

Mogućnost odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva u duboke bušotine

Dilber, Miroslav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:169:571911>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**



Repository / Repozitorij:

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



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

**MOGUĆNOST ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I
ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U DUBOKE BUŠOTINE**

Diplomski rad

Miroslav Dilber

N325

Zagreb, 2021.

MOGUĆNOST ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG
NUKLEARNOG GORIVA U DUBOKE BUŠOTINE

MIROSLAV DILBER

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

Sažetak

Visoko radioaktivni otpad predstavlja dugoročnu opasnost za ljude i potrebno ga je na adekvatan način zbrinuti što dalje od biosfere. Trenutno se u svijetu razvija nekoliko metoda za odlaganje visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva. Jedno od mogućih rješenja nameće se odlaganje takvog otpada u duboke bušotine. Nekoliko istraživačkih skupina aktivno radi na razvoju ovog koncepta, iako za sada ne postoji niti jedno aktivno odlagalište ove vrste otpada. Cilj diplomskog rada je opis koncepta odlaganja otpada u duboke bušotine i pregled dosadašnjih istraživanja.

Ključne riječi: visoko radioaktivni otpad; istrošeno nuklearno gorivo; duboke bušotine.

Diplomski rad sadrži: 59 stranica, 6 tablica, 9 slika i 19 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a

Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 10.09.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

THE POSSIBILITY OF DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE AND
SPENT NUCLEAR FUEL IN DEEP BOREHOLES

MIROSLAV DILBER

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

Abstract

High-level radioactive waste is long-term danger to humans and needs to be adequately disposed of from the biosphere as far away as possible. Currently, several methods are being developed worldwide for the disposal of high-level radioactive waste and spent nuclear fuel. One possible solution is the disposal of such waste in deep boreholes. Several research groups are actively working on the development of this concept, although so far there is no active repository of this type of waste in deep boreholes. The main goal of the thesis is to describe the working principles of the concept and provide a comprehensive overview of the existing research.

Keywords: high-level radioactive waste, spent nuclear fuel, deep boreholes.

Thesis contains: 59 pages, 6 tables, 9 figures and 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Associate Professor Želimir Veinović, PhD

Defense date: September 10, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	III
1. UVOD	1
2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA	3
3. KONCEPT ODLAGANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA U DUBOKE BUŠOTINE	5
3.1. Kriteriji za odabir koncepta odlaganja visoko radioaktivnog otpada.....	6
3.2. Konstrukcija kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada.....	7
3.2.1. Tehnički zahtjevi prilikom konstrukcije bušotine	10
3.3. Spremnici otpada.....	11
3.3.1. Tehnički zahtjevi dizajna spremnika za radioaktivni otpad.....	13
3.3.2. Punjenje spremnika otpadom.....	14
3.3.3. Spuštanje spremnika u bušotinu.....	16
3.4. Analiza troškova.....	20
3.4.1. Troškovi bušenja i opremanja bušotine.....	21
3.4.2. Troškovi spremnika za skladištenje otpada i njihovog punjenja.....	24
3.4.3. Troškovi spuštanja spremnika u bušotinu i ugradnje čepova.....	25
3.4.4. Ukupni troškovi	26
3.5. Osiguranje i nadzor operativne sigurnosti	27
3.6. Formacije pogodne za odlaganje otpada	28
4. ISTRAŽIVANJA AMERIČKOG MINISTARSTVA ENERGETIKE	30
4.1. Tehnička procjena američkog odbora za tehnički pregled nuklearnog otpada.....	31
4.2. Specifične preporuke	32
5. MOGUĆNOST PRIMJENE KONCEPTA ODLAGANJA OTPADA U DUBOKE BUŠOTINE U ISTOČNOJ AZIJI.....	35
5.1. Vrste otpada pogodne za odlaganje u Istočnoj Aziji.....	36
5.2. Postavljanje spremnika s otpadom u bušotinu	38

5.3. Ključne nepoznanice i potencijalne prepreke	40
5.3.1. Tehnološke prepreke.....	41
5.3.2. Pravne prepreke	41
5.3.3. Političke i institucionalne prepreke.....	42
6. MOGUĆNOST ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA U HORIZONTALNE BUŠOTINE.....	44
6.1. Konstrukcija horizontalne bušotine za odlaganje spremnika s radioaktivnim otpadom	45
6.2. Ugradnja spremnika s radioaktivnim otpadom.....	46
6.3. Usporedba s vertikalnim bušotinama	47
7. STRATEŠKA RAZMATRANJA I NEDOSTACI KONCEPTA	50
7.1. Nedostaci koncepta.....	51
8. DISKUSIJA	54
9. ZAKLJUČAK	57
10. LITERATURA	58

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine.....	5
Slika 3-2. Konstrukcija kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada	8
Slika 3-3. Raspored pakiranja gorivnih šipki u niskotemperaturnom spremniku	15
Slika 3-4. Usporedba različitih načina postavljanja spremnika u bušotinu	17
Slika 3-5. Odnos troškova i broja dana s obzirom na dubinu	23
Slika 3-6. Primjer djelovanja puzanja soli	29
Slika 5-1. Različiti načini postavljanja spremnika u bušotinu	39
Slika 5-2. Multilateralna bušotina namijenjena za odlaganje radioaktivnog otpada.....	40
Slika 6-1. Shematski prikaz horizontalne bušotine za odlaganje radioaktivnog otpada	45

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Dimenzije spremnika za odlaganje radioaktivnog otpada u bušotine	12
Tablica 3-2. Procijenjeni troškovi bušenja i opremanja bušotine	22
Tablica 3-3. Troškovi spremnika otpada i njihovog punjenja	24
Tablica 3-4. Troškovi spuštanja spremnika u bušotinu i ugradnje čepova	25
Tablica 3-5. Ukupni troškovi.....	26
Tablica 6-1. Osnovne razlike između vertikalnih i horizontalnih bušotina za odlaganje otpada	49

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

<u>Oznaka</u>	<u>Opis</u>
DOE	Američko ministarstvo energetike (engl. <i>The U.S. Department of Energy</i>)
IAEA	Međunarodna agencija za atomsku energiju (engl. <i>International Atomic Energy Agency</i>)
ING	istrošeno nuklearno gorivo
NRAO	nisko radioaktivni otpad
NWTRB	Američki odbor za tehnički pregled nuklearnog otpada (engl. <i>The U.S. Nuclear Waste Technical Review Board</i>)
RAO	radioaktivni otpad
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag, švedska kompanija za upravljanje i odlaganje radioaktivnog otpada
SRAO	srednje radioaktivni otpad
UN	Ujedinjeni narodi
VNRAO	vrlo nisko radioaktivni otpad
VRAO	visoko radioaktivni otpad

1. UVOD

Radioaktivnost je proces u kojem se određene atomske jezgre spontano raspadaju ili dijele, te njihovim raspadom nastaju druge čestice (alfa i beta zrake) i elektromagnetski valovi malih valnih duljina. Jezgre koje su radioaktivne, ali i nestabilne, nazivaju se radionuklidima, a elektromagnetski valovi nazivaju se radioaktivnim zračenjem. Spontane promjene radioaktivnih jezgri nazivaju se radioaktivnim raspadom. Radionuklidi se mogu nalaziti u zraku, u tlu, u vodi, u biljkama i životinjama, građevinskom materijalu, pa čak i u hrani i piću (<https://radioaktivniotpad.org>, 2015b).

Prema definiciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (engl. *International Atomic Energy Agency*- IAEA) pod radioaktivnim otpadom (RAO) podrazumijevaju se materijali koji sadrže radionuklide ili su kontaminirani u koncentracijama koje su iznad graničnih vrijednosti minimalno dozvoljene radioaktivnosti određene zakonskim propisima od strane nadležnih tijela te kao takvi nisu predviđeni za daljnje korištenje (IAEA, 2009). Radioaktivni otpad nastaje u brojnim ljudskim djelatnostima poput industrije, medicine, energetike, znanstvenim istraživanjima i dr. Ipak, najviše otpada se stvara u nuklearnim elektranama prilikom proizvodnje električne energije i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa, uključujući fazu kopanja uranovih ruda pa sve do razgradnje postrojenja. Radioaktivni otpad se pojavljuje u sva tri agregatna stanja, a klasificira se s obzirom na intenzitet radioaktivnog zračenja te su međunarodno prihvaćene sljedeće kategorije: vrlo nisko radioaktivni (VNRAO), nisko radioaktivni (NRAO), srednje radioaktivni (SRAO) i visoko radioaktivni otpad (VRAO). U Hrvatskoj je radioaktivni otpad klasificiran u četiri razreda: izuzetni i otpušteni radioaktivni otpad, nisko radioaktivni kratkoživi otpad, nisko i srednje radioaktivni otpad te visoko radioaktivni otpad. Istrošenim nuklearnim gorivom (ING) smatraju se gorivni elementi koji su dosegli tehničku i ekonomsku granicu iskoristivosti, te se ne može smatrati visoko radioaktivnim otpadom. Istrošeno nuklearno gorivo se može preraditi i ponovno koristiti pri čemu se smanjuje količina otpada, ali ne i njegova aktivnost. Od ukupnog volumena radioaktivnog otpada u svijetu 90% čini nisko radioaktivni, 6% srednje radioaktivni te 4% visoko radioaktivni otpad, dok od ukupne radioaktivnosti 95% čini visoko radioaktivni, 4% srednje radioaktivni i 1% nisko radioaktivni otpad (<https://radioaktivniotpad.org>, 2015a).

Glavni cilj odlaganja (zbrinjavanja) radioaktivnog otpada je onemogućavanje kontakta radionuklida s biosferom i podzemnim vodama. U prošlosti, dok su količine radioaktivnog

otpada bile neznatne, nije se vodila prevelika briga oko zbrinjavanja otpada. Opasniji otpad bacao se u duboko more, a ostale vrste otpada odlagale su se u plitke rovove ili u napuštene rudnike. S porastom količina radioaktivnog otpada, porasla je i zabrinutost za dugoročnu sigurnost. Do danas su pronađena rješenja za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada koja zadovoljavaju tehnološke, sigurnosne i ekološke aspekte. No, zbog svojih specifičnih svojstava koje posjeduje, za odlaganje visoko radioaktivnog otpada potreban je sveobuhvatniji pristup i odgovarajuća tehnička rješenja. Prije početka odlaganja, visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo je potrebno određeni period skladištiti u bazenima (moko skladištenje) ili u spremnicima (suho skladištenje) kako bi im se smanjila radioaktivnost i time olakšalo daljnje rukovanje i odlaganje. U Švedskoj i Finskoj je već prihvaćen koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva u pogodne geološke formacije na dubinama od oko 500 m. U posljednje vrijeme zbog razvoja tehnologije bušenja u naftnoj industriji, ponovno je aktualizirana ideja o odlaganju otpada u duboke bušotine koja postoji već preko 60 godina. Koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine podrazumijeva smještanje otpada na dubinama od 3 do 5 km, pri čemu bi se gornji dio kanala bušotine zapunio različitim materijalima kako bi se spriječio kontakt s površinom. Koncept se nalazi u fazi intenzivnog razvoja i istraživanja te se trenutno ne primjenjuje nigdje u svijetu (Arnold et al., 2011). U ovom radu je detaljno opisan sami koncept i pregled dosadašnjih istraživanja.

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Odlaganje visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine razmatra se već dugi niz godina, počevši od 1957. godine kada je ideju za takav oblik zbrinjavanja dala Nacionalna akademija znanosti Sjedinjenih Američkih Država (engl. *The U.S. National Academy of Sciences*). U proteklih pola stoljeća bilo je uobičajeno da se visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo odlažu u napuštene rudnike. Unatoč tome, procjene mogućnosti odlaganja otpada u duboke bušotine su se nastavili u nekoliko zemalja te su donesene tehničke preporuke kojih bi se trebalo pridržavati. Također, procjenjivala se cijena izrade dubokih bušotina temeljem prethodnog iskustva iz naftne industrije, bušenja geotermalnih bušotina te nekih bušotina kao što su Gravberg-1 i Kola koje su isključivo izrađivane za potrebe znanstvenih istraživanja (Arnold et al., 2011).

Kompanija Woodward-Clyde je 1983. godine razvila koncept odlaganja otpada koji je obuhvaćao izradu bušotine promjera 0,51 m (20") do dubine 6 100 m. Vjerovalo se da će takav koncept zaživjeti do 2000. godine s obzirom na razvoj naftne industrije i tehnologije bušenja. Predloženo je da bušotina bude nezacjevljena u donjem dijelu kanala gdje bi se trebao odlagati otpad na dubini od 3 050 m do 6 100 m. U srednji dio kanala bušotine od 1 220 m do 3 050 m bi se postavile zaštitne cijevi koje se ne bi cementirale kako bi se mogle izvući iz bušotine u slučaju nekih problema, dok bi se u gornjem dijelu kanala zaštitne cijevi cementirale. Otpad bi se pohranjivao u čelične spremnike vanjskog promjera 0,32 m i duljine 3 m koji bi bili ispunjeni dodatnim materijalom kako bi se spriječile moguće deformacije uslijed djelovanja hidrostatičkog tlaka. Takav koncept zahtijevao je poseban dizajn površinske opreme kako bi se otpadom moglo sigurno rukovati, a to je uključivalo povišeno bušaće postolje (podstrukturu), zaštićenu prostoriju ispod bušaćeg postolja kako bi se spremnici mogli pozicionirati iznad bušotine te prostoriju ispod površine zemlje za spuštanje spremnika u bušotinu. Spremnici bi se spuštali u bušotinu jedan po jedan, a nakon što bi svi bili spušteni u zonu odlaganja, u bušotinu bi se utisnula cementna kaša koja bi popunjavala prostor između spremnika i kanala bušotine. Potom bi se u gornji dio kanala bušotine naizmjenično postavljali čepovi od cementa, šljunka i bentonita (Woodward-Clyde Consultants, 1983).

