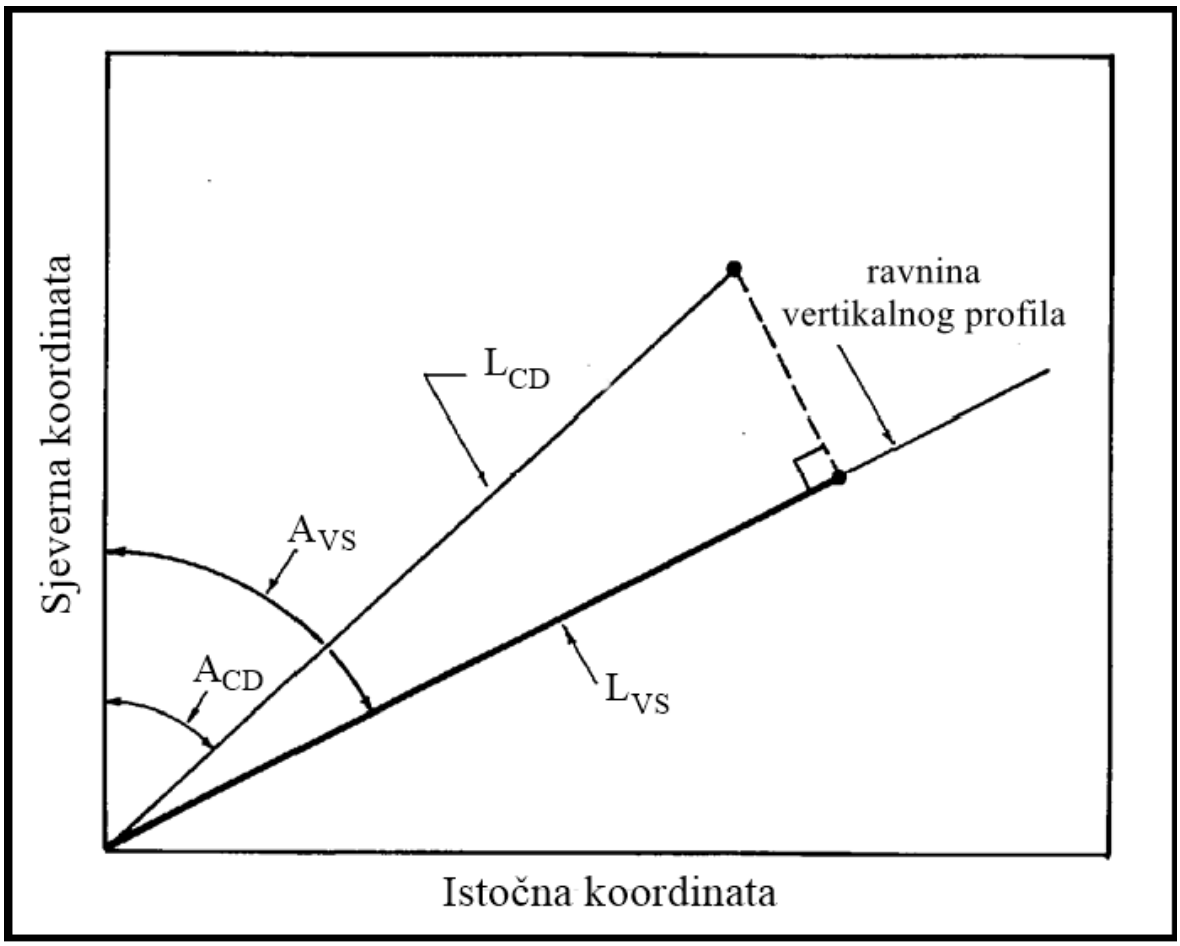
$$A_{CD} = \tan^{-1} \frac{istočna\ koordinata\ dna\ bušotine}{sjeverna\ koordinata\ dna\ bušotine} \tag{5-41}$$

$$L_{CD} = \sqrt{(sjeverna\ koordinata\ dna\ bušotine)^2 + (istočna\ koordinata\ dna\ bušotine)^2} \tag{5-42}$$

gdje je:

L_{CD} – najmanja udaljenost između projekcije ušća u horizontalnoj ravnini položenoj kroz dno bušotine i samog dna bušotine u trenutku bušenja, m

Ukoliko koordinate ušća bušotine nisu jednake 0, onda se i one moraju uzeti u obzir, a jednadžbe su jednake onima koje se koriste za izračunavanje kuta i hipotenuze pravokutnog trokuta.



Slika 5-8. Grafički prikazu razlike između najmanje udaljenosti posljednje točke mjerenja i vertikalne projekcije ušća te vertikalnog presjeka (Carden i Grace, 2007)

5.4. Vertikalni profil putanje kanala bušotine

Vertikalni profil putanje kanala bušotine dobiva se horizontalnom projekcijom svih točaka mjerenja u vertikalnu ravninu koja je položena kroz ušće bušotine i zadnju točku mjerenja. Slika 5-8 grafički prikazuje razliku L_{VD} i L_{CD} kao i azimuta A_{VS} i A_{CD}.

Azimut vertikalnog profila obično se odabire kao azimut od ušća do središta ciljane točke unutar ležišta. Ako je definirano više ciljeva, odnosno točaka koje kanal bušotine mora dosegnuti, onda su potrebne promjene u azimutu da bi se dosegnula svaka ciljana točka projektirane putanje te se azimut vertikalnog profila obično odabire kao azimut od ušća do kraja (dna) bušotine. Jednadžbe za izračun udaljenosti točke mjerenja projicirane su u vertikalnu ravninu od ušća bušotine i koristi se izraz 5-43 (Carden i Grace, 2007):

$$L_{VS} = \cos(A_{VS} - A_{CD}) \cdot L_{CD} \tag{5-43}$$

gdje su:

L_{VS}– vertikalni profil, m

A_{VS} – azimut vertikalnog profila, º

A_{CD} – azimut položaja dna bušotine i smjera u odnosu na ušće bušotine, º

5.5. Intenzitet povećanja kuta otklona i/ili azimuta kanala bušotine

Intenzitet povećanja kuta otklona (engl. *Dogleg Severity* - *DLS*) je mjera promjene kuta otklona i/ili azimuta bušotine na jediničnoj duljini kanala bušotine. Obično je izražen u stupnjevima po 30 m duljine kanala bušotine. Moguće ga je izračunati pomoću jedne od sljedeće tri jednadžbe (Carden i Grace, 2007):

$$DLS = \left(\frac{\Delta MD\ *}{\Delta MD}\right) \cdot \cos^{-1}\{(\sin I_1 \cdot \sin I_2) \cdot [(\sin A_1 \cdot \sin A_2) + (\cos A_1 \cdot \cos A_2)] + (\cos I_1 \cdot \cos I_2)\} \tag{5-44}$$

$$DLS = \frac{2 \cdot \Delta MD *}{\Delta MD} \cdot \sin^{-1} \sqrt{(\sin I_1) \cdot (\sin I_2) \cdot \left[\sin\left(\frac{A_2 - A_1}{2}\right)\right]^2 + \left[\sin\left(\frac{I_2 - I_1}{2}\right)\right]^2}$$

(5-45)

$$DLS = \frac{\Delta MD *}{\Delta MD} \cdot \sqrt{(I_2 - I_1)^2 + \left[\sin\left(\frac{I_2 + I_1}{2}\right) \cdot (A_2 - A_1)\right]^2}$$

(5-46)

gdje su:

ΔMD – duljina kanala bušotine po kojoj se vrši mjerenje kuta otklona i azimuta, m

*ΔMD** – duljina kanala bušotine po kojoj se želi iskazati promjena kuta otklona, m

Iako je moguće koristiti sve tri jednadžbe, prve dvije su složenije i veća je mogućnost pogreške prilikom računanja, dok je treća jednadžba jednostavnija, ali i manje precizna kod kuta otklona manjeg od 5º.

6. PRIMJER PROJEKTIRANJA PUTANJE HORIZONTALNE BUŠOTINE

U nastavku rada opisan je primjer projektiranja putanje horizontalne bušotine kao i sam način izrade. Izradom ove bušotine nastojalo se povećati efektivnu propusnost ležišta i smanjiti pad tlaka u ležištu bez povećanja plinskog faktora (engl. G*as-Oil Ratio – GOR*) budući da je tlak bušotine blizu tlaka zasićenja, a sve s ciljem ostvarivanja dnevnog pridobivanja nafte od 794,94 m^3 (5000 bbl). Stvarna uspravna dubina planirane bušotine je 2729 m, a duljina horizontalne sekcije 500 m. Konstrukcija bušotine uključivala je ugradnju 3 kolone zaštitnih cijevi: površinske (uvodne) kolone zaštitnih cijevi (engl. s*urface casing*) promjera 0,3397 m (13 ⅜ "), tehničke kolone zaštitnih cijevi (engl. *intermediate casing*) promjera 9,625 m (9 ⅝ ") i proizvodne kolone zaštitnih cijevi (engl. *production casing*) promjera 0,1778 (7 "). Tijekom bušenja očekivani su različiti problemi kao što su niski slojni tlak, veliki gubitci isplake, diferencijalni prihvat, pojava glinenih "prstenova", poteškoće pri održavanju vertikalnosti kanala bušotine, nestabilnost kanala bušotine i otežano čišćenje kanala bušotine.

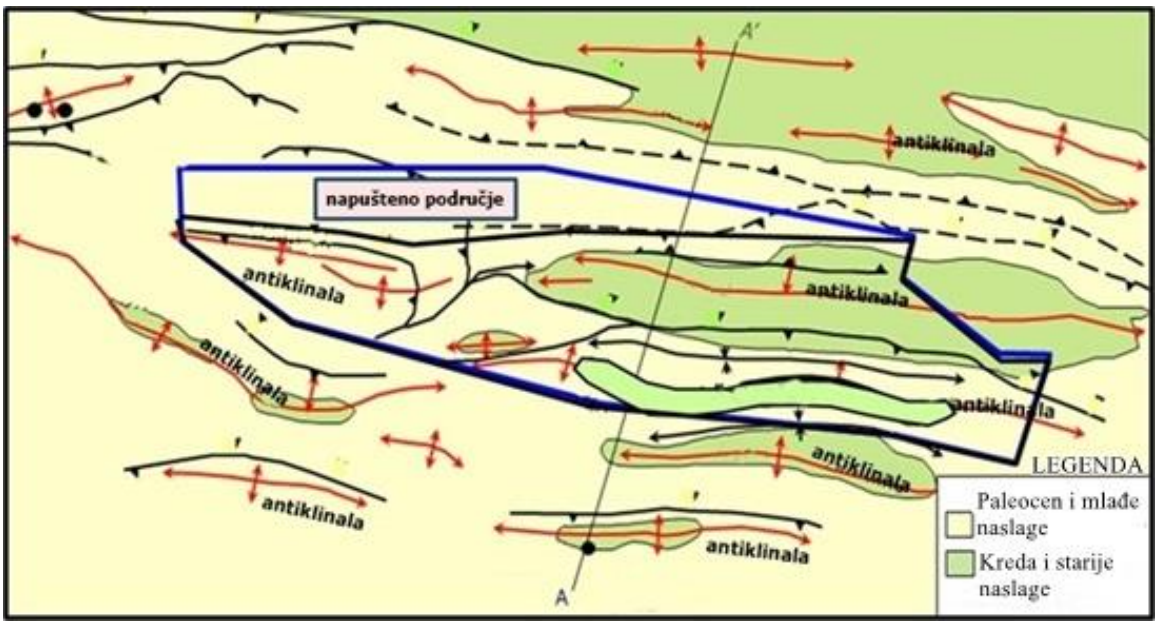
U radu je opisan način na koji je bušotina projektirana te izvedena, kao i oprema koja je korištena za njenu izradu s posebnim naglaskom na usporedbu projektirane putanje te stvarne putanje kanala bušotine.