Juhlin i Sandstedt su 1989. godine došli do zaključka da bi duboke bušotine dubine do 4 000 m i promjera 0,80 m bile pogodne za odlaganje istrošenog nuklearnog goriva. Ukupan trošak potreban za odlaganje otpada i izradu takve bušotine bi bio puno veći nego što je potrebno

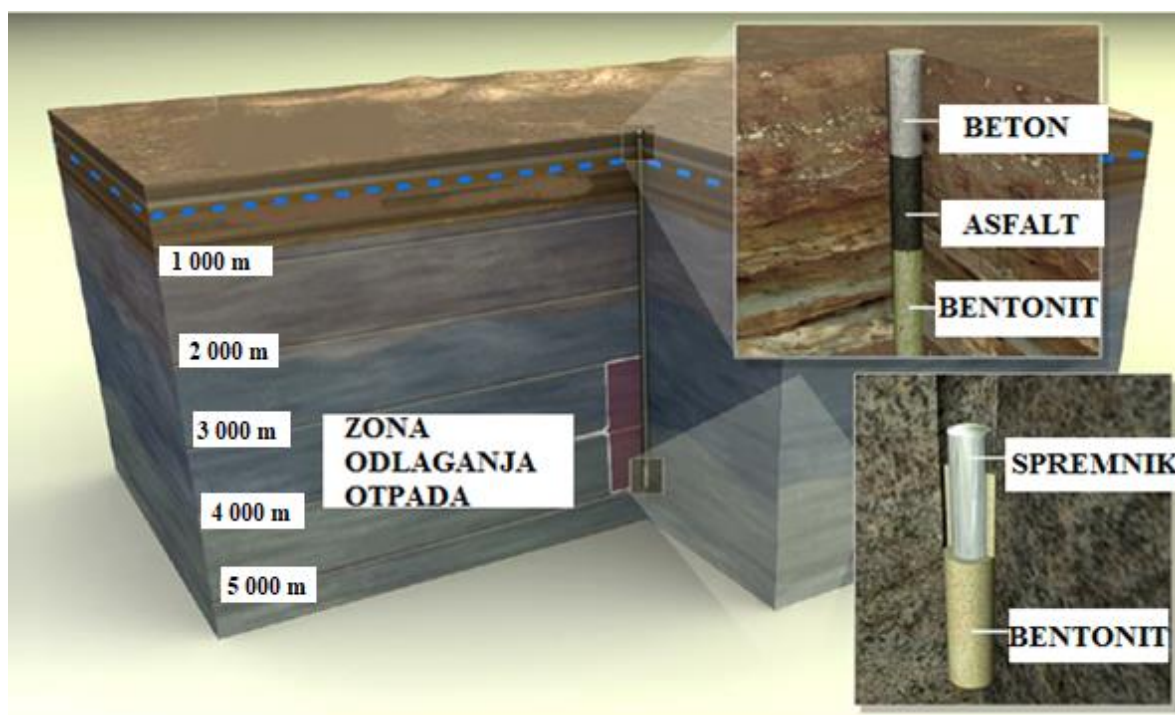
za odlaganje otpada u napuštene rudnike. Također su proučavali utjecaj anizotropije u horizontalnom naprezanju na stabilnost kanala bušotine i stvaranje određenih deformacija u kanalu što bi moglo uzrokovati određene probleme prilikom bušenja ili odlaganja otpada na dubinama većim od 2 000 m. U donjem dijelu kanala bušotine gdje bi se nalazio otpad ugradile bi se gusto perforirane zaštitne cijevi kako bi se osigurao lakši prolazak cementne kaše u prstenasti prostor. Spremnici bi trebali biti duljine 5 m s unutarnjim promjerom 0,39 m te vanjskim promjerom 0,50 m, a u izradi spremnika bi se koristili materijali kao što su titan i bakar. Praznine unutar spremnika bi se trebale popuniti određenim punilom. U bušotinu bi se prvo trebali spustiti spremnici s otpadom, a potom bi se utiskivala bentonitna suspenzija velike gustoće. U gornjih 500 m kanala bušotine bi se postavili asfaltni i cementni čepovi (Juhlin i Sandstedt, 1989).

John Beswick je 2008. godine došao do zaključka da je promjer bušotine od 0,30 m lako ostvariv do dubine od 5 000 m, ali da su promjeri veći od 0,50 m teško ostvarivi s obzirom na postojeću tehnologiju bušenja koja se koristi u naftnoj industriji. Također je naglasio da postoje određena ograničenja s obzirom na stabilnost kanala bušotine na dubinama od nekoliko kilometara. Beswick je predložio da se u donji dio kanala bušotine ugrade perforirane zaštitne cijevi. Između svakog niza spremnika bi se postavili bentonitni mostovi kako bi se smanjila mogućnost protoka te smanjilo opterećenje na spremnike koji se nalaze na dnu kanala bušotine (Beswick, 2008).

U Nevadi je 1986. godine proveden program Climax koji je zapravo bio test za odlaganje istrošenog nuklearnog goriva. U testu je uspješno razvijeno i implementirano nekoliko elemenata i operativnih postupaka vezanih za koncept odlaganja otpada u duboke bušotine. Iako se u testu radilo o odlaganju otpada u rudnik granita, spremnici su se spuštali u podzemlje kroz bušotinu. U ukupno 11 spremnika promjera 0,36 m i duljine oko 4,50 m bile su pohranjene gorivne šipke. Manevriranje napunjenim spremnicima na površini bilo je omogućeno pomoću sustava kamiona i transportnih bačvi pri čemu su bačve bile podignute iznad bušotine u vertikalnom položaju. Spremnici su se spuštali na žici kroz zacjvljenu bušotinu promjera 0,48 m do dubine od 420 m. Nakon postavljanja spremnika na dno, sljedećih 3,5 godine su trajala ispitivanja vezana za propuštanje radionuklida te su potom spremnici kroz istu bušotinu izvučeni natrag na površinu. Test je uspješno i sigurno proveden uz minimalno izlaganje radnika zračenju (Patrick, 1986).

3. KONCEPT ODLAGANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA U DUBOKE BUŠOTINE

Kompanija Sandia National Laboratories razvila je koncept koji se sastoji od bušenja bušotine ili niza bušotina kroz kristalinične stijene (granit, gnajs) do dubine od 5 000 metara. Zatim se u spremnike stavlja istrošeno nuklearno gorivo ili prethodno vitrificirani visoko radioaktivni otpad te se spremnici spuštaju u interval kanala bušotine od 3 000 metara do dna bušotine. Gornji dio kanala bušotine se zapunjava pomoću naizmjeničnih slojeva bentonita, betona i asfalta. U plicem dijelu kanala bušotine također se može koristiti asfalt. U odnosu na odlaganje otpada u rudnike, ovakav koncept odlaganja pruža puno veću sigurnost i izolaciju otpada od biosfere s obzirom da se otpad nalazi na puno većoj dubini. U zoni odlaganja u pojedinoj bušotini moglo bi se spremiti oko 400 spremnika otpada prosječne duljine 5 metara (Arnold et al., 2011). Na slici 3-1 prikazan je koncept odlaganja otpada u duboke bušotine. Istraživanja su pokazala da koncept odlaganja otpada u duboke bušotine nema većih nedostataka s obzirom na sigurnost te samu izvedbu.



Slika 3-1. Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine (Arnold et al., 2011)

Nekoliko čimbenika pokazuje da je koncept odlaganja otpada u duboke bušotine održiv i siguran. Kristalinične stijene su relativno čvrste na dubinama od 2 000 do 5 000 metara u stabilnim kontinentalnim dijelovima, što sugerira da postoji velik broj mogućih zona odlaganja. Postojeća tehnologija bušenja omogućuje pouzdanu izradu bušotina dovoljno velikog promjera do dubine od 5 000 metara, uz prethodno procijenjeni trošak od oko 20 milijuna američkih dolara za svaki kanal bušotine. Iako se koncept odlaganja čini jednostavan, stvarna provedba zahtijeva brojna istraživanja, testiranja i procjene koje je u budućnosti potrebno napraviti (Arnold et al., 2011).

3.1 Kriteriji za odabir koncepta odlaganja visoko radioaktivnog otpada

Izbor koncepta odlaganja otpada kompanije Sandia National Laboratories temelji se na sljedećim kriterijima (Arnold et al, 2011):

- inženjerska i operativna izvedivost,
- sigurnost provedbe,
- jednostavnost provedbe,
- troškovi i učinkovitost.

Procjena izvedivosti koncepta ovisi o trenutno dostupnoj tehnologiji izrade kanala bušotine. Za određene faze ovakvog koncepta će biti potrebno udovoljiti specifičnim inženjerskim zahtjevima kao što su npr. transport i spuštanje spremnika do dna kanala bušotine. Takvi izazovi se mogu prevladati i slični su onima povezanim s odlaganjem otpada u rudnike.

Sigurnost provedbe ovisi o mogućim rizicima prije i poslije završetka operacije. Rizici prije završetka uključuju izloženost radnika zračenju, nesreće i potencijalne operativne probleme kao npr. zaglava spremnika iznad zone odlaganja. Rizici nakon završetka operacije povezani su s potencijalnim probojem radionuklida u biosferu, uglavnom u dalekoj budućnosti. Rizici koji bi se najvjerojatnije dogodili su povezani s protokom tekućina i učinkovitosti brtvenog sustava bušotine.

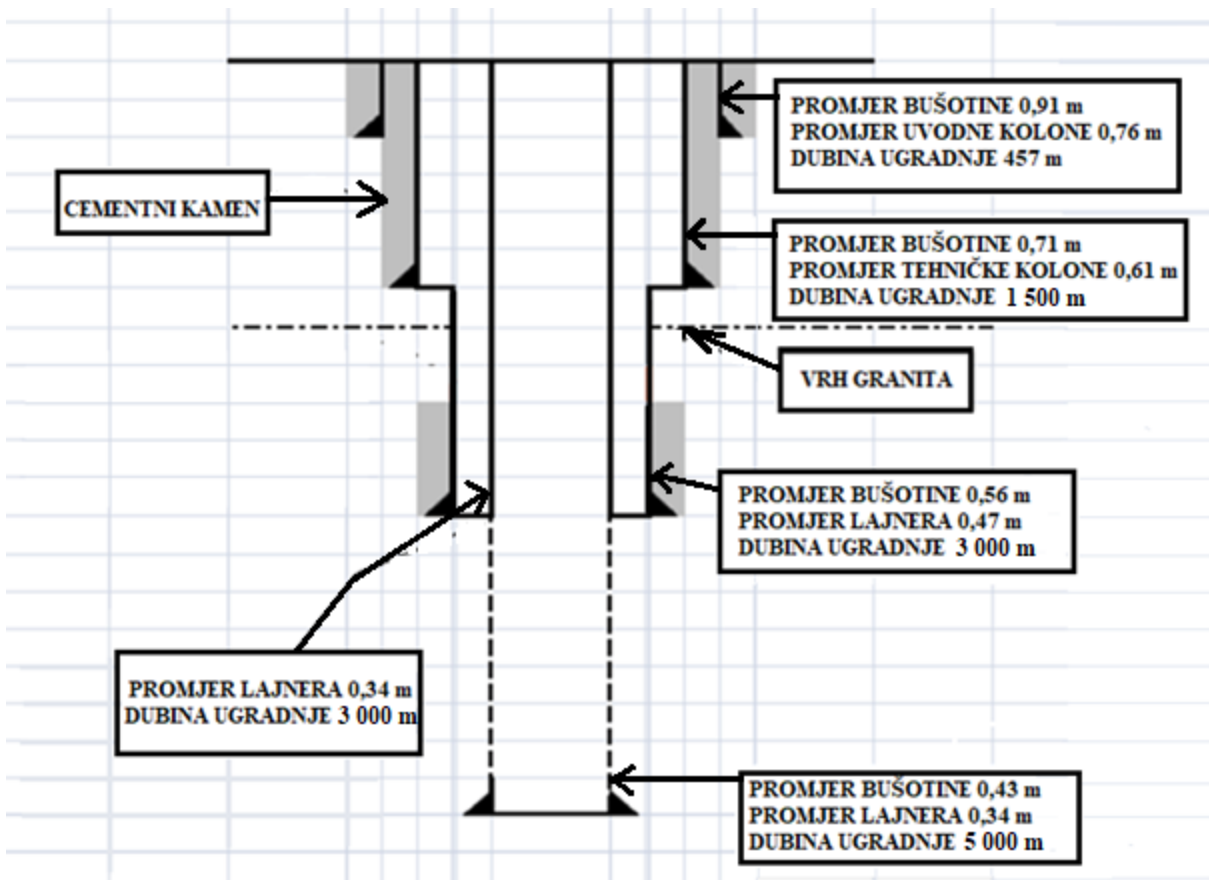
Vrlo je važno javnosti prikazati da je koncept jednostavan za provedbu. Iako se dosad nikad ovakva metoda odlaganja visoko radioaktivnog otpada nije koristila, važno je steći

određeno iskustvo u prvih par pokušaja. Jedna od glavnih briga je spuštanje otpada u bušotinu i na to je potrebno obratiti pažnju kako ne bi došlo do zaglave spremnika u kanalu bušotine. Ukoliko dođe do zaglave spremnika, to će izazvati dodatne financijske troškove. Zato je vrlo važno da koncept bude jednostavan i siguran za izvođenje kako bi vjerojatnost zaglave spremnika bila minimalna (Arnold et al, 2011).