Lokacije nove bušotine označena je brojem 3 na slici 6-1, dok su dvije već izrađene susjedne bušotine označene brojevima 1 i 2.



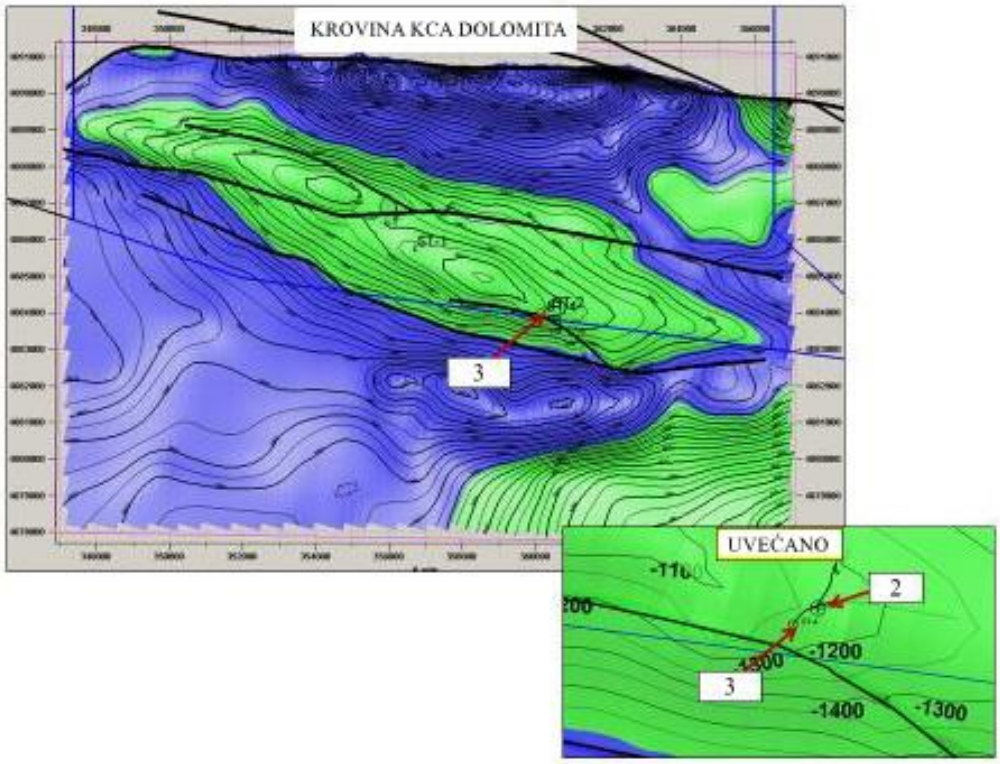
Slika 6-1. Lokacija planirane bušotine (3) i dvije susjedne bušotine (1 i 2) (HKN Energy, 2015)

Tektonski odnosi na širem području izrade planirane nove horizontalne bušotine prikazani su na slici 6-2. Na slici su istaknute 4 glavne antiklinale (označene zelenom bojom) koje obuhvaćaju područje veće od 100 km^2.

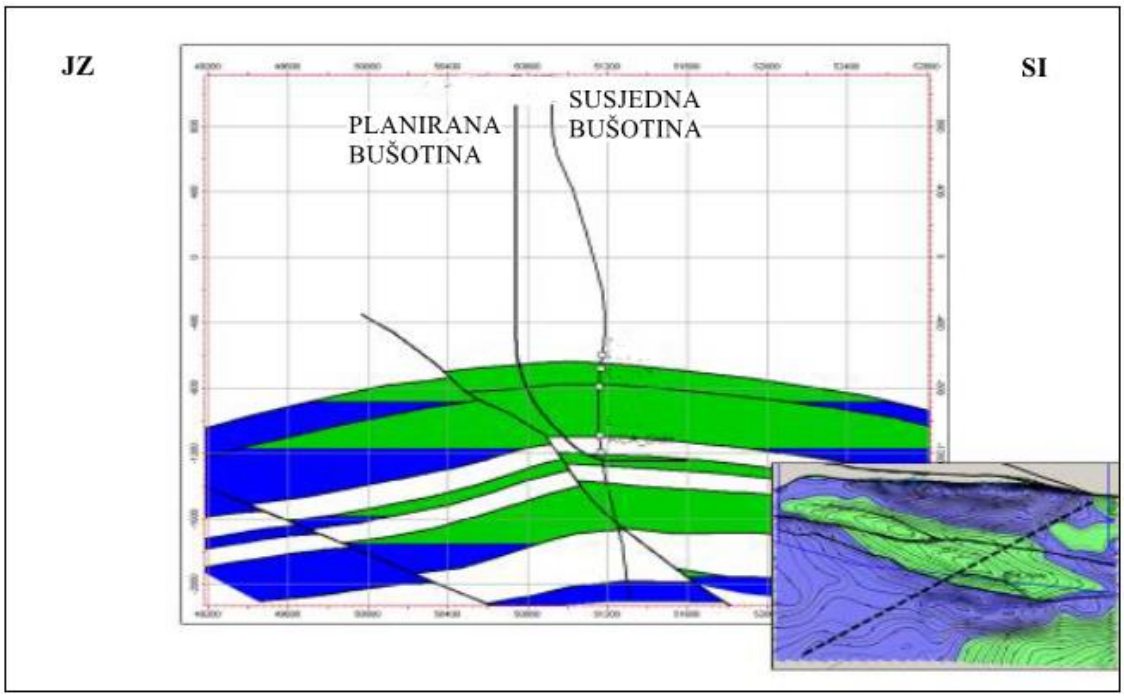


Slika 6-2. Karta tektonskih odnosa na području izrade planirane horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

Geološka struktura u kojoj je planirana izrada bušotine je antiklinala (slika 6-3) prosječne duljine oko 17 km s orijentacijom sjeverozapad – jugoistok i širine oko 4 km. Budući da se u blizini nalazi već prije izrađena bušotina potrebno je prilikom planiranja uzeti i to u obzir, a podaci o ovoj bušotini mogu pomoći prilikom izrade nove horizontalne bušotine. Putanje planirane nove horizontalne bušotine (3) i već postojeće susjedne usmjerene bušotine (2) koja je najbliža planiranoj novoj horizontalnoj bušotini prikazane su na slici 6-4.



Slika 6-3. Geološka struktura u kojoj je planirana izrada nove horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)



Slika 6-4. Putanja planirane horizontalne bušotine i putanja već postojeće usmjerene susjedne bušotine (HKN Energy, 2015)

Prije planiranja same putanje horizontalne bušotine i definiranja programa bušenja uzeti su podaci i izvještaji s bušenja s tri susjedne bušotine, odnosno ranije spomenute bušotine 1 i 2 te jedne dodatne bušotine kako bi se preventivno djelovalo na pojavu različitih problema koji su uočeni kod njihove izrade. Na navedenim bušotinama uočeni su problemi kao što su pojava H_2S, gubljenje isplake, nestabilnost kanala bušotine te otežano čišćenje kanala bušotine.

Prilikom bušenja susjednih bušotina uočena je pojava sumporovodika (H_2S) koji se pojavljuje u različitim udjelima diljem karbonatnih ležišta u ovoj regiji te je u susjednoj bušotini 2 zabilježen udio H_2S od 12%. Uočeno je i gubljenje isplake što je posljedica postojanja prirodno frakturiranih ležišta i niskog nivoa vodnog lica, a potencijalne nove gubitke isplake i na ovoj bušotini moguće je očekivati u svim formacijama osim šejlu i evaporitima. Također, geološki profil na ovom području znatno utječe na gubitke isplake budući da se oni mogu direktno i indirektno povezati s brojnim karbonatnim formacijama te brojnim geološkim anomalijama koje se protežu od površine od gornjih naslaga trijasa.

Najveći problem kod izrade bušotina u ovom području predstavlja nestabilnost kanala bušotine. Paleogenske naslage (formacija Gercus) glinjaka pokazuju veliku tendenciju bubrenju. Iako se predviđa da paleogenske naslage (formacija Kolosh, Khurmala) nemaju nikakav utjecaj na stabilnost kanala bušotine, ponekad i one mogu biti problematične. Formacija Garagu sadrži visok udio torija te pokazuje tendenciju bubrenja/flokulacije nakon kontakta s vodom. Upravo ova formacija je najčešći glinjak u litološkom sastavu, a zbog nje je prisutan visok rizik od bubrenja i urušavanja stijenki kanala bušotine. Naslage donje krede (formacija Chia Gara koja sadrži visoku razinu urana) i gornje Jure (Barsarin) smatraju se relativno stabilnim. Nestabilnost kanala bušotine očekivana je u formaciji Baluti ovisno vremenu u kojemu je kanal bušotine otvoren i izložen djelovanju isplake. Stoga je posebna pažnja posvećena postizanju stabilnosti kanala bušotine, odnosno pravovremenoj ugradnji i cementaciji niza zaštitnih cijevi.

U tablici 6-1 navedene su koordinate karakterističnih projektiranih točaka kanala bušotine i njihova stvarna uspravna dubina umanjena za nadmorsku visinu podišta tornja (engl. *True Vertical Depth SubSea - TVDSS*). Prikazane su tri ključne točke putanje kanala bušotine: ulazak u ležište (krovinu), ulazak u horizontalnu dionicu i zadnja točka horizontalne dionice, odnosno dno kanala bušotine. Koordinate ušća bušotine su 360246,7 i 4084042,6.

Tablica 6-1. Projektirane točke kroz koje bi trebao proći kanal bušotine (HKN Energy, 2015)

	dubina (m TVDSS)	X	Y
krovina Kurra Chine "A" dolomita	-1165,47	360470,9	4084182
točka u KCA dolomitu gdje usmjereni dio kanala prvi put doseže 90º (engl. *landing point*)	-1245	360742	4084171
stvarno dno kanala bušotine	-1245	361235	4084089

U tablici 6-2 prikazan sažetak planirane putanje bušotine, a na slikama 6-5 i 6-6 prikazani su horizontalna projekcija i vertikalni profil kanala planirane horizontalne bušotine. Na slikama su korištene sljedeće oznake:

EOC (engl. *End Of Curve*) – točka u kojoj je postignut željeni kuta otklona

KOP (engl. *Kick Off Point*) – točka skretanja kanala bušotine odnosno povećanja kuta otklona ili azimuta

MD (engl. *Measured Depth*) – mjerena duljina kanala bušotine

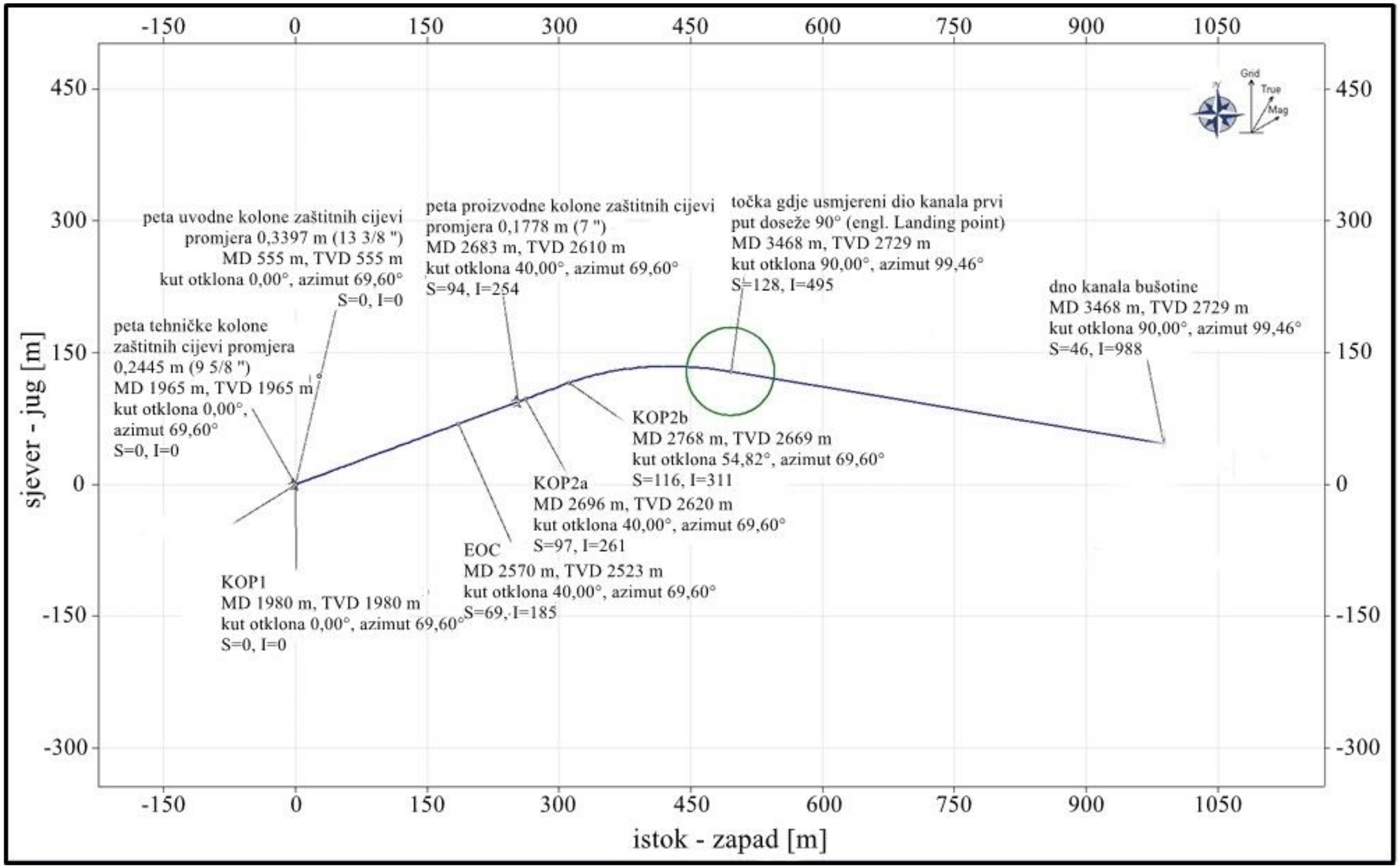
TVD (engl. *True Vertical Depth*) – stvarna uspravna dubina kanala bušotine

Na horizontalnoj projekciji planirane bušotine prikazane su dvije točka skretanja kanala bušotine KOP2, odnosno KOP2a i KOP2b koje na vertikalnom profilu kanala bušotine nisu vidljive. Te dvije točke su zapravo jedna točka skretanja kanala bušotine koja je prikazana kao dvije zbog promjene kuta otklona i azimuta. Planirani intenzitet povećanja kuta otklona (DLS) u ovoj zakrivljenoj dionici iznosi 6,74 º/30 m, te je prvobitno planirano povećanje kuta otklona uz zadržavanje istog azimuta (u duljini od 72 m), a zatim je planirano korigiranje i kuta otklona i azimuta sukladno planiranom položaju horizontalne dionice kanala bušotine.

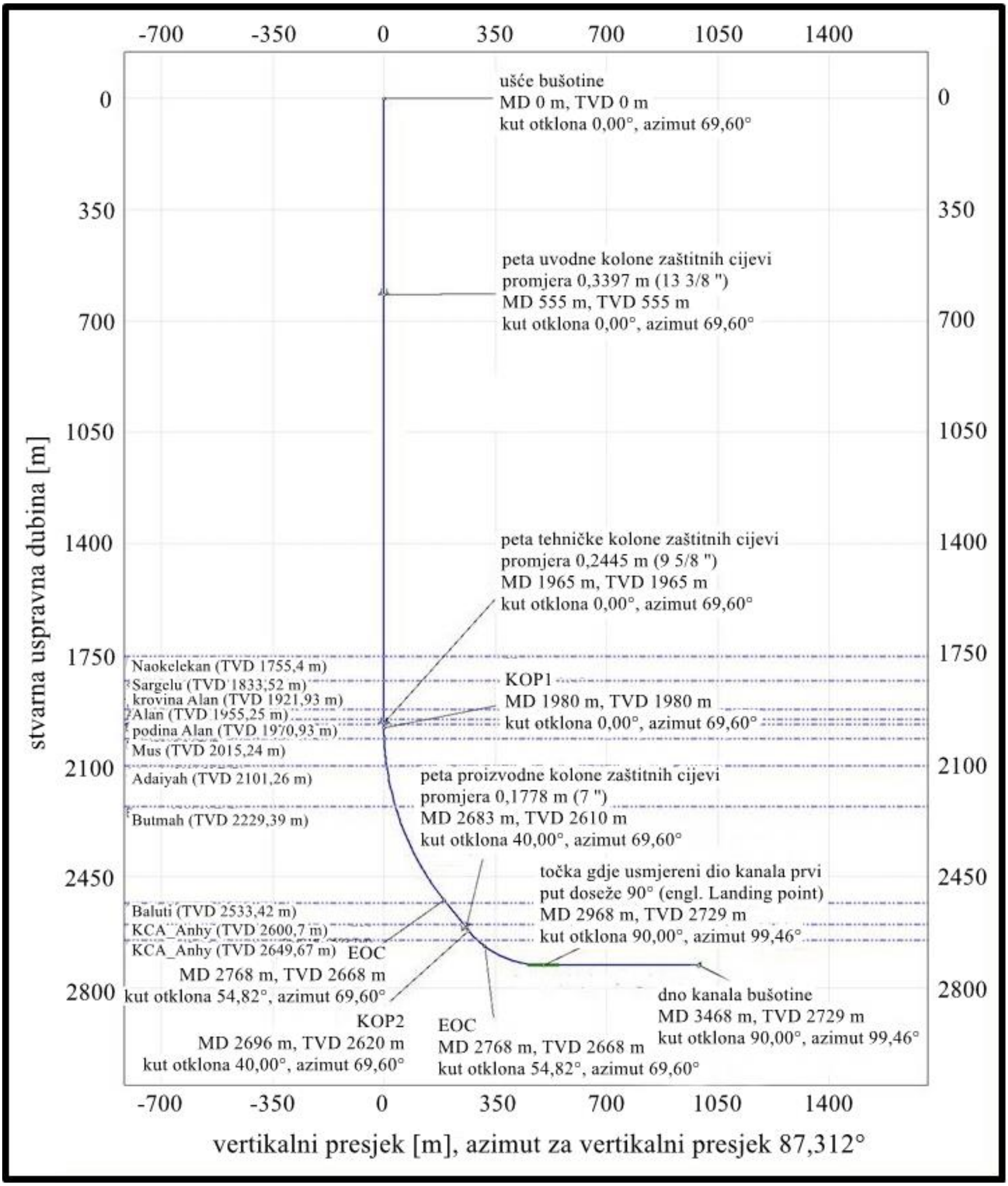
Tablica 6-2. Sažetak planirane putanje bušotine (HKN Energy, 2015)

mjerena duljina – MD (m)	kut otklona (º)	azimut (º)	stvarna uspravna dubina – TVD (m)	vertikalni profil – L_{VS} (m)	sjeverna koordinata (m)	istočna koordinata (m)	povećanje kuta otklona – DLS (º / 30 m)
0,00	0,00	69,60	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A
1980,20	0,00	69,60	1980,20	0,00	0,00	0,00	0,00
2569,74	40,00	69,60	2523,00	188,20	68,86	185,17	2,04
2696,36	40,00	69,60	2620,00	265,73	97,24	261,46	0,00
2967,90	90,00	99,43	2729,20	128,42	128,42	495,38	6,74
3450,00	90,00	99,46	2729,20	49,33	49,33	970,94	0,00
3467,76	90,00	99,46	2729,20	46,41	46,41	988,46	0,00

Ishodište koordinatnog sustava planirane horizontalne bušotine položeno je u koordinate ušća bušotine. Iz planiranog povećanja kuta otklona bušotine prikazanog u tablici 6-2 vidljivo je da je planirano da horizontalna bušotina bude izrađena kao bušotina sa srednjim polumjerom zakrivljenja. Tome u prilog govori i to da je planirana horizontalna sekcija duljine 500 m, a obzirom na to i na intenzitet povećanja kuta otklona vidljivo je da se radi o tipskoj bušotini sa srednjim polumjerom zakrivljenja kakva je prikazana na slici 2-2.



Slika 6-5. Horizontalna projekcija planirane bušotine (HKN Energy, 2015)



Slika 6-6. Vertikalni profil kanala planirane bušotine (HKN Energy, 2015)

U tablici 6-3 prikazana je konstrukcija planirane bušotine, odnosno dubina ugradnje i karakteristike konduktora, površinske (uvodne) kolone zaštitnih cijevi, tehničke kolone zaštitnih cijevi i proizvodne kolone zaštitnih cijevi. U tablici 6-4 prikazane su dubinske alatke koje se planiralo koristiti za obavljanje mjerenja u kanalu bušotine te interval mjerenja.

Tablica 6-3. Konstrukcija planirane horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

kolona zaštitnih cijevi	projekti-rana dubina ugradnje (m)	Promjer dlijeta za izradu kanala bušotine, m (in)	promjer kolone zaštitnih cijevi, m (in)	jedinična težina, N/m (lb/ft)	kvaliteta čelika	tip navoja	tlak gnječenja MPa (psi)	tlak rasprska-vanja MPa(psi)
konduktor	44	0,9144 (36)	0,762 (30)	265,87 (196,1)	X-52	BTC	N/A	N/A
površinska (uvodna)	555	0,4445 (17 ½)	0,3397 (13 ⅜)	97,62 (72)	L-80	BTC	18,41 (2670)	37,09 (5380)
tehnička	1965	0,31115 (12 ¼)	0,2445 m (9 ⅝)	47 (63,72)	L-80	VAM TOP	32,82 (4760)	47,37 (6870)
proizvodna	2683	0,2159 (8 ½)	0,1778 (7)	39,32 (29)	L-80	VAM TOP	48,47 (7030)	56,26 (8160)

Tablica 6-4. Popis dubinske opreme za mjerenje tijekom izrade pojedinih dionica kanala bušotine i interval mjerenja (HKN Energy, 2015)

promjer bušotine, m (in)	tip dubinske opreme	interval mjerenja
0,4445 (17 ½)	MWD (Anderdrift)	30 m
0,31115 (12 ¼)	MWD	30 m
0,2159 (8 ½)	MWD	30 m
0,1524 (6)	MWD	30 m

Iz tablice je vidljivo da će se u svim fazama bušenja koristiti alatke za mjerenje tijekom bušenja zbog problema s održavanjem vertikalnosti uočenim na ranije izrađenim bušotinama.