3.2. Konstrukcija kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada

Konstrukcija kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada je prikazana na slici 3-2, a činili bi je sljedeći elementi (Arnold et al., 2011):

- Konduktorska cijev promjera 1 m (40") koju bi se ugradilo u kanal bušotine promjera 1,2 m (48") i cementiralo;
- Uvodna kolona promjera 0,76 m (30") koju bi se ugradilo u kanal bušotine promjera 0,91 m (36") i cementiralo do ušća. Dubina do koje bi se ugradila ova kolona je oko 457 m;
- Tehnička kolona promjera 0,61 m (24") koju bi se ugradilo u kanal bušotine promjera 0,71 m (28") i cementiralo do ušća. Dubina do koje bi se ugradila ova kolona je oko 1 500 m;
- Lajner promjera 0,47 m (18 5/8") kojeg bi se postavilo u kanal bušotine promjera 0,56 m (22"). Lajner bi se ugradio do dubine od 3 000 m i ovjesio unutar prethodno ugrađene tehničke kolone. Cementiralo bi se samo donjih 160 m lajnera jer bi se gornji dio lajnera morao ukloniti zbog postavljanja brtvenog sustava;
- Lajner promjera 0,34 m (13 3/8") kojeg bi se ugradilo u bušotinu promjera 0,43 m (17") do krajnje dubine od 5 000 m. Lajner bi bio prorezan i perforiran te ovješeno o prethodni lajner;
- Kolona promjera 0,34 m (13 3/8") koju bi se ugradilo od ušća bušotine pa do dubine od 3 000 m te se ne bi cementirala. Svrha ove kolone je da osigura nesmetan prolaz konstantnog promjera za spremnike s otpadom. Ova kolona bi se potpuno uklonila nakon što bi se svi spremnici postavili u zonu odlaganja;



Slika 3-2. Konstrukcija kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada (Arnold et al., 2011)

Čvrstoća zaštitnih cijevi i cementnog kamena mogu uvelike pomoći pri ublažavanju oštećenja spremnika nastalih udarcima tijekom rukovanja, postavljanja u bušotinu ili smicanjem tijekom potresa. Izračuni za zaštitne cijevi izrađene od ugljičnog čelika pokazuju da njihov vijek trajanja može doseći i do nekoliko stotina godina. To je dovoljno dugo da pruže pouzdan i relativno gladak put za vađenje spremnika, ako to bude potrebno. Iako zaštitne cijevi nisu dizajnirane za dugotrajnu zaštitu otpada, korisno je imati barijeru koja ograničava protok isplake tijekom postavljanja spremnika u kanal bušotine. Korozija spremnika i zaštitnih cijevi stvara metalne okside i plinoviti vodik. Oba procesa dovode do širenja volumena i, posljedično, povećanja tlaka, što zauzvrat izaziva protok fluida. Upotreba materijala otpornih na koroziju dovodi do sporog stvaranja produkata korozije te izbjegavanja spomenutih neželjenih kretanja fluida (Payer et al., 2019).

Projektiranje i izrada kanala bušotine ovisi o trenutno dostupnoj tehnologiji. Dubina od

5 000 metara se ne čini pretjerano velikom jer je već nekoliko bušotina doseglo tu dubinu u granitnim stijenama, iako manjeg promjera nego što je potrebno u ovakvom konceptu. Bušotine istih dubina s promjerom od 0,43 m (17") trebale bi biti izvedive s obzirom da nema poznatih tehničkih problema koji bi predstavljali prepreke prilikom bušenja. Trenutna praksa koja se primjenjuje u izradi geotermalnih bušotina je vrlo slična s obzirom da se geotermalni izvori nalaze u tvrdim magmatskim stijenama i potrebne su bušotine velikog promjera zbog potrebne brzine protoka. S obzirom na tu usporedbu, bušenje bi se najvjerojatnije trebalo izvoditi pomoću konvencionalnog bušačkog tornja koristeći rotacijski sustav s odgovarajućim žrvanjskim ili dijamantnim dlijetom ili eventualno pomoću turbinske bušilice u kombinaciji s impregniranim dijamantnim dlijetom. Izbor između ove dvije metode kao i odabir vrste dlijeta te bušačkih parametara (brzina bušenja, opterećenje na dlijeto, hidraulički parametri) ovisit će o svojstvima stijene. Zbog toga će biti potrebno provesti brojna karotažna mjerenja kao što su karotaža temperature, karotaža promjera bušotine (engl. *caliper*), karotaža gustoće, neutronska karotaža, karotaža spontanog potencijala. Također je potrebno izvoditi jezgrovanje nakon svakih izbušenih 500 metara ili prilikom značajnije promjene u litologiji (Arnold et al., 2011).

Jedan od tehničkih zahtjeva je taj da razmak između dviju bušotina mora biti veći od 50 m što podrazumijeva da putanja bušotine ne odstupa više od 0,6 stupnjeva od vertikale. Postoji nekoliko načina da se to postigne uz postojeću tehnologiju koja se koristi u naftnoj industriji. Bušenje kroz kristalinične stijene će biti sporo uz brzinu napretka od 1 m/h te će se dlijeta vrlo brzo trošiti što će zahtijevati često izvlačenje alata radi zamjene dlijeta. Takvi uvjeti u kombinaciji s velikim promjerom i specifičnim faktorima bušenja pokazuju da će troškovi izrade bušotine biti ne samo veliki već i nepredvidljivi, pogotovo za izradu prve bušotine na nekoj lokaciji. Kao i u svakom bušačkom projektu, dizajn zaštitnih cijevi predstavlja vrlo važan element i određuje mnoge aspekte o načinu bušenja. Također je bitno ukloniti bilo kakav rizik od moguće zaglave spremnika tijekom spuštanja u kanal bušotine.

Veliki dio troškova bušenja bit će uzrokovan velikim promjerom kanala, pa bi zbog toga isplativije bilo prvo napraviti istraživačku bušotinu bez namjere da se u nju odlaže otpad. Promjer takve bušotine bio bi 0,22 m (8,5") te bi omogućavao normalnu provedbu karotažnih mjerenja i testiranja. Manja dimenzija bušačkog postrojenja, manje materijala potrebnog za cementiranje i zacjevljenje kanala bušotine kao i manje vremena potrebnog za testiranja rezultirat će i manjim troškovima izrade bušotine. Iskustvo koje bi se steklo izradom

istraživačke bušotine bilo izuzetno korisno u predviđanju mogućih problematičnih dionica te bi olakšalo izbor dlijeta i bušaćih parametara. Istraživačka bušotina bila bi cementirana i zapunjena na sličan način kao i bušotina predviđena za odlaganje otpada. Trenutno dostupna oprema za neka karotažna mjerenja se može koristiti u bušotini maksimalnog promjera 0,51 m. To bi značilo da bi se u početnoj fazi trebao izraditi kanal bušotine manjeg promjera kako bi se mogla provesti karotažna mjerenja, a tek onda bi se postojeći kanal dodatno proširio do zadanog promjera. Bušaća dlijeta s promjerom većim od 0,43 m (17") nisu toliko često dostupna zbog slabe potražnje te su ekstremno skupa (više od 250 000 \$) (Arnold et al., 2011).

3.2.1. Tehnički zahtjevi prilikom konstrukcije bušotine

Tehnički zahtjevi prilikom konstrukcije bušotine za trajno zbrinjavanje radioaktivnog otpada uključuju sljedeće (Arnold et al, 2011):

- Bušotina mora biti izbušena i opremljena do dubine od 5 000 m pri čemu bi zona odlaganja otpada bila na dubini između 3 000 m i 5 000 m.
- Bušotina i ugrađene zaštitne cijevi moraju imati dovoljnu stabilnost i trajnost kako bi osigurali nesmetano postavljanje spremnika s otpadom na predviđenu dubinu uz minimalnu mogućnost zaglave spremnika u kanalu bušotine.
- Bušotina mora biti dovoljno velikog promjera da osigura postavljanje spremnika s otpadom.
- Prilikom izrade bušotine mora se paziti na otklon kanala od vertikale tako da minimalni razmak između dviju bušotina mora biti veći od 50 m na krajnjoj dubini kako ne bi došlo do toplinskog utjecaja jedne bušotine na drugu.
- Prilikom izrade više bušotina na istom polju, ne smije doći do međusobnog presijecanja kanala bušotina u kojima je postavljen otpad.
- Bušotina i zaštitne cijevi moraju biti dizajnirani tako da se zaštitne cijevi mogu ukloniti u intervalima gdje se postavljaju materijali za zapunjavanje bušotine. Optimalan učinak ispune zahtijeva izravan kontakt materijala za zapunjavanje i kanala bušotine.
- Zaštitne cijevi i cementni kamen u zoni odlaganja otpada moraju omogućiti toplinsku ekspanziju fluida i protok u okolnu stijenu kako bi se izbjegao preveliki tlak na dno kanala bušotine.

- Konstrukcija kanala bušotine mora biti takva da se omogući ispitivanje stijene prije samog postavljanja spremnika s otpadom.
- Bušotina i ugrađene zaštitne cijevi moraju imati dovoljnu stabilnost i trajnost kako bi po potrebi omogućili izvlačenje spremnika s otpadom tijekom operativnog perioda.

3.3. Spremnici otpada

Spremnici u kojima se nalaze gorivni elementi ili drugi visoko radioaktivni otpad ključna su komponenta dizajniranog sustava barijera. Spremnici izravno štite otpad od mehaničkog utjecaja, izlaganja okolini, dodira s drugim fluidima koji otapaju otpad i pospješuju migraciju radionuklida. Iako će radionuklidi oslobođeni iz oštećenog spremnika vrlo vjerojatno ostati unutar bušotine zbog višeslojnog sustava barijera (zapunjene bušotine), poželjno je koristiti spremnike koji će biti dugotrajni. Preporuča se da spremnici budu izrađeni od legura materijala koji su visoko otporni na koroziju (npr. legure nikala, kroma, molibdena), te su stabilni pri visokim temperaturama koje se očekuju u bušotini. Povećanjem temperature, smanjuje se korozijska otpornost. Prije odlaganja u bušotinu, spremnici se po površini premazuju tankim slojem koji povećava otpornost na koroziju. Za spremnik koji je izrađen od odgovarajućih materijala, debljine stijenke od 1 cm potrebno je najmanje 50 000 godina da se razgradi korozijom (Payer et al., 2019).

Dizajn spremnika otpada i postupci rukovanja njime moraju osigurati visoku razinu sigurnosti kako bi radioaktivni otpad ostao zadržan unutar spremnika cijelo vrijeme od površinskog manevriranja pa sve do spuštanja u bušotinu i konačnog postavljanja spremnika u zonu odlaganja. Uz to, sva površinska rukovanja spremnicima s otpadom moraju biti u skladu s predloženim radiološkim, zdravstvenim i sigurnosnim standardima na radu.

Hidrostatski tlak na spremnike otpada će ovisiti o dubini i gustoći fluida koji se nalazi u bušotini. Gustoća fluida će ovisiti o salinitetu i temperaturi koji također ovise o dubini. Sastav fluida unutar kanala bušotine može se kontrolirati prije postavljanja spremnika. Proračunom je utvrđeno da je maksimalni očekivani tlak na dno kanala bušotine 57 MPa (8 250 psi), za gustoću isplake od $1\,160\text{ kg/m}^3$ na dubini od 5 000 m, i taj se tlak koristi prilikom dizajniranja spremnika. Spremnici bi trebali biti povezani u nizove od 40 spremnika što bi iznosilo oko 200 m. Ukupna

masa jednog takvog niza bi iznosila otprilike nešto manje od 69 400 kg. Razvijena su dva dizajna spremnika s obzirom na temperaturne promjene i dubinu ugradnje. Niskotemperaturni spremnik s tanjim stijenkama je dizajniran za maksimalnu temperaturu od 160 °C, dok je visokotemperaturni spremnik s debljim stijenkama dizajniran za maksimalnu temperaturu od 300 °C. Treba imati u vidu da se čvrstoća čelika može značajno smanjiti s povećanjem temperature koja djeluje na spremnik (Arnold et al., 2011).

Spremnici otpada su dizajnirani na način da budu relativno jednostavni za upotrebu te da mogu izdržati određeni hidrostatički tlak bez unutarnje mehaničke potpore. Stijenke spremnika mogu izdržati maksimalni hidrostatički tlak od 57 MPa (8 250 psi). U tablici 3-1 su prikazane dimenzije niskotemperaturnih i visokotemperaturnih spremnika otpada.

Tablica 3-1. Dimenzije spremnika za odlaganje radioaktivnog otpada u bušotine (Arnold et al., 2011)

Vrsta spremnika	Unutarnji promjer (cm)	Vanjski promjer (cm)	Debljina stijenke (cm)
Niskotemperaturni	21,16	27,31	3,07
Visokotemperaturni	20,46	27,31	3,42

Spremnici bi se povezivali navojnim spojevima vanjskog promjera 0,30 m (11 3/4") koji imaju 5 navoja na 2,54 cm duljine navojnog spoja. Na vrhu niza od 40 spremnika bi se nalazio sigurnosni spoj s J-utorom koji bi povezivao bušaće šipke i niz spremnika. Kada se niz spremnika spusti na bušaćim šipkama na željenu dubinu odlaganja, rotacijom u suprotnom smjeru bi se odvojile bušaće šipke od spremnika. Bušaće šipke bi se izvukle na površinu i ponovno spustile u bušotinu novi niz spremnika. Postupak bi se ponavljao sve dok se zona odlaganja ne popuni željenim brojem spremnika.

Spremnici će biti zabrtvljeni varenjem iznad i ispod otpada. Donji var na spremniku bi se trebao zavariti prije postavljanja gorivnih šipki ili otpada u spremnik, dok bi se gornji var trebao zavariti nakon punjenja spremnika. Spremnici otpada će lako podnijeti tlačna opterećenja uzrokovana masom spremnika iznad, kao i vlačna opterećenja uzrokovana nizom spremnika tijekom spuštanja u kanal bušotine. Niskotemperaturni spremnici bi bili skloniji povećanim mehaničkim naprezanjima radi stijenke manje debljine (Arnold et al., 2011).

Mehanička robusnost spremnika bi trebala spriječiti bilo kakve posebne postupke tijekom pohranjivanja otpada, prijevoza ili pripreme za spuštanje u bušotinu. Nakon punjenja spremnika i zavarivanja, sva daljnja rukovanja bi se trebala odvijati u zaštićenom okruženju. Tijekom transporta napunjeni spremnici bi bili spremljeni u dodatnom pakiranju kako bi se spremnici zaštitili tijekom mogućih nesreća u prijevozu.