U prilogu br. 1 prikazan je prognozni geološki profil, osnovni podaci o planiranim korištenim alatkama, isplaci te konstrukciji bušotine, cementaciji i kontroli tlaka.

6.1. Program bušenja

Planirana nova horizontalna bušotina započinje ugradnjom i cementacijom konduktora promjera 0,762 m (30 ") na dubini od 43 m kako bi se izoliralo nekonsolidirano površinsko tlo.

6.1.1. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ ")

Nakon ugradnje konduktora promjera 0,762 m (30 ") planirano je bušenje vertikalne dionice kanala bušotine dlijetom promjera 0,4445 m (17 ½ ") do dubine od približno 555 m kroz paleogenske naslage (formacije Pila Spi, Gercus, Khurmala i Kolosh) i naslage gornje krede (formacija Bekhme) te ugradnja površinske (uvodne) kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 ⅜ "). Sukladno iskustvima s ranije izrađenih bušotina, u ovoj sekciji su očekivani gubitci isplake, pojava glinenih "prstenova" te odstupanja od vertikalnosti kanala bušotine. Planirano je da ukoliko odstupanje od vertikale pređe prag od 3º, dubinski bušaći sklop (engl. *Bottom Hole Assembly - BHA*) bude izvađen kako bi se izvršila promjena BHA, odnosno uvođenje Schlumbergerovog Power Drive V Vortex sklopa koji služi za održavanje vertikalnosti.

Za bušenje ove dionice kanala bušotine planirana je upotreba trožrvanjskog dlijeta, a po potrebi i polikristalinsko dlijeto (engl. *Polycrystalline Diamond Compact bits – PDC bits*) u slučaju primjene spomenutog Power Drive V Vortex sklopa. Za izradu ove dionice planirani su sljedeći bušaći parametri (režim bušenja): opterećenje na dlijeto (engl. *Weight On Bit – WOB*) 44,48 – 311,38 kN (10 – 70 klbs), broj okretaja dlijeta 120 – 180 o/min i dobava sisaljki (engl. *flow rate*) 0,03785 – 0,06309 m^3/s (600 – 1000 gpm).

Tijekom bušenja koristit će se 3 - 5 % KCl polimerna isplaka s djelomično hidroliziranim poliakrilamidom (engl. *Partially Hydrolyzed Polyacrylamide – PHPA*) gustoće u rasponu od 1018,52 kg/m^3 (8,5 ppg) do 1138,35 kg/m^3 (8,7 ppg). KCl i PHPA su nužni kako bi se osiguralo inhibiranje ranije spomenutih stijena sklonih bubrenju.

6.1.2. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ '')

Potom je planirano bušenje također vertikalne dionice kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ '') kroz naslage gornje krede (formacija Bekhme), donje krede (formacije Quamchuqa, Sarmord, Garagu i Chia Gara) i gornje Jure (formacije Barsarin, Neokelekan i Sargelu) do dubine od 1965 m. U izrađeni kanal bušotine ugradila bi se tehnička kolona zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 ⅝ '').

Također, sukladno iskustvima s ranije izrađenih bušotina, u ovoj sekciji su očekivani veliki gubitci isplake koji mogu nastati zbog bušenja kroz različite geološke strukture, nestabilnost kanala bušotine, prisustvo H_2S-a koji se u ležištima ove regije nalazi prisutan u različitim udjelima te odstupanja od vertikalnosti kanala bušotine zbog čega je planirano korištenje Power Drive V Vortex sklopa.

Za bušenje ove dionice planirano je korištenje 2 - 4 % KCl polimerne isplake s PHPA gustoće u rasponu od 1018,52 kg/m^3 (8,5 ppg) do 1138,35 kg/m^3 (9,5 ppg). Planirano je korištenje PDC dlijeta. Planiran je sljedeći režim bušenja: opterećenje dlijeta 44,48 – 177,93 kN (10 – 40 klbs), broj okretaja dlijeta 60 – 80 o/min i dobava sisaljki 0,03785 –0,05047 m^3/s (600 – 800 gpm).

6.1.3. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ '')

Zatim bi slijedila izrada prve zakrivljene dionice kanala bušotine dlijetom promjera 0,2159 m (8 ½ ''), s točkom skretanja 15 m ispod pete tehničke kolone zaštitnih cijevi sve do postizanja kuta otklona od 40º. Bušenje je planirano kroz formacije Alan, Mus, Adaiyah i Butman do početka formacije Baluti, a zatim se zadržava kut otklona od 40º kroz formaciju Baluti do dubine od 2683 m. Planirano je povećanje kuta otklona za 2º na 30 m. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 0,1778 (7 '') ugradila bi se do dubine od 2683 m.

Bušenje ove sekcije je planirano PDC dlijetom s Power Drive V Vortex sklopom, a pritom bi se koristila 2 - 4 % KCl polimerna isplaka s PHPA gustoće u rasponu od 1018,52 kg/m^3 (8,5 ppg) do 1138,35 kg/m^3 (9,5 ppg). Planirani režim bušenja bio bi sljedeći:

opterećenje na dlijeto 22,24 – 177,93 kN (5 – 40 klbs), brzina bušenja 50 – 60 o/min i dobava sisaljki 0,03155 – 0,0347 m^3/s (500 – 550 gpm).

6.1.4. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,1524 m (6 '')

Bušenje se nastavlja dlijetom promjera 0,1524 m (6 "), uz skretanje kanala bušotine poslije pete kolone zaštitne cijevi promjera 0,1778 m (7 ") i povećavanje kuta otklona sve do 90º i azimuta 99,46º. Planirano povećanje kuta otklona u ovoj dionici je 6,7º na 30 m. Bušenje ove dionice planirano je PDC dlijetom promjera 0,15245 m (6 "), a potom bi se bušila horizontalna sekcija u duljini od 500 m koja završava otprilike 50 m ispod očekivane krovine KC-A dolomita na mjerenoj duljini kanala bušotine od 3468 m. Tijekom bušenja koristila bi se 2 - 4 % KCl polimerna isplaka gustoće u rasponu od 1042,49 kg/m^3 (8,7 ppg) do 1102,4 kg/m^3 (9,2 ppg). Planirani režim bušenja bio bi: opterećenje na dlijeto 35,59 – 177,93 kN (8-40 klbs), broj okretaja dlijeta 50 – 120 o/min i dobava sisaljki 0,01577 – 0,02208 m^3/s (250 – 350 gpm)

Budući da se radi o horizontalnom dijelu bušotine, u ovom dijelu je potrebno dobro čišćenje kanala bušotine kako bi se održala stabilnost kanala. Očekivane su vertikalne frakture, gubici isplake i sporija brzina bušenja (engl. *Rate Of Penetration – ROP*).

6.2. Izrađena bušotina

Putanja izrađene horizontalne bušotine razlikuje se od prvobitno planirane te su njena horizontalna projekcija i vertikalni presjek prikazani na slikama 6-7 i 6-8.

U prilogu 2 prikazani su podaci koji su dobiveni mjerenjem u kanalu bušotine tijekom bušenja kao i podaci o položaju kanala bušotine dobiveni metodom minimalne zakrivljenosti.

Na prilogu 3a prikazani su prognozni geološki profil, osnovni podaci o bušotini i putanji kanala bušotine te osnovni podaci o programu bušenja projektirane horizontalne bušotine, dok su na prilogu 3b sumarno prikazani rezultati izrade iste bušotine.

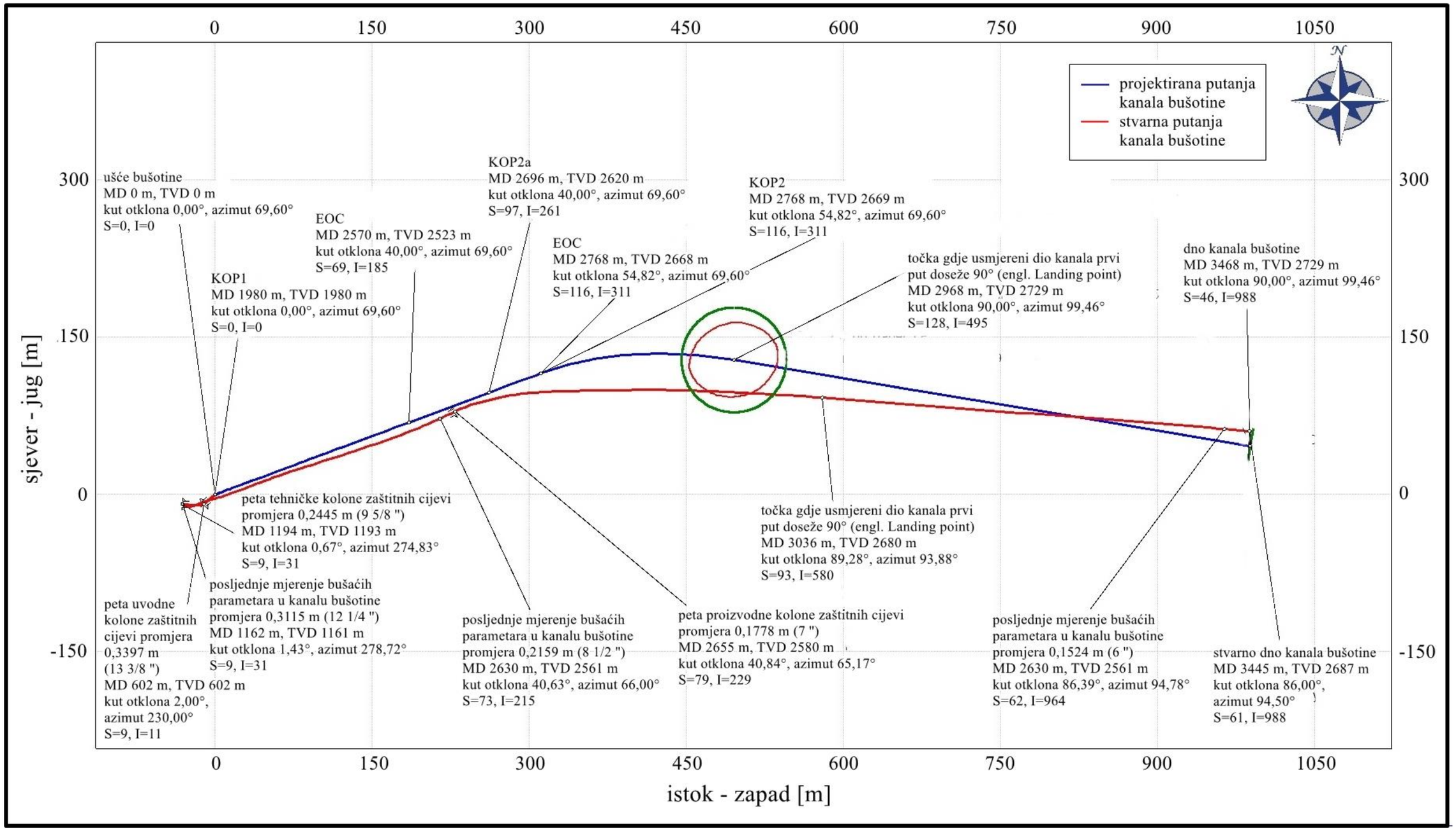
Tijekom bušenja bilo je potrebno korigirati geološki profil jer krovine pojedinih slojeva nisu bile na očekivanim dubinama. Zbog toga je došlo do odstupanja dubine ugradnje

pojedinih kolona zaštitnih cijevi te je sukladno tome došlo i do odstupanja putanje izrađene bušotine u odnosu na planiranu. Sve to je vidljivo iz tablice 6-5 gdje su prikazani podaci za pretpostavljene i stvarne dubine krovine formacija koje se bušilo i to kroz stvarnu uspravnu dubinu kanala bušotine (engl. *True Vertical Depth*) i mjerenu duljinu kanala bušotine (engl. *Measured Depth*) kod ulaska u svaku pojedinu formaciju.