3.3.1. Tehnički zahtjevi dizajna spremnika za radioaktivni otpad

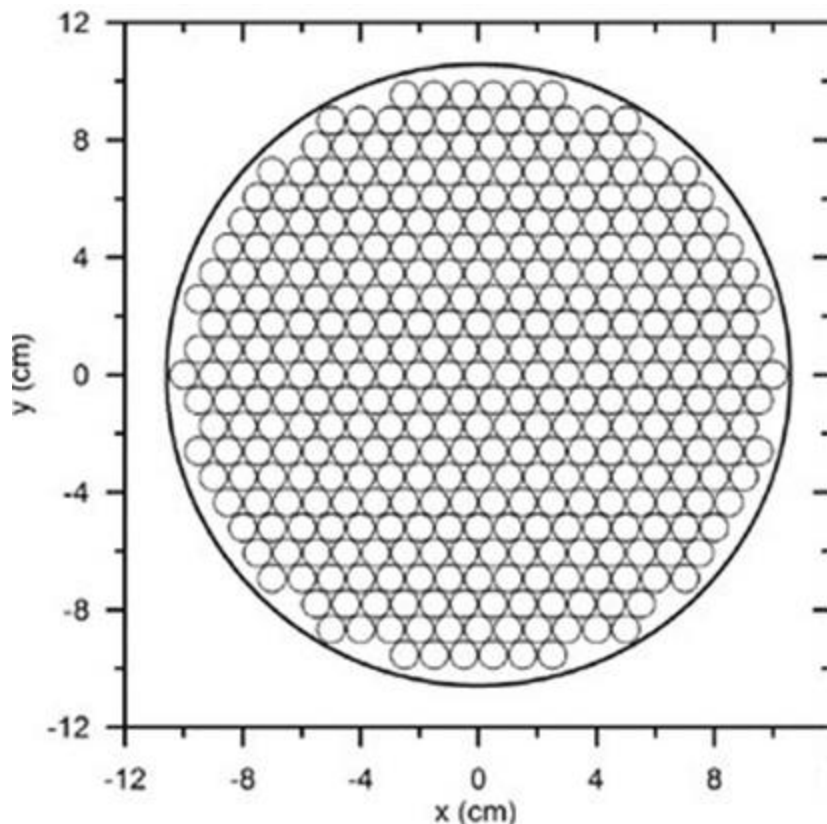
Tehnički zahtjevi prilikom dizajniranja spremnika su (Arnold et al., 2011):

- Dizajn spremnika otpada mora pružiti visoku razinu sigurnosti da ne bi došlo do propuštanja radioaktivnog otpada prilikom rukovanja i odlaganja spremnika u bušotinu. Varovi i brtve spremnika moraju spriječiti ispuštanje radionuklida bilo to u krutom, tekućem ili plinovitom stanju.
- Spremnici otpada moraju zadržati strukturalni integritet tijekom utovara, transporta i rukovanja prije samog spuštanja u bušotinu.
- Spremnici otpada moraju osigurati dovoljno visoku razinu sigurnosti da izdrže sva predviđena opterećenja kao i visoke temperature koje će na njih djelovati tijekom samog spuštanja u bušotinu i tijekom ostalih faza procesa.
- Spremnici moraju imati integrirani sustav za povezivanje s drugim spremnicima i s bušačim šipkama. Spojevi moraju imati dovoljnu čvrstoću da podnesu mehanička opterećenja tijekom i nakon spuštanja spremnika u bušotinu.
- Unutarnja duljina spremnika mora biti barem 4,2 m kako bi se u njega mogle pohraniti gorivne šipke.
- Dizajn, rukovanje i postavljanje spremnika otpada moraju isključiti bilo kakvu mogućnost nuklearne katastrofe.

3.3.2. Punjenje spremnika otpadom

Sustav punjenja spremnika istrošenim nuklearnim gorivom sastoji se od rastavljanja iskorištenih nuklearnih gorivnih elemenata u samom reaktoru ili na nekom drugom predviđenom postrojenju te postavljanjem pojedinačnih gorivnih šipki u spremnike za otpad. Iako takav postupak podrazumijeva veće troškove i napore pri punjenju spremnika, ipak omogućuje upotrebu spremnika manjeg promjera što znači izradu bušotine manjeg promjera uz manje rizika tijekom bušenja. Što je gustoća istrošenog nuklearnog goriva veća, to će rezultirati manjim brojem spremnika i potrebnih bušotina te nižim troškovima transporta, bušenja i odlaganja. Istraživanja su pokazala da je rastavljanje gorivnih elemenata na gorivne šipke tehnički izvedivo uz ponešto veće troškove, ali ti troškovi bi se nadoknadili uštedom na broju spremnika i troškovima izrade kanala bušotine. Mnogi nuklearni reaktori imaju postojeće objekte koji se mogu prilagoditi za demontažu gorivnih elemenata u bazenima za skladištenje. Uz to bi vjerojatno bili potrebni dodatni objekti koji bi služili za brtvljenje, zaštitu, zavarivanje i rukovanjem napunjenim spremnicima.

Gorivne šipke imaju cilindričan oblik promjera oko 1 cm i u spremnike se postavljaju u heksagonalnom načinu pakiranja. U niskotemperaturne spremnike se može pohraniti približno 367 gorivnih šipki dok se u visokotemperaturne spremnike, radi manjeg unutarnjeg promjera, može pohraniti oko 349 gorivnih šipki. Za usporedbu, standardni gorivni element sadrži 268 gorivnih šipki tako da pohranjivanje šipki u niskotemperaturne spremnike povećava kapacitet odlaganja za 37%. Procjenjuje se da bi za odlaganje ukupne količine istrošenog nuklearnog goriva u Sjedinjenim Američkim Državama bilo potrebno oko 700 bušotina koristeći se metodom rastavljanja gorivnih elemenata i pohranjivanja gorivnih šipki u spremnike. Dok bi za odlaganje netaknutih gorivnih elemenata bilo potrebno oko 950 bušotina (Arnold et al., 2011). Raspored pakiranja gorivnih šipki u niskotemperaturnom spremniku je prikazan na slici 3-3.



Slika 3-3. Raspored pakiranja gorivnih šipki u niskotemperaturnom spremniku (Arnold et al., 2011)

Spremnici su također namijenjeni za odlaganje visoko radioaktivnog otpada nastalog u nuklearnim reaktorima ili tijekom prerade korištenog nuklearnog goriva. Vitrificirani visoko radioaktivni otpad može se uliti kao rastopljeno staklo u čelične blokove koji bi se potom pohranili u spremnik. Treba imati na umu da je za takav način pohranjivanja otpada potreban ipak nešto veći promjer spremnika.

3.3.3. Spuštanje spremnika u bušotinu

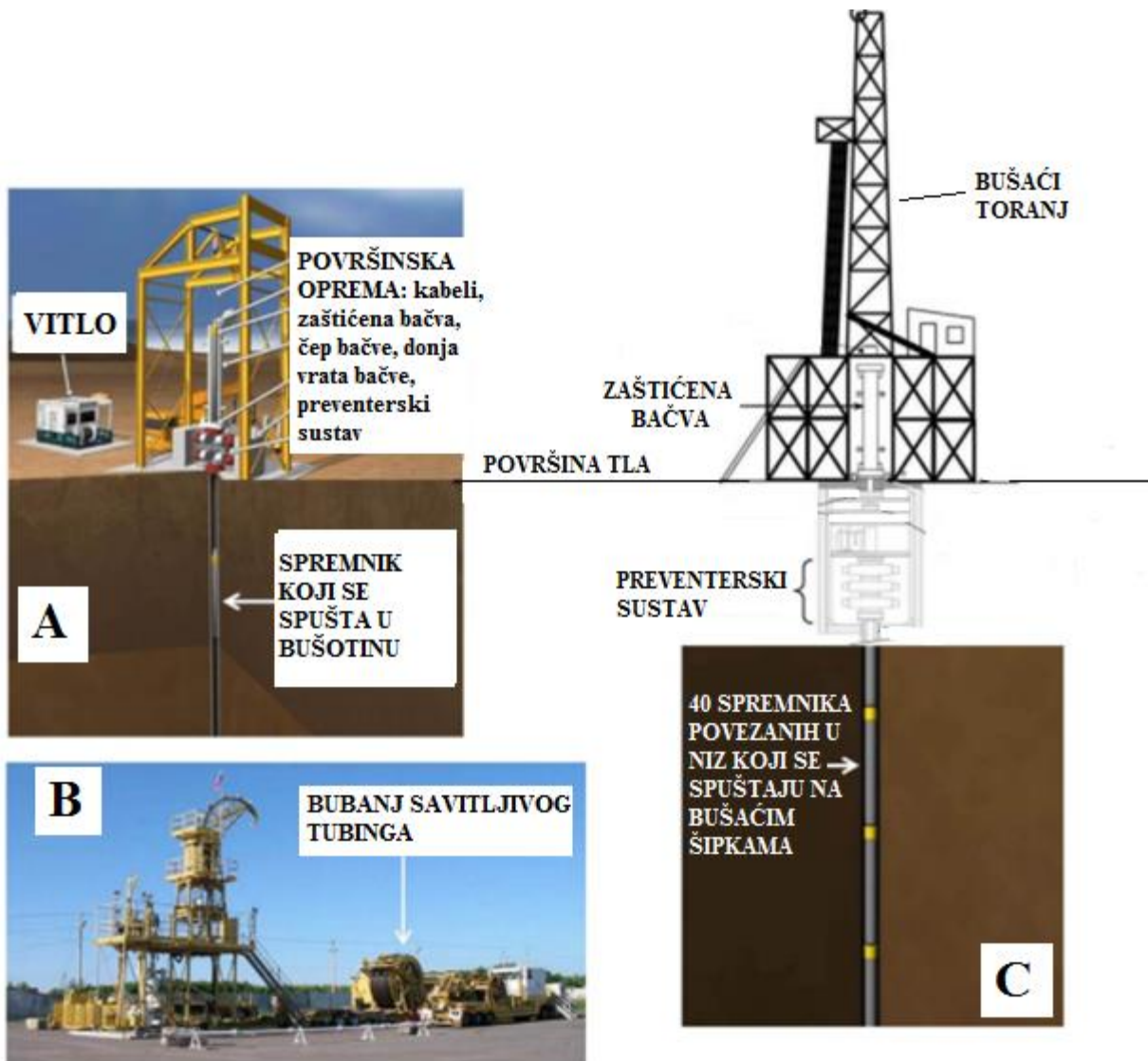
Spuštanje spremnika u bušotinu se mora obavljati uz visoku razinu pouzdanosti kako ne bi došlo do zaglave spremnika iznad zone odlaganja, curenja radioaktivnog materijala iz spremnika te uz uvjet da izloženost radnika radijaciji bude minimalna. Napunjeni spremnici otpada spremili bi se u bačve koje bi se prevozile do lokacije bušotine kamionima. Takve bačve bi pružale zaštitu radnicima i okolini tijekom transporta i sprječavale moguće ispuštanje goriva u slučaju nesreće. Postoje određeni modeli bačvi, s unutarnjim promjerom od 0,34 m (13,5"), koji su se koristili za transport pojedinačnih gorivnih elemenata. Stoga treba preispitati sigurnost takvog dizajna bačvi s obzirom da bi se koristile za transport težeg i radioaktivnijeg materijala. Potrebno će biti preoblikovati dizajn takvih bačvi kako bi se omogućilo postavljanje iznad kanala bušotine i spajanje sa bušačim šipkama za spuštanje u bušotinu.

Iako se očekuje da koncept odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine bude siguran i bez nesreća, posljedice slučajnog oštećenja spremnika tijekom spuštanja u bušotinu mogu biti vrlo skupe. Sanacija oštećenog spremnika mogla bi uključivati dekontaminaciju brojnih dijelova bušaće opreme kao i velikih količina radioaktivne isplake. Sukladno tome, spremnici i sustav za rukovanje i spuštanje otpada moraju biti dizajnirani s odgovarajućim faktorima sigurnosti koji premašuju standardne sigurnosne faktore koji se primjenjuju na naftnim postrojenjima.

Svojstva spremnika otpada moraju biti jedinstvena s obzirom da moraju izdržati silu uslijed djelovanja svih spremnika postavljenih iznad kao i tlak stupca fluida kojim je zapunjena bušotina. Spremnici mogu izdržati hidrostatički tlak ako su robusni i dizajnirani s više brtvenih elemenata. Također, mogu biti i manje robusni ako su napunjeni fluidom i opremljeni sustavom za izjednačavanje tlaka. Robusniji dizajn smanjuje mogućnost kontakta fluida i otpada i eliminira mogućnost da u slučaju nesreće fluid mobilizira kruti otpad.

Postoje razne metode postavljanja spremnika otpada u bušotinu (Cochran i Hardin, 2015):

1. spuštanje niza spremnika na bušačim šipkama,
2. spuštanje jednog ili nekoliko spremnika na savitljivom tubingu,
3. spuštanje jednog po jednog spremnika opremom na žici,
4. slobodni pad.



Slika 3-4. Usporedba različitih načina postavljanja spremnika u bušotinu: A) spuštavanje na žici, B) spuštavanje pomoću savitljivog tubinga, C) spuštavanje na bušaćim šipkama (Cochran i Hardin, 2015)

Spuštavanje niza spremnika na bušaćim šipkama - Ova metoda zahtijeva upotrebu standardnog bušaćeg ili remontnog postrojenja i relativno velik prostor na površini. Spuštavanje spremnika je nekontinuiran proces jer se svaka bušaća šipka mora posebno dodavati i spajati s prethodnom, a brzina spuštavanja je ovisna o visini tornja. Moderni bušaći tornjevi omogućavaju korištenje robotike i raznih automatiziranih sustava za rukovanje cijevnim alatima. Brzine spuštavanja variraju od 500 m/h do 1 000 m/h ovisno je li se radi o automatiziranom sustavu ili

konvencionalnom načinu koji uključuje bušaču posadu. Za koncept odlaganja otpada u duboke bušotine poželjno je da što više operacija bude automatizirano kako bi se smanjio broj ljudskih grešaka (Cochran i Hardin, 2015).

Spuštanje jednog ili više spremnika na savitljivom tubing - U posljednjih se nekoliko desetljeća primjena savitljivog tubinga proširila na brojne operacije: bušenje, opremanje bušotine, karotažna mjerenja i dr. Novi sustavi uključuju električne kabele koji prolaze kroz tubing i omogućuju prijenos podataka i izvršenje određenih naredbi. Ovaj sustav je široko rasprostranjen u naftnoj industriji i koristi se na dubinama znatno većim od 5 km. Brzine spuštanja spremnika mogu biti od 2 000 m/h do 3 000 m/h s mehanizmom za oslobađanje spremnika. Na površini bi se koristilo manje prostora, što bi bilo isplativije u odnosu na primjenu bušačeg tornja. Korištenjem ove metode rizik od izloženosti zračenju osoblja bio bi sveden na minimum.

Spuštanje jednog po jednog spremnika opremom na žici - Spuštanje spremnika opremom na žici je vrlo jednostavna metoda, ali njezina upotreba ograničila bi masu spremnika i pružila manje kontrole od prethodnih dviju metoda. Postoje dvije vrste kablova, a to su čelični kabeli i kabeli s električnim vodičima. Čelične kablove čine pletene žice različitih veličina i kontrola dubine spuštanja spremnika se održava na površini. Kabeli s električnim vodičima imaju mogućnost prijenosa podataka kako bi se točno mogla izmjeriti dubina te kontrolirati mehanizam koji omogućuje otpuštanje spremnika. Vitlo za namatanje žice (kabela) može ostvariti brzinu spuštanja i do 6 000 m/h, ali zbog djelovanja drugih čimbenika stvarna brzina će biti znatno manja. Ovakav sustav je dostupan s kombiniranim hidrauličkim dizalicama koje zahtijevaju malu površinu za postavljanje oko bušotine (Cochran i Hardin, 2015).

Slobodni pad - Ova metoda podrazumijeva spuštanje jednog po jednog spremnika koji pomoću gravitacijske sile putuju do dna bušotine. Brzina slobodnog pada ovisi o brojnim čimbenicima poput viskoznosti fluida koji se nalazi u bušotini i zazoru između spremnika i zaštitnih cijevi. Međutim, za koncept odlaganja otpada u duboke bušotine ne preporuča se primjena ove metode jer nema kontrole nad postavljanjem i postoji mogućnost oštećenja spremnika.

Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, ali postoji i velika razlika u troškovima između pojedinih metoda. Uglavnom, upotreba bušačeg postrojenja i velikog broja bušačkih šipki za spuštanje nizova spremnika znatno povećava mogućnost oštećenja spremnika ukoliko se bilo koji dio niza ispusti u bušotinu. Suprotno tome, spuštanje manjeg broja

spremnika, a posebno jedan po jedan, upotrebom lakše opreme poput savitljivog tubinga i opreme na kabelu smanjuje mogućnost oštećenja u slučaju slobodnog pada. Metoda slobodnog pada i spuštanja opremom na žici su zapravo slične po tome što se obje oslanjaju na tonjenje, s tim da je kod spuštanja na kabelu omogućeno lociranje spremnika u realnom vremenu ali i kontrola brzine spuštanja spremnika (Cochran i Hardin, 2015).

Kompanija Woodward-Clyde preporuča korištenje dva bušača tornja. Jedan standardni toranj za izradu bušotine, a drugi posebno dizajnirani toranj za postavljanje spremnika u bušotinu te njeno zapunjavanje i zatvaranje bušotine. Prednost ovakve metode je u tome da bušači toranj nakon završetka izrade jednog kanala bušotine može prijeći na izradu druge bušotine dok bi se istovremeno u prethodnoj bušotini spremnici spuštali na dno. No, bila bi potrebna dodatna kapitalna ulaganja u posebno dizajnirani toranj. Stoga je isplativije koristiti standardni bušači toranj za sve operacije koji je bolje opremljen za rješavanje nepredviđenih problema (Cochran i Hardin, 2015).

Spremnici otpada bi se postavljali u zonu odlaganja u nizovima od 40 spremnika ukupne duljine oko 192 m. Nakon što bi se niz spustio na željenu dubinu, bušaće šipke bi se odvojile pomoću J-utora kao što je prethodno objašnjeno. Prije spuštanja sljedećeg niza spremnika, postavili bi se mehanički čepovi i utisnula cementna kaša iznad spuštenog niza. Mehanički čep bi se trebao postaviti uz određeni razmak od posljednjeg dodanog spremnika kako bi se omogućilo diferencijalno toplinsko širenje čeličnih spremnika zbog topline koju stvara otpad. Primarna funkcija mehaničkog čepa je osigurati podlogu na kojoj se može smjestiti cementni čep veće duljine. Cementni i mehanički čep moraju zajedno podnijeti masu spremnika koji se nalaze iznad njih. Postoje brojne vrste mehaničkih čepova koji su komercijalno dostupni za upotrebu. Dva najčešće korištena su Weatherford PBP i TechTool visokotlačni cementni čep. Oba su dizajnirana da mogu izdržati temperature do 204 °C i da se mogu smjestiti unutar zaštitnih cijevi maksimalnog promjera 0,34 m (13 3/8") (Arnold et al., 2011).

3.4. Analiza troškova

Troškovi izrade kanala bušotine će varirati zbog više razloga, a jedan od razloga su varijacije u specifičnim tehničkim zahtjevima za izradu različitih bušotina. Tijekom izrade prvog kanala bušotine na nekoj lokaciji, puno će više vremena biti posvećeno ispitivanju i jezgrovanju nego pri izradi sljedeće bušotine na toj lokaciji. Također je moguće da se izradi kanal manjeg promjera kako bi se lakše provela ispitivanja. Te razlike imaju značajan utjecaj na troškove. Općenito, troškovi bušenja su nepredvidljivi jer se toliko puno parametara mijenja tijekom izrade različitih bušotina, a ponekad čak i u istom kanalu bušotine ali na različitim dubinama. U nastavku su opisani specifični parametri bušenja koji imaju velik utjecaj na cijenu bušotine.

Konstrukcija kanala bušotine je proces koji se obavlja postupkom nazvanim „*odozdo prema gore*“. Željena dubina zone odlaganja otpada određuje ukupnu duljinu bušotine, a vanjski promjer spremnika određuje promjer na dnu kanala bušotine. Gornji dio kanala se konstruira postavljanjem zaštitnih cijevi većeg promjera s obzirom na bušaće ili geološke zahtjeve. Zbog velikih potrebnih promjera bušotine, ugradnja zaštitnih cijevi i cementiranje čine relativno velik udio u troškovima. Mogućnost uklanjanja jednog niza zaštitnih cijevi imala bi značajan utjecaj na smanjenje troškova.

Važan utjecaj na troškove ima i zahtjev za izradu vertikalne bušotine bez većih odstupanja od vertikale. Iako je održavanje vertikalnosti kanala bušotine ponekad otežano, postoji više načina kako tijekom bušenja održati vertikalnost kanala bušotine unutar prihvatljivih granica. Odabrana metoda može imati velik utjecaj na cijenu bušotine i uspješnost ispunjavanja zahtjeva.

Bušenje kroz stijene velike tvrdoće zasigurno će stvoriti određene probleme. Ti problemi mogu biti manje značajni (gubitak manje količine isplake) i oni ozbiljniji (zaglava bušaćeg alata u kanalu bušotine). U mnogim slučajevima iskustvo bušenja u istovrsnim formacijama može pomoći pri pretpostavljanju sličnih problema, ali ponekad se mogu dogoditi i totalno neočekivani problemi.

Mnogi troškovi pripisani bušenju ovise o vremenu, prvenstveno vezano uz najam bušaćeg postrojenja i troškove servisnih kompanija. Stoga je vrlo korisno sve što ubrzava bušenje bez ugrožavanja sigurnosti i stabilnosti kanala bušotine. No, povećanje brzine bušenja (engl. *rate of penetration*) nije uvijek učinkovito zbog smanjenja radnog vijeka dlijeta i potrebe za češćim izvlačenjem alata. Tri parametra koja se mogu mijenjati za postizanje što boljeg

učinka su brzina bušenja, opterećenje na dlijeto i hidraulički parametri. Obično je potrebno određeno iskustvo za određivanje najbolje kombinacije tih parametara, pogotovo pri bušenju nepoznatih formacija. Povećanje radnog vijeka dlijeta i alatki znači smanjenje troškova zbog manje potrebe za izvlačenjem alatki iz kanala bušotine. To postaje još značajnije kako se buši u dubljim formacijama, s obzirom da bi izvlačenja niza alatki oduzimala više vremena. Tri čimbenika koja najviše utječu na životni vijek dlijeta i opreme su litološki profil podzemnih struktura koje se buše, bušači parametri i sklop alatki na dnu (engl. *bottom hole assembly*). Bušači inženjer nema gotovo nikakvu kontrolu nad litološkim profilom, dok kod preostala dva čimbenika može učiniti značajna poboljšanja koja bi se trebala odraziti na povećanje radnog vijeka dlijeta (Gibbs, 2010).

3.4.1. Troškovi bušenja i opremanja bušotine

U sljedećem primjeru uzete su u obzir tri bušotine za procjenu troškova izrade bušotine za trajno zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada. Za procjenu su korišteni prosječni troškovi u naftnoj industriji bez specifikacije određenog bušačeg tornja ili zaštitnih cijevi. Procjena bi trebala pokazati približne troškove prilikom izrade kanala bušotine te utjecaj pojedinih operacija na ukupne troškove. Pretpostavka je da tijekom bušenja nije bilo problema niti zastoja. U obzir su uzeti i troškovi za nepredviđene slučajeve u vrijednosti 15% od ukupnih troškova. Troškovi karotažnih ispitivanja i jezgrovanja uključeni su za bušotine A i B, a za bušotinu C samo troškovi karotaže. Dodatne naknade koje bi se trebale platiti servisnim kompanijama za navedene usluge nisu uzete u obzir. Bušotine koje su uzete u obzir u ovom primjeru su sljedeće (Arnold et al., 2011):

- A- Bušotina promjera 0,22 m (8 1/2") koja bi omogućila sva karotažna mjerenja, testiranja i jezgrovanja radi utvrđivanja uvjeta u bušotini. Zbog manjeg promjera, ne bi bilo moguće u nju odlagati otpad.
- B- Bušotina promjera 0,43 m (17"). Prvotno bi se napravila pilot bušotina promjera 0,31 m (12 1/4") kako bi omogućilo izvođenje karotažnih mjerenja i jezgrovanje. Potom bi se nakon završetka mjerenja, upotrebom dlijeta većeg promjera proširio kanal bušotine na promjer 0,43 m.

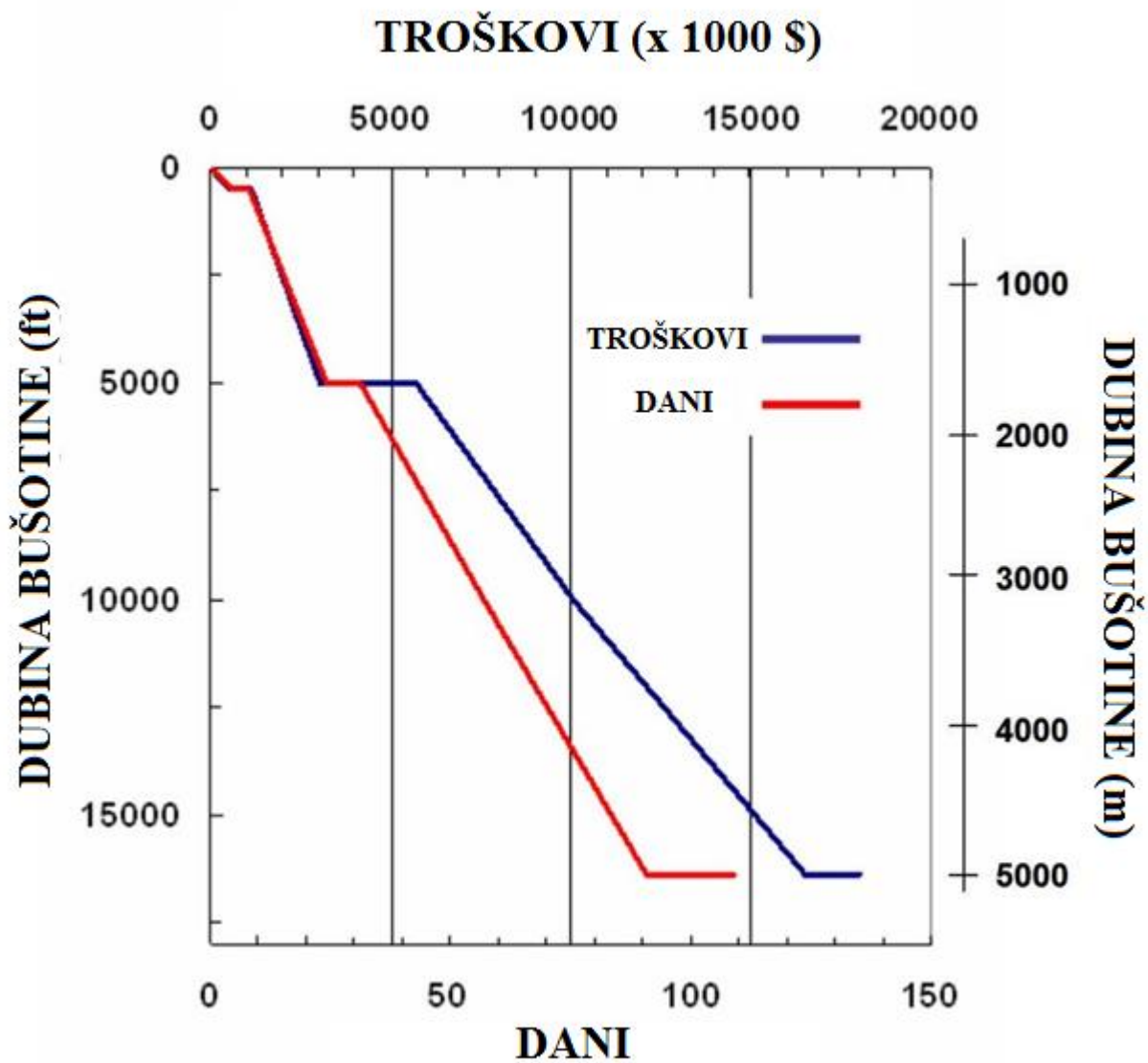
C- Bušotina promjera 0,43 m (17"), ali sa smanjenim brojem provedenih testiranja. Ne bi se provodilo jezgrovanje niti ispitivanja u bušotini (engl. *drill stem test - DST*) kao ni ostala testiranja za koja je potreban manji promjer bušotine (Arnold et al., 2011).