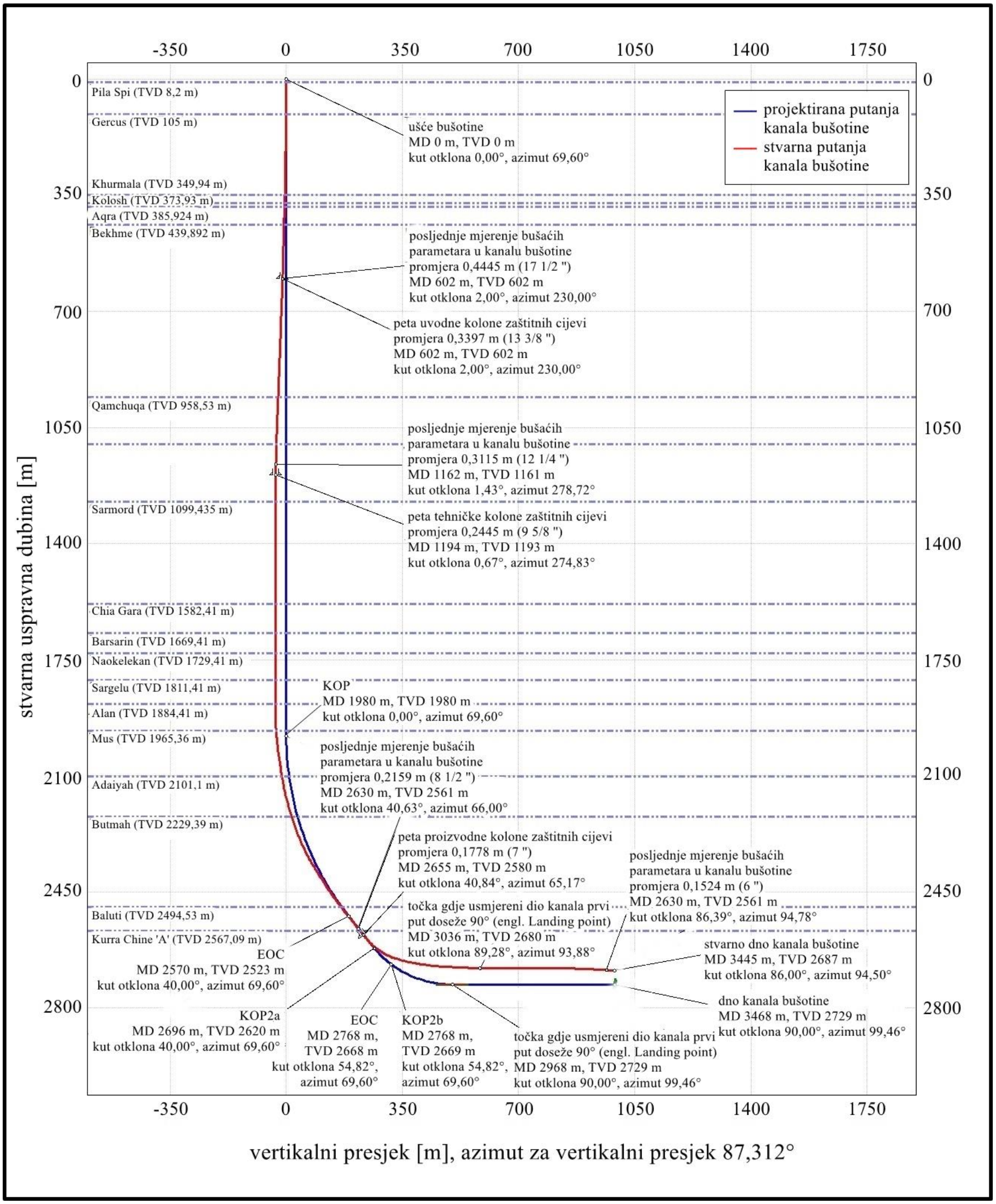
Tablica 6-5. Pretpostavljene i stvarne krovine formacije kroz koje se bušilo (HKN Energy, 2015)

	stvarna		pretpostavljena		razlika između planirane i stvarne uspravne dubine
	MD (m)	TVD (m)	MD (m)	TVD (m)	
Pila Spi	8,2	8,2	8,2	8,2	-
Gercus	105	105	109	109	-4
Khurmala	350	350	354	354	-4
Kolosh	374	374	376	376	-2
Aqra	386	386	388	388	-2
Bekhme	440	440	443	443	-3
peta kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 ⅜")	*602*	*602*	*555*	*555*	*+47*
Qamchuqa	959	959	965	965	-6
Sarmord	1100	1100	1101	1101	-1
peta kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 ⅝")	*1193,5*	*1193,3*	*1965*	*1965*	*-772*
Garagu	1275	1274,4	1290	1290	-17,6
Chia Gara	1583	1582,4	1640	1640	-57,6
Barsarin	1670	1669,4	1707	1707	-37,4
Naokelekan	1730	1729,4	1755	1755	-25,6
Sargelu	1812	1811,4	1833	1833	-21,6
Alan	1885	1884,4	1921	1921	-37,5

Mus	1966	1965,4	2015	2015	-49,6
Adaiyah	2103	2101,1	2102	2102	-0,9
Butmah	2230	2224,1	2233	2229	-4,9
Baluti	2543	2494,5	2594	2541	-46,5
Kurra Chine ‘A’	2638	2567,1	2677	2605	-37,9
peta kolone zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7 '')	*2654,5*	*2579,7*	*2683*	*2610*	*-30,3*
dno kanala bušotine	3445	2686,9	3468	2729	-42,1

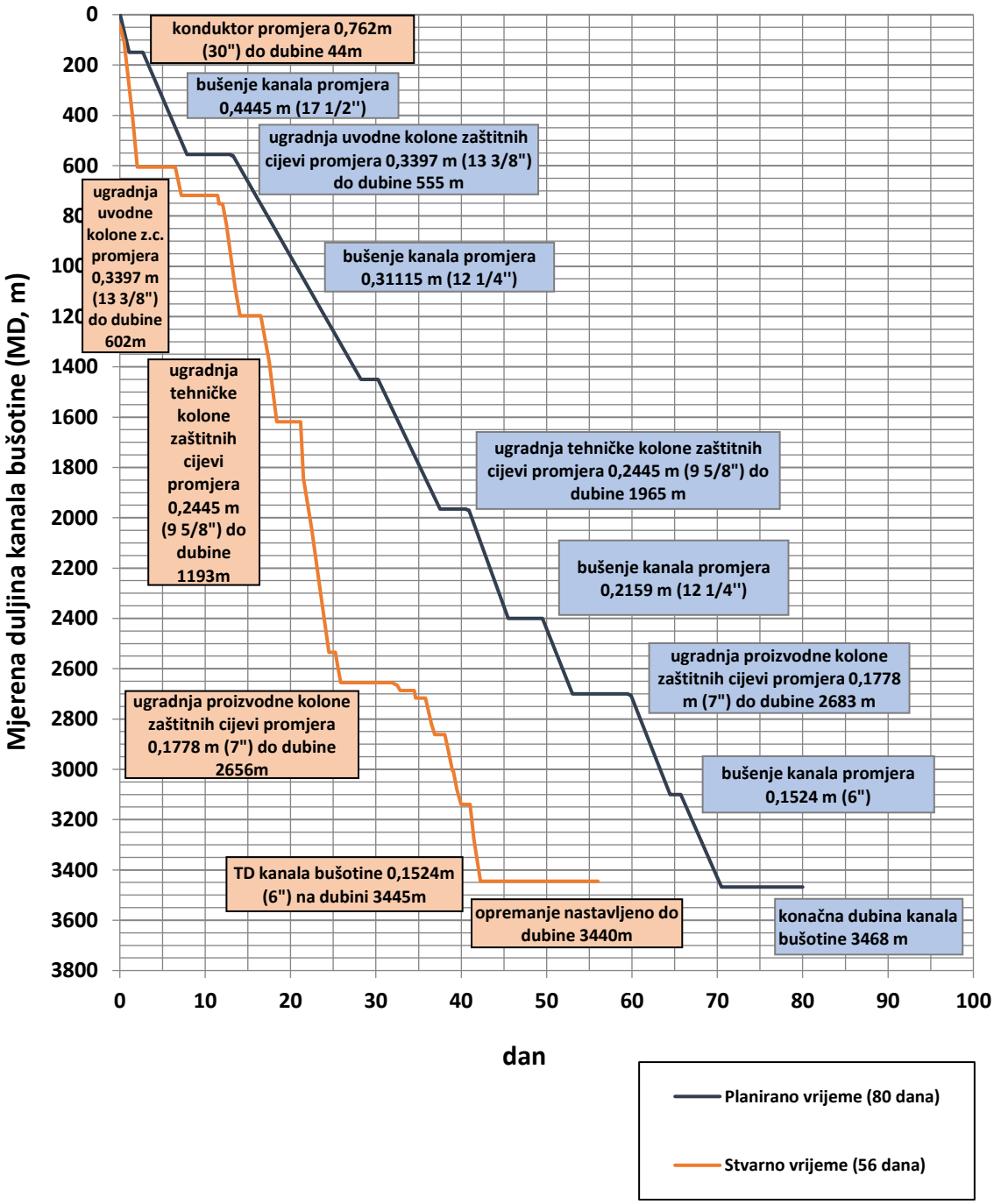


Slika 6-7. Horizontalna projekcija planirane i izrađene bušotine (HKN Energy, 2015)



Slika 6-8. Vertikalni profil kanala planirane i izrađene bušotine (HKN Energy, 2015)

Planirano je da izrada bušotine bude gotova u 80 dana, međutim kako je vidljivo na slici 6-8 bušotina je završena već u 56 dana, što govori da je bušotina dobro projektirana te da su dobro detektirani svi potencijalni problemi.



Slika 6-9. Prikaz planiranog i stvarnog vremena potrebnog za izradu nove horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

7. ZAKLJUČAK

Horizontalno bušenje je širu primjenu našlo pri razradi (eksploataciji) u ležištima čija bi razrada vertikalnim bušotinama bila neekonomična.

Iako se putanja horizontalne bušotine najčešće dijeli na sljedećih 5 dijelova: vertikalna dionica, dionica povećanja kuta otklona, tangencijalna dionica, sekcija s ponovnim povećanjem kuta otklona i horizontalna dionica, najčešće se horizontalne bušotine izrađuju s više zakrivljenih i usmjerenih dionica. Upravo zbog toga njihovo projektiranje je puno kompliciranije i znatno se razlikuje od projektiranja vertikalne bušotine. Kod vertikalne bušotine planirani cilj, odnosno planirana točka dna kanala bušotine, obično je opisan stvarnom uspravnom dubinom kanala bušotine s određenom tolerancijom (pomakom) ciljane točke u horizontalnoj ravnini. Kod projektiranja horizontalne bušotine cilj je obično izrada bušotine s određenom stvarnom uspravnom dubinom kanala bušotine uz određena odstupanja s određenim horizontalnim otklonom od vertikale.

Prije planiranja horizontalne bušotine potrebno je definirati razlog izrade horizontalne bušotine. Prilikom planiranja putanje ali i cijele bušotine potrebno je prikupiti sve dostupne informacije o bušotini i formacijama kroz koje se buši kako bi se na kraju izradila projektirana horizontalna bušotina u predviđenom vremenu koja će odgovarati svim tehničkim i sigurnosnim zahtjevima.

Na projektiranje putanje kanala bušotine utječu i podaci koji se dobivaju tijekom samog bušenja zbog kojih su moguće izmjene projektirane putanje kanala bušotine što je vidljivo i u navedenom primjeru horizontalne bušotine gdje je zbog dubina krovina pojedinih slojeva koje nisu bile na očekivanim projektiranim dubinama došlo do odstupanja dubine ugradnje pojedinih kolona zaštitnih cijevi. Zbog toga i zbog nemogućnosti kontrole otklona kanala bušotine došlo je do minimalnog odstupanja putanje izrađene bušotine u odnosu na planiranu, no u konačnici bušotina je izrađena onako kako je planirana. Iz svega navedenog vidljivo je da na projektiranje same putanje kanala bušotine najviše utječe litološki profil naslaga kroz koje se buši, različite promjene u strukturama u podzemlju (rasjedi, pukotine i sl.) te tehnički zahtjevi koji se definiraju prije samog projektiranja (promjer kanal bušotine, dubina točke ulaska u ležište i sl.)

8. LITERATURA

1. BIZJAK, R., 2004. Tehnologija bušenja sa projektovanjem. Novi Sad: DIT NIS Naftagas
2. CARDEN, R. S., GRACE, R. D., 2007. Horizontal and directional drilling. Tulsa, Oklahoma: PetroSkills.
3. GABOLDE, G., NGUYEN J.P., 1999. Drilling data handbook. 7 izd. Pariz: Editions Technip Paris
4. GAURINA – MEĐIMUREC, N., 2015. Usmjereno bušenje, materijali s predavanja iz kolegija Bušenje II, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
5. HKN Energy, 2015. Tehnička dokumentacija za izradu horizontalne bušotine u Kurdistanu
6. JOSHI, S. D., 1991. Horizontal Well Technology, Tulsa, Oklahoma: PennWell Books
7. JOSHI, S., 2007. Horizontal and Multilateral Well Technology, Tulsa, Oklahoma
8. PERIĆ, M., 2007. Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja proizvodnje nafte i plina. Zagreb
9. SCHLUMBERGER – ANADRILL, 1997. Directional Drilling Training Manual
10. STEINER, I., BOŠKOV STEINER, Z., 1994. Tehnologija vodoravnoga bušenja. Zagreb: Barbat.

Internet izvori:

11. DIRECTIONALDRILLING. 2017. URL: https://directionaldrilling.files.wordpress.com/2012/03/horizontal-well.jpg (1.10.2017.)
12. DRILLING CONTRACTOR. 2018. URL: http://drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2010/03/Complex-Well_fmt.jpeg (4.1.2018.)
13. HIMMELBERG, N., ECKERT, A., 2013. Wellbore Trajectory Planning for Complex Stress States. San Francisco: American Rock Mechanics Association. URL: https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2013-316?sort=&start=0&q=.+Wellbore+Trajectory+Planning+for+Complex+Stress+States

14. KWANTIS. 2018.
URL: http://www.kwantis.com//en/img/works/31_03_4_well_complexity_index_drilling.jpg (4.1.2018.)
15. PETROWIKI. 2017.
URL: http://petrowiki.org/PEH:Directional_Drilling (1.10.2017.)
16. SUBSEA WORLD NEWS, 2017. Rosneft Claims Longest Well Off Sakhalin. URL: https://subseaworldnews.com/2017/11/17/rosneft-claims-longest-well-off-sakhalin/ (4.1.2018.)
17. WIGGINS, M.L., JUVAKM-WOLD, H.C., 1990. Simplified Equations for Planning Directional and Horizontal Wells, Society of Petroleum Engineers, Columbus. Ohio, str. 1 – 8.
URL: https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-21261-MS?sort=&start=0&q=Simplified+Equations+for+Planning+Directional+and+Horizontal+Wells
18. WILSON, A., 2016. New Rotary Shouldered Connection Expands Capability of ERD Operation. Journal of Petroleum Technology. str. 1 – 3
URL: https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-0516-0083-JPT?sort=&start=0&q=New+Rotary+Shouldered+Connection+Expands+Capability+of+ERD+Operation (4.1.2018.)
19. ZBOROWSKI, M., 2017. Sakhalin-1 Extended-Reach Well Eclipses 15000 m. Journal of Petroleum Technology.
URL: https://spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=3636 (4.1.2018.)

Prilog 1: Projekt horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

Elevation: 1475 GL – 1484.2 RT

Drilling Target N/S = 4084042.6m
E/W = 360246.7m

Latitude: N 27° 53’ 09.19”

Longitude: E 07° 53’ 20.77”

Age	Formation	TVD (m)	MD (m)	Description	Inc (Deg)	Potential Hazard & Remarks	Section TD's	Bits & Nozzles	Mud	BHA & Surveying	Casing Type & Shoe Depth	Cementing	Well Control
Paleogene	Pila Spi / ground	9	9	Dolomitic Limestone with slightly chalky texture	0°	Washout below conductor Minimise WOB to control inclination vibrations Possible bit / stabiliser balling Loss zones	975 m	**17-½”** Tricone Rock Bit Smith XR+ MT IADC 115 PDC Bit Smith MDi 616 , MDI 619, SDi616, Z616	KCL Polymer PHPA 8.5-8.7ppg PV: ALAP YP: 25 - 35 lb/ 100ft² 6 RPM: ≥ 8 API FL: < 7.0 cc pH: 10-10.5 MBT < 5 KCl 4 % LGS: < 6%	17-½” Packed Assembly 9" Collars and jar Totco at 150m PowerV Vortex Assembly MWD	13-3/8", 72 lb/ft, L-80 Buttress Shoe set Into 10m inside Qamchuqa to provide sufficient shoe strength Rathole 3m	Single stage 15.8ppg Class G Tail / Bentonite / SMS Extended to 100 m from Bottom 12.5 Class G Lead 400m from Shoe **(50% over open hole)** Cement Plugs for Loss control	None
	Gercus	109	109	Predominantly orange-brown Molasse-type Claystones interbedded with siltstones & lithic Sandstones, with occasional pebbly Chert horizons									
Upper Cretaceous	Khurmala Kolosh Aqra	354	354	Interbeds of Dolomite & Anhydrite with terrestrial Clayst.									
		376	376	Claystone, Interbeds of Dolomite, anhydrites									
	Bekhme	388	388	Dolomite & Anhydrite interbedding with occasional claystone									
		443	443	Dolomites with common heavy Bitumen impregnation, occasionally grading to dolomitic Claystones									
	Qamchuqa	965	965	Dolomites and Dolomatic Limestone with occasional stingers of claystone		Tight hole / over pull when POOH Slow ROP Loss zones	1965 m	**12-¼”** PDC Bits Smith MDi616, MDi716, MSi716, MDSi 616	KCL Polymer/ PHPA MW: 8.7-9.0 PV: ALAP YP:20-28lb/100ft² 6 RPM: ≥ 10 API FL: < 5.0 cc pH: 10-10.5 MBT < 5 LGS: < 6%	12-¼” PowerV Vortex Assembly MWD	9-5/8", 47 lb/ft L-80 Vam Top / BTC Shoe set At top Alan Anhydrite to provide sufficient shoe strength for Kick off Rathole 3m	Single stage 15.8ppg Class G Tail to 200 m from shoe 12.5 Class G Lead to 200m inside 13-3/8 shoe **(30% over open hole)** Cement Plugs for Loss control	13-5/8" 5K BOP Annular Hydril GK 13-5/8" 10K 5" x 2-7/8" Variable Rams Blind/Shear Rams 13-5/8" 10K Choke & Kill lines
Lower Cretaceous	Sarmord	1101	1101	Limestone and Dolomatic Limestone with occasional stingers of claystone									
	Garagu	1290	1290	Claystone, Limestone & Argillaceous Limestone interbeds									
	Chia Gara	1640	1640	Limestone, Argillaceous Limestone and Claystone									
LCM	Barsarin	1707	1707	Limestone with Claystone and Anhydrite stringers									
Jurassic	Naokelekan	1755	1755	Claystones / Shales, Interbedded with Limestone									
	Sargelu	1833	1833	Predominantly Limestones, minor shaly stringers	0°								
	Alan (Sekhaniyan)	1955	1955	Anhydrites, interbedded with Limestones and minor Dolomite		Losse Zone Reactive shales Collapsing shales Tight hole possible is shale Gas flow possible	2683 m	8-1/2" PDC Bits Smith MSi813LWEBPX, MDi813, MDi713, MDi716	KCL Polymer MW: 8.7-9.5 ppg PV: ALAP YP:18-25lb/100ft² 6 RPM: ≥ 10 API FL: < 5.0 cc pH: 10-10.5 MBT: < 5 LGS: < 5%	8-½” PD Vortex Assembly MWD	7", 29 lb/ft, L-80, Vam Top Shoe set at the of the top of KC-A Anhydrite to isolate Jurrasic from Triassic formations Rathole 3m	Single- stage 15.8ppg Class G Tail to 200 m from Bottom 12.5 Class G Lead to 100m inside 9-5/8"casing shoe **(30% over open hole)** Cement Plugs for Loss control	13-5/8" 5K BOP Annular Hydril GK 13-5/8" 10K 7" x 4-1/2" Variable Rams Blind Rams 13-5/8" 10K 5" x 2-7/8" Variable Rams 13-5/8" 10K Choke & Kill lines
	Mus	2015	2015	Massive Dolomite									
	Adaiyah	2102	2102	Dolomitic Limestone with minor Shale & Anhydrite interbedding									
	Butmah	2229	2233	Dolomitic Limestones with occasional Shaly interbedding and rare thin Anhydrites									
LCJ	Baluti	2533	2583	Dolomitic Limestones and Shale interbedding & occasional thin Anhydrite stringers	40°								
	Kurra Chine A Anh	2601	2671	Anhydrite									
Triassic	Kurra Chine A Dol	2650	2738	Interbeds of Shale & Anhydrite with minor Dolomitic Limestones, passing downwards into cleaner Dolomite	90°	Low ROP during Build section Possible losses in fractured reservoir Vibrations, Stick and slip No wiper trips planned unless hole condition poor. Hole cleaning	3468 m	6" PDC Bits Smith MDi713, MDi613, MDSi613, MDSi713	KCL Polymer MW: 8.7-9.5 ppg PV: ALAP YP:18-25lb/100ft² 6 RPM: ≥ 10 API FL: < 5.0 cc pH: 10-10.5 MBT: < 5 LGS: < 6%	6" PD Archer Assembly Near bit GR,Inc, Azi Impulse MWD, LWD (Sonic Scope + Microscope) PD Archer VorteX Near bit GR,Inc, Azi Impulse MWD, LWD (Sonic Scope + Microscope) DH WOB	4 1/2", 12.6 lb/ft, L-80 Vam Top. **TD is a depth Criteria** Stage Frac completion with 70m interval between Packer Rathole 1m	No cement – Stage Frac Acid Soluble Cement plugs	13-5/8" 5K BOP Annular Hydril GK 13-5/8" 10K 4"piperams 13-5/8" 10K 5" x 2-7/8" Variable Rams Blind Rams 13-5/8" 10K Choke & Kill lines
		2729	3468		90°								