U tablici 3-2 prikazani su procijenjeni troškovi bušenja i opremanja bušotine.

Tablica 3-2. Procijenjeni troškovi bušenja i opremanja bušotine (Arnold et al., 2011)

Bušotina	A	B	C
Troškovi (\$)			
Bušenje	3 906 016	7 421 582	4 882 520
Izvlačenje alatki	2 446 664	5 905 986	3 058 330
Dlijeto	631 322	3 861 709	1 753 587
Sklop alatki na dnu	315 661	1 930 855	876 793
Isplaka	1 159 941	1 732 607	987 607
Zaštitne cijevi	1 183 200	4 777 425	4 777 425
Cementacija	1 729 329	3 130 529	3 130 529
Održavanje vertikalnosti	467 850	1 475 040	951 165
Karotažna mjerenja	845 000	1 006 250	1 006 250
Ušće bušotine	120 000	225 000	225 000
Ukupni intervalni troškovi (\$)	12 804 983	31 466 984	21 649 206
Nepredviđeni slučajevi (15%)	1 920 748	4 720 048	3 247 381
Ostali dodatni troškovi	1 800 000	4 415 625	2 400 000
Ukupna cijena bušotine (\$)	16 525 731	40 602 657	27 296 587
Ukupno potrebno vrijeme za izradu bušotine (dan)	160,7	211	139,2

Na slici 3-5 prikazan je odnos troškova izrade bušotine i broja dana s obzirom na dubinu.



Slika 3-5. Odnos troškova i broja dana s obzirom na dubinu (Brady et al., 2009)

3.4.2. Troškovi spremnika za skladištenje otpada i njihovog punjenja

Troškovi rastavljanja gorivnih elemenata variraju od 3,24 \$ do 12,38 \$ po kilogramu gorivnog elementa. Niži troškovi se očekuju u centraliziranim postrojenjima, dok se viši troškovi očekuju za rastavljanje gorivnih elemenata u reaktorima ili bazenima. S obzirom na značajnu razliku u troškovima rastavljanja gorivnih elemenata, izgradnja centraliziranog postrojenja bi bila dobra odluka za smanjenje ukupnih troškova.

U tablici 3-3 prikazani su procijenjeni troškovi spremnika otpada i njihovog punjenja. Puno je nedoumica oko pojedinih iznosa s obzirom na specifičnost samog postupka zavarivanja i potrebne robotske opreme. Također, pregled varova nakon punjenja spremnika može zahtijevati specijalizirane metode zbog jakog zračenja oko spremnika. Zavarivanje i inspekcija prvog (donjeg) čepa spremnika bi se provodila prije punjenja. Grubom procjenom došlo se do iznosa od 1 000 \$ za zavarivanje i 1 000 \$ za inspekciju varova po spremniku. U proračunu je uzeto u obzir da bi se u bušotini nalazilo 400 spremnika otpada (Gibbs, 2010).

Tablica 3-3. Troškovi spremnika otpada i njihovog punjenja (Gibbs, 2010)

Vrsta troška	Cijena po spremniku (\$)	Cijena po bušotini (za cca 400 spremnika) (\$)
Materijali za izradu spremnika	7 750	3 100 000
Navojni spojevi	1 500	600 000
Rastavljanje gorivnih elemenata i punjenje spremnika	7 824	3 129 600
Zavarivanje spremnika	1 000	400 000
Inspekcija varova	1 000	400 000
Ukupno	19 074	7 629 600

3.4.3. Troškovi spuštanja spremnika u bušotinu i ugradnje čepova

Troškovi povezani sa spuštanjem otpada u bušotinu uključuju rukovanje spremnicima na površini, spajanje više spremnika u niz, spuštanje niza spremnika u zonu odlaganja, te postavljanje cementnih i mehaničkih čepova između nizova spremnika. Procjena troškova transporta spremnika je izvan opsega ove studije i nije razmatrana u analizi, iako bi predstavljala značajnu komponentu. Međutim, ti troškovi bi značajno varirali s obzirom na različite udaljenosti lokacije bušotine od nuklearnog reaktora ili centraliziranog postrojenja.

Procjene troškova prikazani u tablici 3-4 temelje se na sljedećim pretpostavkama (Gibbs, 2010):

- Dnevni najam bušačkog postrojenja iznosi 75 000 \$. Osim za bušenje, postrojenje će se koristiti i za spuštanje spremnika u bušotinu.
- Iskrcavanje bačve s kamiona i spajanje spremnika s nizom spremnika trajalo bi u prosjeku 30 minuta.
- Potrebno je 10 spuštanja i podizanja alata iz bušotine kako bi se svi spremnici odložili, te 10 spuštanja i podizanja za postavljanje cementnih i mehaničkih čepova.
- Spuštanje spremnika otpada u bušotinu bi se odvijalo pomoću bušačkih šipki, dok bi se mehanički čepovi spuštali opremom na žici.
- Troškovi postavljanja cementnih i mehaničkih čepova procjenjuju se na približno 10 000 \$ po setu.

Tablica 3-4. Troškovi spuštanja spremnika u bušotinu i ugradnje čepova (Gibbs, 2010)

Operacija (Radni zahvat)	Vrijeme postavljanja (h)	Cijena po bušotini (\$)
Površinsko rukovanje i spajanje niza spremnika	200	625 000
J-utor	-	135 000
Spuštanje niza spremnika	240	750 000
Ugradnja mehaničkih čepova	60	187 500
Postavljanje cementnih čepova	300	937 500
Cementni i mehanički čepovi	-	140 000
Ukupno	800	2 775 000

Troškovi zapunjavanja bušotine iznad zone odlaganja uključuju materijalne troškove i vrijeme. Iako točan dizajn za postavljanje brtvenih elemenata nije preciziran, pretpostavka je da će brtveni elementi spuštati na žici u određenim segmentima. Cementni čepovi postavljali bi se utiskivanjem cementne kaše kroz bušaće šipke. Ukupni trošak zapunjavanja zacjevljene i nezacjevljene zone iznosio bi oko 2 450 146 \$ po bušotini (Gibbs, 2010).

3.4.4. Ukupni troškovi

Analiza prethodno izračunatih troškova uključuje sve glavne elemente koncepta odlaganja otpada u duboke bušotine, osim prijevoza otpada. Postoje brojne nesigurnosti u analizi zbog mogućih alternativnih izbora dizajna koji se mogu koristiti u razvoju ovog koncepta, svojstvenih promjena u konstrukciji bušotine, nesigurnosti u regulatornim zahtjevima za ispitivanja i sl. Bez obzira na to, analiza predstavlja najopsežniji pregled troškova, omogućava usporedbu pojedinih troškova različitih operacija te daje grubu predodžbu o troškovima za pilot projekt.

Kao što je i bilo za očekivati, najveći dio troškova odnosi se na bušenje i zacjevljenje bušotine. Drugi najveći trošak vezan je za spremnike otpada i njihovo punjenje otpadom. Dok su za odlaganje spremnika i brtvljenje potrebni nešto manji troškovi. S obzirom da bi se u bušotinu odložilo 400 spremnika otpada napunjenih gorivnim šipkama, ukupna količina gorivnih elemenata koji bi se odložili u jednu bušotinu bi iznosila oko 253 tone. To bi značilo da bi odlaganje 1 kg gorivnog elementa koštalo oko 158 \$. Uz pretpostavku da bi se radilo kontinuirano i neprekidno, bilo bi potrebno oko 186 dana za sve navedene operacije (Arnold et al., 2011). U tablici 3-5 su prikazani ukupni troškovi.

Tablica 3-5. Ukupni troškovi

Operacija	Troškovi po bušotini (\$)
Bušenje i opremanje bušotine	27 296 587
Spremnici otpada i njihovo punjenje	7 629 600
Spuštanje spremnika	2 775 000
Zapunjavanje bušotine i brtvljenje između pojedinih sekcija spremnika	2 450 146
Ukupno	40 151 333

3.5. Osiguranje i nadzor operativne sigurnosti

Sigurnost tijekom odlaganja otpada bi se osigurala rutinskim nadzorom i predviđanjem potencijalnih neželjenih uvjeta ili događaja. Radiološko nadgledanje uključivalo bi mjerenje radijacije svim radnicima i posjetiteljima tijekom transporta otpada. Također bi se i sva oprema rutinski pregledavala zbog moguće kontaminacije. Mjerenje radijacije oko bušačkog tornja u realnom vremenu bi bilo spojeno s alarmnim sustavom tijekom odlaganja otpada. Također bi se nadzirala i isplaka te bi se povremeno uzorkovala za analizu te provjeru koncentracije radionuklida.

Jedan od neplaniranih scenarija koji bi svakako stvorio probleme je zaustavljanje spremnika s otpadom na nekoj dubini plićoj od zone odlaganja. No, mnoge mjere u ovom konceptu čine takav scenarij teško ostvarivim. Tijekom spuštanja otpada na dno, bušotina će biti u potpunosti zacijevljena. Prije spuštanja otpada, zaštitne cijevi će se pregledati pomoću kalipera kako bi se otkrila moguća odstupanja unutarnjeg promjera, otkrila eventualna odstupanja zaštitnih cijevi od pravocrtnosti ili otkrivanja bilo kakve druge prepreke koja bi mogla uzrokovati zaglavu spremnika. Ispitivanja formacije prije spuštanja spremnika pružit će informacije o mogućim deformacijama koje mogu potencijalno stvarati probleme. Postoji mogućnost da se postavi jednokratni kaliper na najniži spremnik u nizu te se tako dobiju mjere unutarnjeg promjera zaštitnih cijevi u realnom vremenu pomoću telemetrijskog sustava. Ako bi se uočila potencijalna prepreka, spuštanje niza bi se zaustavilo. U slučaju da se niz spremnika zaglavi u bušotini, bušači toranj bi povukao, pogurao ili rotirao niz kako bi se oslobodio iz zaglave. Ukoliko se niz ne može osloboditi, a nalazi se u zoni odlaganja, tada se iznad niza postavljaju cementni i mehanički čepovi te se nastavlja sa spuštanjem sljedećeg niza. Ukoliko se niz zaglavi u području iznad zone odlaganja i ne može se osloboditi, tada bi se bušotina zapunila, zatvorila i napustila. Za otpad koji zaglavi na dosta plićoj dubini, primjenjivale bi se druge metode vađenja.

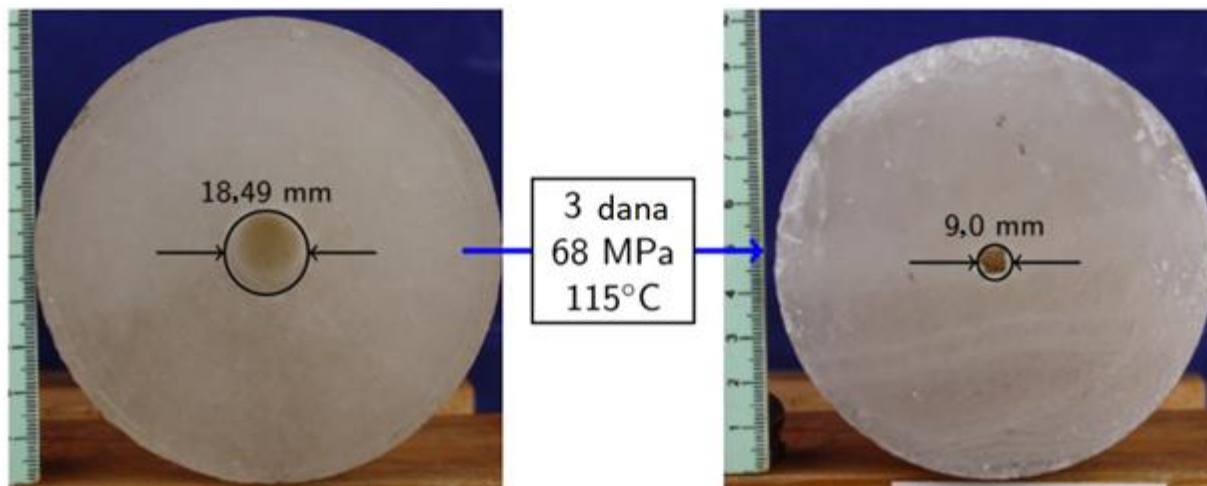
Drugi potencijalni scenarij nesreće je prerano otpuštanje niza spremnika tijekom spuštanja pri čemu bi niz pao na dno. Spremnici bi mogli puknuti pri udaru o dno bušotine ako bi brzina pada niza bila dovoljno velika. Postoji posebni sustav automatski aktivirajućih cilindara koji bi uhvatili spremnike ukoliko bi počeli klizati i padati sa samog vrha bušotina. Nadalje, najveća brzina pada niza spremnika ovisit će o viskoznosti fluida koji se nalazi u bušotini te o zazoru između spremnika (i njihovih spojnica) i unutrašnjosti kanala bušotine i

zaštitnih cijevi. Uz pretpostavku da je vanjski promjer niza spremnika jednak cijelom duljinom (0,273 m), najveća brzina koju bi niz postigao je oko 4 m/s. Uz tako relativno malu brzinu padanja, spremnici vjerojatno ne bi pukli pri udaru o dno bušotine. Izneseni podaci odnose se na konkretni promjer spremnika i kanala bušotine te fluid u kanalu bušotine određenih svojstava.

Otkrivanje prekomjernog zračenja uzrokovano bilo kojim od prethodno opisanih scenarija značilo bi obustavu svih operacija odlaganja otpada. Uz to, na površini bi se trebali nalaziti spremnici za sigurno skladištenje svih kontaminiranih fluida iz bušotine (Arnold et al., 2011).

3.6. Formacije pogodne za odlaganje otpada

Osim već spomenutih kristaliničnih stijena, naslage soli se nameću kao jedan od ozbiljnih kandidata za odlaganje otpada u njima. U kristaliničnim stijenama je moguće očekivati kontakt između otpada i podzemnih voda, dok je kod solnih formacija to gotovo nemoguće. Solne dome imaju najveći izolacijski potencijal i već godinama se razmatraju kao jedna od opcija za odlaganje visoko radioaktivnog otpada. Njihova prosječna debljina je oko 3-4 km, a širina 1-2 km te bi to predstavljalo odličnu barijeru oko otpada. U njima nema pukotina, nema povezanih pora, a sadržaj vode iznosi ispod 0,5%. Dodatna prednost solnih formacija je puzanje soli (engl. *salt creep*) koji je kontinuiran i spor proces, ali djelotvoran. Puzanje soli može zatvoriti sve bušotine i zabrtviti svaki prostor oko spremnika otpada bez pristupa fluidima. Što je veća dubina, to je veća temperatura i bit će veće puzanje soli. Na slici 3-6 prikazan je primjer djelovanja puzanja soli. Na lijevoj slici se nalazi solna formacija kroz koju je izbušena bušotina promjera 18,49 mm, dok se na desnoj slici nalazi taj isti primjerak nakon 3 dana djelovanja ležišnih uvjeta na dubini od 3 000 m (tlak od 68 MPa i temperatura od 115 °C). Iz ovog primjera je uočljivo da se promjer bušotine za samo 3 dana smanjio dvostruko što znači da bi solne formacije izvršno zabrtvile prostor oko spremnika (Minkley i Luedeling, 2016).



Slika 3-6. Primjer djelovanja puzanja soli (Minkley i Luedeling, 2016)

4. ISTRAŽIVANJA AMERIČKOG MINISTARSTVA ENERGETIKE

Američko ministarstvo energetike (engl. *The U.S. Department of Energy - DOE*) započelo je 2009. godine s tehničkim i znanstvenim istraživanjima vezanim za odlaganje visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine i razvojem koncepta. Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine postoji već desetljećima, te su također Švedska i Velika Britanija bile zainteresirane za njegovu primjenu. Švedska kompanija SKB je zaključila da odlaganje otpada u duboke bušotine nije realna alternativa pogodnim plitkim geološkim odlagalištima te da je glavni problem koncepta manjak znanja o stvarnim geološkim, hidrogeološkim i geokemijskim uvjetima na velikim dubinama. Također su došli da zaključka da se spremnici mogu zaglaviti u bušotini i oštetiti prije nego dospiju do željene dubine, a time bi došlo do ispuštanja radionuklida u podzemne vode. Britanski NIREX otkrio je dva aspekta koji zahtijevaju temeljitu procjenu: toplinsko i hidrauličko okruženje oko zone odlaganja te inženjerski zahtjevi tijekom izrade bušotine i rukovanja spremnicima. Nakon pregleda koncepta, u obje zemlje je preporučeno da se koncept ne primjenjuje nego da se otpad odlaže u pogodne plitke geološke formacije. U 2012. godini američko ministarstvo energetike je preporučilo da se i dalje razvija i istražuje takav koncept kako bi se pomoglo pri rješavanju određenih problema te da se dobije sveobuhvatna procjena izvedivosti. Američko ministarstvo energetike je planiralo 2016. godine testna ispitivanja u bušotinama blizu mjesta Rugby u Sjevernoj Dakoti. To je uključivalo izradu dvije bušotine dubine 5 km u geološki stabilnoj formaciji. Prva bušotina bi imala promjer na dnu 0,216 m (8 1/2") što bi olakšalo karotažna ispitivanja radi utvrđivanja petrofizikalnih svojstava stijena uokolo kanala bušotine. Druga bušotina bi bila izrađena na udaljenosti od samo nekoliko stotina metara od prve bušotine i imala bi promjer 0,432 m (17"). U nju bi se spuštao prototip spremnika otpada kako bi se testirao sustav za rukovanje otpadom na površini i sustav za spuštanje i vađenje spremnika iz bušotine. Međutim, u testiranjima se ne bi koristio radioaktivni otpad (NWTRB, 2016).

Američko ministarstvo energetike je zaključilo da su sljedeće vrste otpada pogodne za odlaganje u duboke bušotine:

- kapsule cezija i stroncija;
- neobrađeni kalcinirani visoko radioaktivni otpad;
- otpadne soli nastale elektrometalurškom obradom goriva koje bi se mogle pakirati u

male spremnike nakon proizvodnje;

- istrošeni nuklearni otpad koje se trenutno čuva u bazenima s vodom u laboratorijima u Idaho i Južnoj Karolini.

Američko ministarstvo energetike je zaključio da se svi navedeni oblici otpada također mogu smjestiti u plitka geološka odlagališta i rudnike. Međutim, pretpostavlja se da bi koncept odlaganja u duboke bušotine pružio mogućnost bržeg odlaganja otpada nego što bi to bilo moguće u rudnicima i plitkim geološkim odlagalištima (NWTRB, 2016).

4.1. Tehnička procjena američkog odbora za tehnički pregled nuklearnog otpada

Američki odbor za tehnički pregled nuklearnog otpada (engl. *The U.S. Nuclear Waste Technical Review Board- NWTRB*) proveo je istraživanje u okviru kojeg su razmatrana :

- Tehnička i znanstvena pitanja koja mogu utjecati na izvedivost koncepta odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine.
- Mogućnost da rezultati dobiveni ispitivanjima koja su provedena u testnoj bušotini pruže potrebna tehnička i znanstvena rješenja koja će potvrditi procjenu američkog ministarstva energetike o izvedivosti koncepta.

Nakon istraživanja, doneseni su sljedeći sveobuhvatni zaključci (NWTRB, 2016):

- Dostupne procjene ne ukazuju na bilo kakvo značajno poboljšanje u dugotrajnoj sigurnosti odlaganja otpada u duboke bušotine u odnosu na odlaganje u plitka odlagališta i rudnike. Iako bi duboke bušotine mogle pružiti mogućnost zbrinjavanja određenih vrsta otpada kojima upravlja američko ministarstvo energetike, sve vrste otpada koje se razmatraju također se mogu odlagati i u plitkim odlagalištima otpada i rudnicima. Mnogi otpadi koji imaju velik volumen, poput vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada, nisu pogodni za odlaganje u duboke bušotine s obzirom na tehnička ograničenja promjera kanala bušotine. Prema tome, odlaganje otpada u duboke bušotine ne eliminira potrebu za odlaganjem u plitke geološke formacije i rudnike.
- Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine mogao bi biti vrlo složen i zahtijevati prikupljanje različitih vrsta podataka i određena ispitivanja. Međutim, nedostatak

predstavlja otežan pristup zoni odlaganja u bušotini s ciljem karakterizacije stijene u odnosu na znatno lakši pristup pomoću tunela u plićim rudnicima. Također, nisu pronađeni nikakvi uvjerljivi dokazi koji mogu potvrditi da se odlaganje otpada u duboke bušotine može izvršiti brže od odlaganja u plitke geološke formacije. Obje metode proći će kroz poduži postupak izrade propisa, odabir lokacije, prikupljanje i analize podataka, dobivanja licenci i izgradnje.

- Ispitivanja provedena u testnim bušotinama i procjena izvedivosti koncepta nastoje potvrditi sljedeće pretpostavke:
 - radionuklidima je potrebno dosta vremena da dođu do izvora pitke vode zbog velike udaljenosti i male propusnosti stijene;
 - povećavanje saliniteta s dubinom smanjuje mogućnost brzog kretanja vode prema gore; te
 - promjena kemijskih uvjeta na dnu smanjila bi topljivost i pokretljivost određenih radionuklida.

Strategija operativne sigurnosti za operacije bušenja i postavljanja spremnika koji uključuju radioaktivni materijal značajno se razlikuje u odnosu na operacije koje uključuju materijal koji nije radioaktivan. Stoga je vrlo važno uzeti u obzir ograničenja tijekom rukovanja i odlaganja visoko radioaktivnog otpada i razmotriti kako bi se to simuliralo tijekom ispitivanja u testnoj bušotini. Operativne implikacije i ograničenja mogli bi utjecati na procjenu izvedivosti odlaganja otpada u duboke bušotine.

4.2 Specifične preporuke

Jasno je da će biti potrebno puno vremena i truda kako bi se u potpunosti procijenio koncept odlaganja u duboke bušotine. Po mišljenju američkog ministarstva energetike, tijekom ispitivanja u testnoj bušotini trebalo bi pažljivo razmotriti ključne parametre i informacije koje bi bile potrebne za potpunu procjenu izvedivosti koncepta. To bi pružilo osnovu za dodatno planiranje uključujući definiranje specifičnih tehnoloških i znanstvenih ciljeva te dobivanje šireg raspona podataka. Specifične preporuke američkog ministarstva energetike (DOE) su:

- *Samostalan pregled stručnjaka* –Odabrani način bušenja i provedbu programa trebaju

analizirati stručnjaci s velikim iskustvom u bušenju i sličnim operacijama (karotažna ispitivanja, opremanje bušotine) kao i stručnjaci za rukovanje visoko radioaktivnim otpadom. Ti stručnjaci bi trebali biti neovisni o izvođaču ispitivanja te bi trebali biti u mogućnosti nadgledati napredak projekta i o njemu izvijestiti ministra energetike.

- *Sveobuhvatna analiza rizika* - Potrebno je provesti opsežnu analizu rizika za sve aspekte bušenja i postavljanja spremnika kao dio procjene izvedivosti koncepta. Konkretno, potrebno je provesti analizu koja će pokazati mogućnosti koje će biti dostupne u slučaju nesreće tijekom odlaganja spremnika s otpadom u bušotine i implikacije takve nesreće zbog potrebe izolacije oštećenih spremnika i sanacijskih postupaka. Također bi trebala biti dovršena transparentna i sveobuhvatna procjena mogućih načina postavljanja spremnika, uključujući njihove apsolutne i relativne rizike.
- *Geofizička karakterizacija podzemlja prije bušenja* - Prije bušenja testne bušotine treba provesti površinska geofizička ispitivanja koja bi pomogla pri opisivanju podzemne strukture. Ta bi mjerenja mogla pomoći u planiranju bušenja.
- *Robusni oblici otpada i spremnika* - Potrebno je analizirati potencijalne sigurnosne prednosti korištenja robusnijih oblika otpada i spremnika kao dio procjene izvedivosti koncepta;
- *Razvoj strategije operativne sigurnosti* – Potrebno je razviti strategiju operativne sigurnosti za testnu bušotinu koja uključuje konvencionalne procese tijekom bušenja i daljinsko upravljanje visoko radioaktivnim materijalima. To može uključivati naglašavanje upotrebe inženjerskih kontrolnih mehanizama (npr. automatizirana oprema za zaštitu radnika) nad administrativnim kontrolama tj. procesima koji se oslanjaju na radnje i postupke osoblja. Ispitivanja na testnoj bušotini trebala bi simulirati provedbu koncepta kao da se postavlja "pravi" radioaktivni otpad kako bi se ispitale značajke strategije operativne sigurnosti koja se može primijeniti na budućoj bušotini i koja može pružiti osnovu za osiguranje sigurnog rada, ograničavanja izloženosti radnika opasnostima ili ispuštanje radioaktivnog materijala u okoliš i ublažavanje rizika odlaganja otpada;
- *Transparentan put od testiranja do postavljanja spremnika u bušotinu* - Ispitivanja u testnoj bušotini trebaju se koristiti kako bi se steklo iskustvo vezano uz postavljanje spremnika u kanal bušotine. Američko ministarstvo energetike bi trebalo početi

uključivati nove standarde transparentnosti i pristup podacima, te bi se trebali istražiti načini za uključivanje novih sudionika;

- *Glavni znanstvenik zadužen za program testne bušotine* - Tijekom ispitivanja u testnoj bušotini potrebno je angažirati glavnog znanstvenika koji će biti odgovoran za integriranje inženjerskih aktivnosti tj. bušenje testne bušotine te postavljanje i uklanjanje otpada. On bi trebao imati širinu u znanstvenom smislu kako bi se osiguralo cjelovito prikupljanje svih podataka koji su neophodni za procjenu izvedivosti ovog koncepta (NWTRB, 2016).

5. MOGUĆNOST PRIMJENE KONCEPTA ODLAGANJA OTPADA U DUBOKE BUŠOTINE U ISTOČNOJ AZIJI

Postoji nekoliko mogućnosti primjene koncepta odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva u duboke bušotine u Istočnoj Aziji. Jedna mogućnost podrazumijeva da svaka država koja ima nuklearni program razvije svoj vlastiti sustav za odlaganje u duboke bušotine. Takav način bi minimalizirao potrebu za transportom istrošenog nuklearnog goriva i drugih radioaktivnih materijala. Uspostavljanje nacionalnih objekata daje svakoj državi kontrolu nad nuklearnim otpadom tijekom cijelog ciklusa, ali se propušta mogućnost za jačanje povjerenja između susjednih zemalja. Države bi vjerojatno bile manje otvorene za mogućnost prihvaćanja otpada od drugih zemalja koje imaju manje količine otpada. Iako još nije jasno koliko bi svaku pojedinu državu koštala izgradnja takvog objekta, vjerojatno bi troškovi bili veći nego da se izgradi jedan zajednički veliki objekt. Izgradnja takvih objekata u svakoj državi značilo bi da se ne bi velike količine otpada odlagale na jedno mjesto, što je prednost. S druge strane, nedostatak bi bio taj što bi se mnogo različitih lokacija moralo zabilježiti i nadzirati u budućnosti (Hippel i Hayes, 2010).