Prilog 2: Podaci koji su dobiveni mjerenjem u kanalu bušotine tijekom bušenja i podaci o položaju kanala bušotine dobiveni metodom minimalne zakrivljenosti (HKN Energy, 2015)

	mjerena dubina (m)	kut otklona (º)	azimut (º)	stvarna vertikalna dubina (m)	koordinate (m)		DLS (º /30m)
					sjeverna	istočna	
Tie-In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A
Pila Spi	8,20	0,04	230,00	8,20	0,00	0,00	0,13
Gercus	105,00	0,46	230,00	105,00	-0,27	-0,33	0,13
	113,00	0,50	230,00	113,00	-0,32	-0,38	0,13
	131,00	1,00	230,00	131,00	-0,47	-0,56	0,83
	177,00	1,00	230,00	176,99	-0,98	-1,17	0,00
	203,00	1,00	230,00	202,99	-1,28	-1,52	0,00
	229,00	1,00	230,00	228,98	-1,57	-1,87	0,00
	259,00	1,50	230,00	258,97	-1,99	-2,37	0,50
	288,00	1,50	230,00	287,96	-2,48	-2,95	0,00
	316,00	1,50	230,00	315,96	-2,95	-3,51	0,00
Khurmala	350,00	1,70	230,00	349,94	-3,56	-4,24	0,17
Kolosh	374,00	1,84	230,00	373,93	-4,03	-4,81	0,17
Aqra	386,00	1,91	230,00	385,92	-4,29	-5,11	0,17
	402,00	2,00	230,00	401,91	-4,64	-5,52	0,17
	431,00	2,00	230,00	430,90	-5,29	-6,30	0,00
Bekhme	440,00	2,00	230,00	439,89	-5,49	-6,54	0,00
	459,00	2,00	230,00	458,88	-5,91	-7,05	0,00
	489,00	2,00	230,00	488,86	-6,59	-7,85	0,00
	515,00	2,00	230,00	514,85	-7,17	-8,55	0,00

	545,00	2,00	230,00	544,83	-7,84	-9,35	0,00
	574,00	2,00	230,00	573,81	-8,49	-10,12	0,00
peta uvodne kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 ⅜ ") i posljednje mjerenje bušaćih parametara u kanalu bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ ")	602,00	2,00	230,00	601,79	-9,12	-10,87	0,00
	620,00	2,20	230,91	619,78	-9,54	-11,38	0,34
	649,21	2,37	233,00	648,97	-10,26	-12,30	0,19
	678,21	2,18	274,66	677,95	-10,58	-13,33	1,68
	705,21	2,10	272,37	704,93	-10,51	-14,33	0,13
	744,12	2,19	269,32	743,81	-10,49	-15,79	0,11
	761,22	2,21	272,76	760,90	-10,48	-16,44	0,23
	789,77	2,34	272,64	789,43	-10,43	-17,58	0,14
	818,00	2,29	273,62	817,63	-10,36	-18,71	0,07
	846,47	2,11	270,09	846,08	-10,33	-19,81	0,24
	875,77	2,22	273,27	875,36	-10,29	-20,91	0,17
	904,45	2,21	274,65	904,02	-10,22	-22,02	0,06
	932,97	1,98	273,33	932,52	-10,15	-23,06	0,25
Qamchuqa	959,00	2,16	279,04	958,53	-10,04	-23,99	0,31
	961,04	2,17	279,45	960,57	-10,03	-24,07	0,31
	990,22	2,46	274,67	989,73	-9,89	-25,24	0,36
	1018,61	2,19	276,68	1018,09	-9,78	-26,38	0,30
	1047,53	2,14	275,45	1046,99	-9,66	-27,47	0,07

	1075,92	1,89	278,11	1075,37	-9,54	-28,46	0,28
Sarmord	1100,00	1,66	277,79	1099,43	-9,44	-29,20	0,28
	1104,53	1,62	277,72	1103,96	-9,42	-29,33	0,28
	1133,23	1,57	282,10	1132,65	-9,29	-30,11	0,14
posljednje mjerenje bušaćih parametara u kanalu bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ ")	1161,67	1,43	278,72	1161,08	-9,15	-30,85	0,17
peta tehničke kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 ⅝ ")	1193,50	0,67	274,83	1192,91	-9,07	-31,42	0,72
	1211,00	0,26	262,98	1210,41	-9,07	-31,56	0,72
	1239,37	0,09	148,65	1238,78	-9,10	-31,62	0,33
	1268,00	0,08	212,28	1267,41	-9,13	-31,62	0,09
Garaqu	1275,00	0,08	217,86	1274,41	-9,14	-31,62	0,03
	1298,86	0,09	235,01	1298,27	-9,17	-31,65	0,03
	1324,95	0,09	315,94	1324,36	-9,16	-31,68	0,13
	1353,06	0,09	275,02	1352,47	-9,14	-31,72	0,07
	1382,22	0,03	149,93	1381,63	-9,15	-31,73	0,11
	1410,93	0,06	268,74	1410,34	-9,16	-31,75	0,08
	1439,00	0,02	132,63	1438,41	-9,16	-31,76	0,08
	1467,86	0,06	194,68	1467,27	-9,18	-31,76	0,06
	1496,31	0,09	242,06	1495,72	-9,20	-31,78	0,07
	1524,89	0,06	158,06	1524,30	-9,23	-31,79	0,11
	1553,43	0,26	219,30	1552,84	-9,29	-31,83	0,25
	1581,97	0,18	273,52	1581,38	-9,34	-31,92	0,22
Chia Gara	1583,00	0,18	275,22	1582,41	-9,34	-31,92	0,17

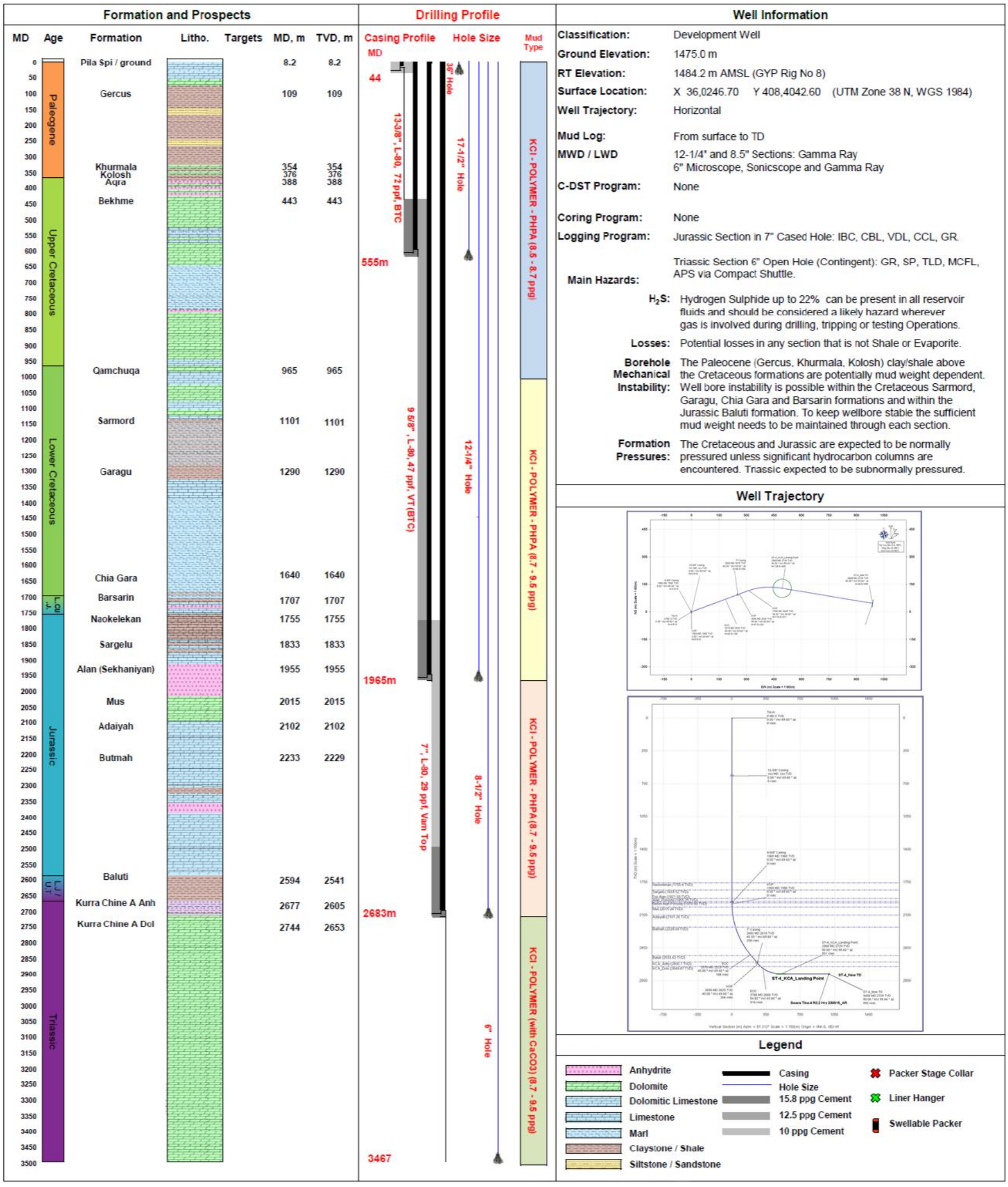
	1611,11	0,18	329,09	1610,52	-9,30	-31,99	0,17
	1640,15	0,08	48,94	1639,56	-9,24	-31,99	0,19
	1669,05	0,09	123,10	1668,46	-9,24	-31,96	0,11
Barsarin	1670,00	0,09	123,04	1669,41	-9,24	-31,96	0,03
	1697,85	0,06	120,47	1697,26	-9,26	-31,93	0,03
	1726,83	0,09	298,59	1726,24	-9,26	-31,93	0,16
Naokelekan	1730,00	0,08	303,66	1729,41	-9,26	-31,94	0,12
	1753,81	0,06	27,86	1753,22	-9,24	-31,95	0,12
	1782,62	0,09	77,61	1782,02	-9,22	-31,92	0,07
	1810,92	0,09	124,11	1810,32	-9,23	-31,88	0,08
Sargelu	1812,00	0,08	122,76	1811,40	-9,23	-31,88	0,18
	1839,53	0,09	339,71	1838,93	-9,22	-31,87	0,18
	1868,24	0,09	19,88	1867,64	-9,18	-31,87	0,06
Alan	1885,00	0,09	4,00	1884,40	-9,15	-31,86	0,04
	1895,92	0,09	353,73	1895,32	-9,13	-31,86	0,04
	1924,64	0,62	116,24	1924,04	-9,18	-31,72	0,70
	1953,71	3,17	122,30	1953,10	-9,68	-30,90	2,64
Mus	1966,00	4,15	118,14	1965,36	-10,07	-30,22	2,48
	1982,05	5,45	114,98	1981,35	-10,67	-29,02	2,48
	2010,81	7,12	95,75	2009,94	-11,42	-26,01	2,78
	2039,51	8,09	80,12	2038,39	-11,25	-22,25	2,38
	2067,91	8,88	67,94	2066,49	-10,09	-18,25	2,07
	2096,23	9,76	67,80	2094,43	-8,36	-14,00	0,93
Adaiyah	2103,00	10,05	68,70	2101,10	-7,93	-12,92	1,44
	2124,90	10,99	71,28	2122,63	-6,56	-9,16	1,44
	2153,71	13,01	74,38	2150,81	-4,81	-3,44	2,21
	2182,38	15,30	73,43	2178,61	-2,86	3,30	2,41

	2210,90	17,41	71,81	2205,97	-0,46	10,96	2,27
Butmah	2230,00	18,53	70,51	2224,14	1,45	16,53	1,87
	2239,25	19,08	69,93	2232,90	2,46	19,34	1,87
	2268,25	20,75	68,90	2260,16	5,93	28,59	1,77
	2296,53	23,30	69,29	2286,38	9,72	38,49	2,71
	2325,28	25,85	69,62	2312,52	13,91	49,69	2,66
	2355,00	28,84	71,15	2338,92	18,48	62,55	3,10
	2382,31	31,22	71,73	2362,56	22,83	75,50	2,63
	2411,27	32,80	72,20	2387,11	27,58	90,10	1,66
	2439,79	33,85	71,99	2410,94	32,40	105,01	1,11
	2468,33	34,29	71,77	2434,59	37,37	120,21	0,48
	2496,80	35,70	72,13	2457,91	42,43	135,73	1,50
	2525,58	38,08	71,31	2480,92	47,85	152,13	2,53
Baluti	2543,00	39,22	70,68	2494,53	51,40	162,42	2,07
	2553,75	39,92	70,30	2502,82	53,68	168,87	2,07
	2582,35	40,10	68,12	2524,72	60,21	186,06	1,48
	2610,71	40,45	66,17	2546,36	67,33	202,95	1,38
posljednje mjerenje bušaćih parametara u kanalu bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ ")	2630,47	40,63	66,00	2561,38	72,54	214,69	0,32
Kurra Chine ‘A’	2638,00	40,69	65,74	2567,09	74,54	219,17	0,72
peta proizvodne kolone zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7 ")	2654,50	40,84	65,17	2579,59	79,02	228,97	0,72
	2659,20	40,88	65,01	2583,14	80,31	231,76	0,72

	2690,39	43,92	73,88	2606,19	87,64	251,42	6,45
	2718,55	54,73	78,31	2624,52	92,70	272,13	12,05
	2747,36	63,35	84,18	2639,34	96,39	296,52	10,39
	2775,95	72,27	87,84	2650,13	98,21	322,90	10,01
	2804,82	76,46	89,02	2657,91	98,96	350,68	4,51
	2833,04	78,91	89,06	2663,93	99,43	378,25	2,60
	2861,16	82,03	89,67	2668,58	99,73	405,97	3,39
	2890,13	83,34	90,63	2672,27	99,66	434,71	1,68
	2918,78	85,87	92,28	2674,96	98,93	463,22	3,16
	2947,83	88,21	93,35	2676,47	97,51	492,19	2,66
	2976,16	87,04	92,75	2677,64	96,00	520,45	1,39
	3005,20	86,45	93,38	2679,29	94,45	549,41	0,89
točka gdje usmjereni dio kanala prvi put doseže 90º (engl. *landing point*)	3035,50	89,28	93,88	2680,42	92,53	579,62	2,85
	3062,25	89,45	94,33	2680,71	90,62	606,30	0,54
	3091,44	90,07	95,29	2680,84	88,17	635,39	1,17
	3119,72	89,90	94,63	2680,84	85,73	663,56	0,72
	3148,70	90,45	94,22	2680,75	83,49	692,45	0,71
	3177,44	91,17	94,00	2680,35	81,43	721,12	0,79
	3206,05	90,69	94,40	2679,88	79,34	749,65	0,66
	3234,22	90,31	94,30	2679,64	77,20	777,73	0,42
	3263,03	89,42	94,17	2679,71	75,07	806,47	0,94
	3291,71	88,80	93,98	2680,15	73,03	835,07	0,68
	3320,03	88,28	94,41	2680,87	70,96	863,30	0,71
	3348,57	87,63	94,53	2681,89	68,74	891,74	0,69

	3377,03	87,42	95,17	2683,12	66,34	920,07	0,71
	3405,64	86,97	95,05	2684,52	63,79	948,53	0,49
posljednje mjerenje bušaćih parametara u kanalu bušotine promjera 0,1524 m (6 ")	3420,82	86,39	94,78	2685,40	62,49	963,63	1,26
stvarno dno kanala bušotine	3445,00	86,00	94,50	2687,00	60,54	987,68	0,60

Prilog 3a: Prognozni geološki profil, osnovni podaci o bušotini i putanji kanala bušotine te osnovni podaci o programu bušenja projektirane horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

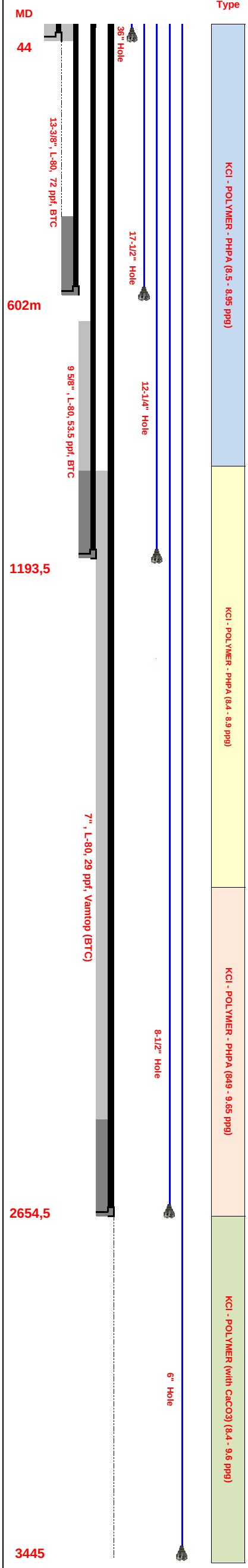


Prilog 3b: Prognozni geološki profil, osnovni podaci o bušotini i putanji kanala bušotine te osnovni podaci o programu bušenja izrađene horizontalne bušotine (HKN Energy, 2015)

Formation and Prospects

MD	Age	Formation	Litho.	Targets	MD, m	TVD, m
0	Paleogene	Pila Spi / ground			8,2	8,2
100		Gercus			109	109
350		Khurmala Kolosh Aqra			354 376 388	354 376 388
450		Bekhme			443	443
950	Upper Cretaceous	Qamchuqa			965	965
1150	Lower Cretaceous	Sarmord			1101	1101
1300		Garagu			1275	1275
1650		Chia Gara			1583	1583
1700		Barsarin			1670	1670
1750	L.CU .J.	Naokelekan			1730	1730
1850	Jurassic	Sargelu			1812	1812
1950		Alan (Sekhaniyan)			1885	1885
2000		Mus			1966	1965,4
2100		Adaiyah			2103	2101,1
2200		Butmah			2230	2224,1
2600	L.J / U.T	Baluti			2543	2494,5
2650	Triassic	Kurra Chine			2638	2567,1

Drilling Profile



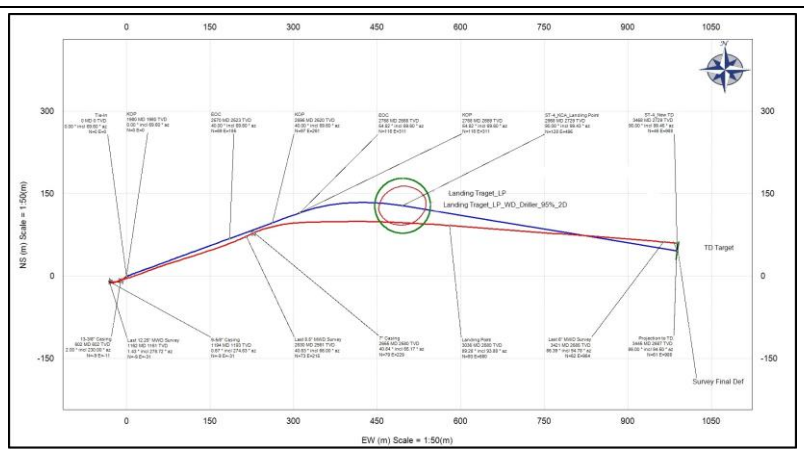
Well Information

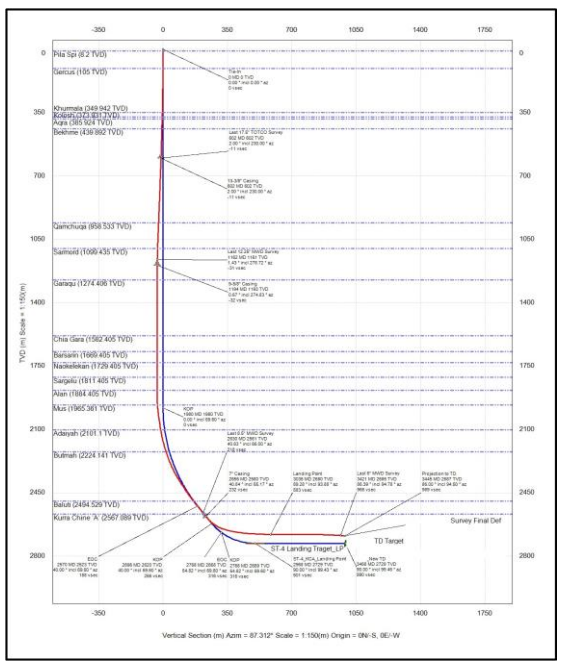
Classification:	Development Well
Ground Elevation:	1475.0 m
RT Elevation:	1484.2 m AMSL (GYP Rig No 8)
Surface Location:	X 36,0246.70 Y 408,4042.60 (UTM Zone 38 N, WGS 1984)
Well Trajectory:	Horizontal
Mud Log:	From surface to TD
MWD / LWD	6" Microscope, Sonicscope and Gamma Ray
C-DST Program:	None
Coring Program:	None
Logging Program:	Jurassic Section in 7" Cased Hole: APS, HNGS, Sonic, CBL, VDL, CCL,

Main Hazards:

H_2S:	Hydrogen Sulphide up to 22% can be present in all reservoir fluids and should be considered a likely hazard wherever gas is involved during drilling, tripping or testing Operations.
Losses:	Potential losses in any section that is not Shale or Evaporite.
Borehole Mechanical Instability:	The Paleocene (Gercus, Khurmala, Kolosh) clay/shale above the Cretaceous formations are potentially mud weight dependent. Well bore instability is possible within the Cretaceous Sarmord, Garagu, Chia Gara and Barsarin formations and within the Jurassic Baluti formation. To keep wellbore stable the sufficient mud weight needs to be maintained through each section.
Formation Pressures:	The Cretaceous and Jurassic are expected to be normally pressured unless significant hydrocarbon columns are encountered. Triassic expected to be subnormally pressured.

Well Trajectory





Anhydrite
Dolomite
Dolomitic Limestone
Limestone
Marl
Claystone / Shale
Siltstone / Sandstone

Casing
Hole Size
14.5 ppg Cement
12.5 ppg cement
9.5 ppg Cement

Packer Stage Collar
Liner Hanger
Swellable Packer

IZJAVA

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

_____

Irena Mijatović