Druga mogućnost je da se u svakoj zemlji s nuklearnim programom izgrade objekti za odlaganje u duboke bušotine, ali da se rukovanje i odlaganje obavlja pod nadzorom međunarodnog tijela kao što je Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) i uz sudjelovanje predstavnika drugih zemalja iz regije. Takav nadzor bi osigurao dodatnu sigurnost da se sav otpad odlaže na adekvatan način i da se ne preusmjerava u svrhe oružja. Koordinacija takvim objektima učinila bi koncept nešto težim i skupljim za implementaciju jer bi se moralo konzultirati sa svim drugim zemljama.

Sljedeća opcija uključuje izgradnju međunarodnih objekata u zemljama koje posjeduju nuklearno oružje i članice su Vijeća sigurnosti UN-a (engl. *United Nations Security Council*), iako postoji teoretska mogućnost da se otpad smjesti u SAD, ali iz mnoštva razloga takav način nije praktičan. Takav način značio bi vjerojatno odlaganje otpada u Kini ili u Rusiji na Dalekom istoku na rijetko naseljenim područjima koja mogu biti geološki prikladna, iako bi se u Kini nuklearni materijal trebao prevoziti kroz područja s relativno velikom populacijom. Prednost je ta što se ne bi gradili objekti u svakoj državi posebno pa bi troškovi bili znatno manji, te smještanje otpada na centralizirano mjesto omogućava lakše nadgledanje i sigurnost da se radioaktivni materijali neće širiti svugdje. Nedostatak bi predstavljala nesuglasnost drugih

zemalja da svoj nuklearni otpad smjeste u države koje imaju nuklearno oružje, ali i socijalni i politički problemi oko prihvaćanja otpada od drugih država.

Sljedeća ideja podrazumijeva izgradnju jednog ili više međunarodnih objekata za odlaganje otpada u duboke bušotine u zemlji koja ne posjeduje nuklearno oružje. To bi mogla biti neka od država sa značajnim nuklearnim programom poput Japana i Tajvana. Mogućnost smještanja radioaktivnog otpada u te zemlje mogu spriječiti velika gustoća naseljenosti, ograničene mogućnosti smještanja velikih objekata za odlaganje otpada, socijalna i politička stajališta. Alternativu bi mogle predstavljati zemlje bez trenutnih programa nuklearne energije s malom gustoćom naseljenosti i prikladnom geologijom poput Mongolije ili čak Australije. Ali dugačak transport brodovima radioaktivnog materijala bi svakako predstavljao prepreku. Prednost izgradnje centraliziranog objekta u zemlji koja ne posjeduje nuklearno oružje jest taj da bi takav projekt bio zaista međunarodni, bez dominacije države domaćina s nuklearnim oružjem. Uz to, smanjeni ekonomski troškovi i izbjegavanje potrebe za izgradnjom objekata u svakoj zemlji su također pozitivne strane. Nedostatke će predstavljati socijalna i politička mišljenja zemlje domaćina, ali i zabrinutost drugih zemalja zbog slanja nuklearnog materijala u drugu zemlju. Prije nego objekt počne raditi, potrebno bi bilo razviti stroge mjere zaštite i način nadzora (Hippel i Hayes, 2010).

5.1. Vrste otpada pogodne za odlaganje u Istočnoj Aziji

Radioaktivni materijali koji se odlažu u duboke bušotine moraju se pripremiti za odlaganje. U nekim je slučajevima to vrlo jednostavno i uključuje postavljanje materijala u spremnike izrađene od čelika, bakra ili nekog drugog materijala, dok je za složenije vrste otpada potrebno ipak nešto više pripreme. Za odlaganje u duboke bušotine u Istočnoj Aziji uzimaju se u obzir tri glavne vrste nuklearnih materijala (Hippel i Hayes, 2010):

- 1) *Istrošeno nuklearno gorivo (ING)* - najčešći oblik gorivnih elemenata ima promjer od 0,14 do 0,20 m i duljinu od 4 do 4,5 m. Najjednostavniji način bi bio smjestiti gorivne elemente u cilindrične metalne spremnike promjera od 0,25 do 0,35 m i odložiti ih u bušotinu. Spremnici bi trebali biti zabrtvljeni varovima s gornje i donje strane, a unutar njih bi se dodala bentonitna suspenzija za stabiliziranje gorivnih elemenata tijekom postavljanja u bušotinu. Spremnici moraju biti dovoljno čvrsti i izdržljivi da spriječe

moгуće ispuštanje radioaktivnog materijala tijekom spuštanja u bušotinu, ali i tijekom izvlačenja iz bušotine u slučaju mogućeg zaglave spremnika u kanalu bušotine. Zbog svoje dugotrajne stabilnosti, bakar se čini kao odličan kandidat za izradu spremnika. Postoje određene razlike u postavljanju spremnika s obzirom na temperaturu. Odlaganje otpada niže temperature uključivalo bi istrošeno nuklearno gorivo koje se ohladilo u bazenima ili suhim skladištenjem otprilike 30 godina prije nego što se smjesti u spremnik za odlaganje. To hlađenje bi omogućilo da se kratkoživući radionuklidi (stroncij-90, cezij-137) raspadnu čime bi se značajno smanjila ukupna temperatura goriva. Kod odlaganja otpada visoke temperature gorivo bi se odlagalo neposredno nakon uklanjanja iz reaktora. Pretpostavlja se da takav način odlaganja zahtijeva brojne izmjene u postupcima rukovanja i odlaganja zbog povećane radioaktivnosti što bi prouzrokovalo dodatne troškove. Kako bi se moglo smjestiti što više gorivnih elemenata, potrebno je istražiti mogućnost gušćeg pakiranja u spremnike. To bi uključivalo rastavljanje gorivnih elemenata na gorivne šipke čime bi se omogućilo smještanje većih količina istrošenog nuklearnog goriva u bušotine, a time bi se smanjio i ukupan broj potrebnih bušotina. Međutim, ključni kriterij bi bili sigurnost i zaštita kako ne bi došlo do nesreće i mogućeg nuklearne lančane reakcije;

- 2) *Visoko radioaktivni otpad (VRAO)* - tekući otpad koji nastaje tijekom prerade nuklearnog goriva obično se pomiješa s borosilikatnim staklom čime nastaju stakleni blokovi, a taj proces se naziva vitrifikacija. Ti blokovi se smještaju u spremnike koji se potom spuštaju u bušotinu. S obzirom da takva vrsta otpada zauzima relativno malen volumen u odnosu na istrošeno nuklearno gorivo, mnogi znanstvenici očekuju da će upravo vitrificirani visoko radioaktivni otpad biti odličan kandidat za odlaganje u duboke bušotine. U Japanu se nalaze najveće količine vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada nastalog tijekom prerade nuklearnog goriva i pohranjen je u spremnike duljine 1,34 m i promjera 0,43 m. Smještanje tih spremnika u bušotinu promjera 0,45 m bilo bi teško izvedivo zbog malog zazora između spremnika i kanala bušotine, dok je duljina spremnika sasvim odgovarajuća (Hippel i Hayes, 2010);
- 3) *Plutonij* - postoje različiti oblici u kojima se plutonij može odlagati: kao oblik miješanog oksidnog goriva (u kombinaciji s istrošenim gorivom), kao metal, kao plutonijev oksid, pomiješan s visoko radioaktivnim otpadom, pomiješan s drugim

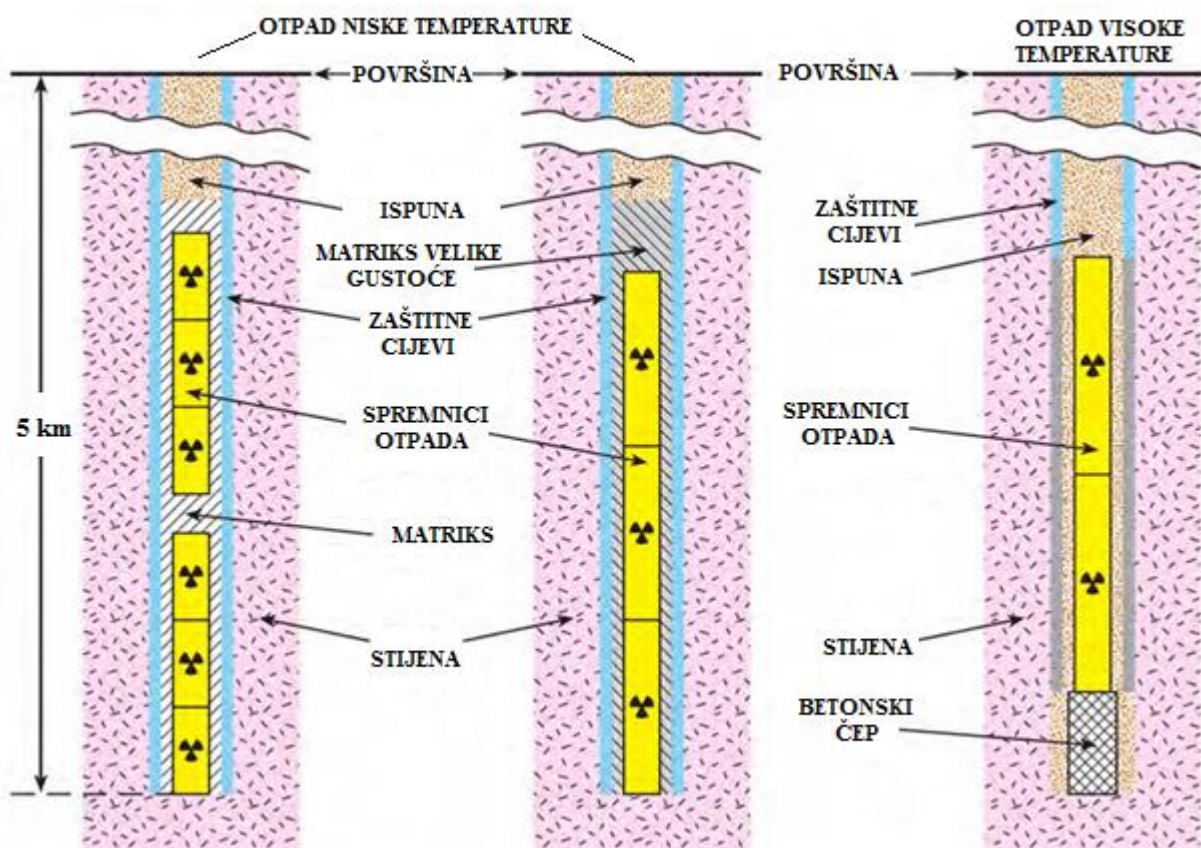
aktinoidima, pomiješan sa staklenom ili stijenskom matricom.

5.2. Postavljanje spremnika s otpadom u bušotinu

Postavljanje spremnika s radioaktivnim otpadom u bušotinu uključuje kombinaciju transporta otpada na mjesto bušotine, rukovanje sa spremnicima na površini (što može zahtijevati posebnu opremu ovisno o radioaktivnosti), spuštanje spremnika u kanal bušotine i postavljanje brtvenog sustava odnosno zapunjavanje bušotine. Transport otpada na mjesto bušotine bi se obavljao cestovnim, željezničkim ili pomorskim putem na posebnim brodovima namijenjenim za transport radioaktivnog otpada. Širok je raspon vozila koja bi se mogla koristiti za transport, od standardnih pa sve do posebno specijaliziranih za radioaktivni otpad, ovisno o volumenu i masi spremnika. Prerada otpada bi se mogla odvijati na licu mjesta u nuklearnoj elektrani, u postrojenju koje se nalazi u blizini nuklearne elektrane ili tek na samoj lokaciji bušotine. Odluka o tome ovisi o vrsti materijala kojim se rukuje, o transportu, ali i o nekim netehničkim pitanjima kao što su međunarodne zaštitne mjere, politika postupanja s nuklearnim otpadom određene zemlje. Rukovanje spremnicima na mjestu bušotine može zahtijevati posebnu zaštitu i opremu za daljinsko upravljanje ako su materijali koji se odlažu dovoljno radioaktivni da mogu biti opasni za ljude u blizini. Spuštanje spremnika u bušotinu bi se najvjerojatnije trebalo obavljati opremom na žici. Postoji mogućnost da se na dnu niza spremnika postave kamere i rasvjeta kako bi se spremnici mogli nadgledati na putu prema dolje. Time bi se omogućilo operatorima da promatraju napredak, a uz pomoć pametne robotizirane opreme mogli bi voditi spremnike kroz zahtjevnije dionice kanala bušotine te osloboditi spremnike u slučaju zaglave. Takva vrsta opreme je dijelom već i dostupna, ali je definitivno potreban dodatni razvoj u tu svrhu s obzirom na nedostatak iskustva.

Postoji niz različitih metoda za brtvljenje spremnika otpada koje se razlikuju u tome je li riječ o odlaganju otpada visoke ili niske temperature. Kod odlaganja spremnika visoke temperature potrebno je uliti betonski čep na dno kanala bušotine, a zatim bi se vrući spremnici otpada spuštali te bi rastalili okolnu stijenu i time omogućili brtvljenje. U slučaju odlaganja spremnika s ohlađenim otpadom, u bušotinu bi se ubacili električni grijači elementi kako bi omogućilo taljenje stijena i brtvljenje. Jedan od prijedloga jest da se iznad i oko ohlađenih spremnika postavi matriks velike gustoće. Matriks bi činile sitne kuglice izrađene od olova ili legure olova (Hippel i Hayes, 2010).

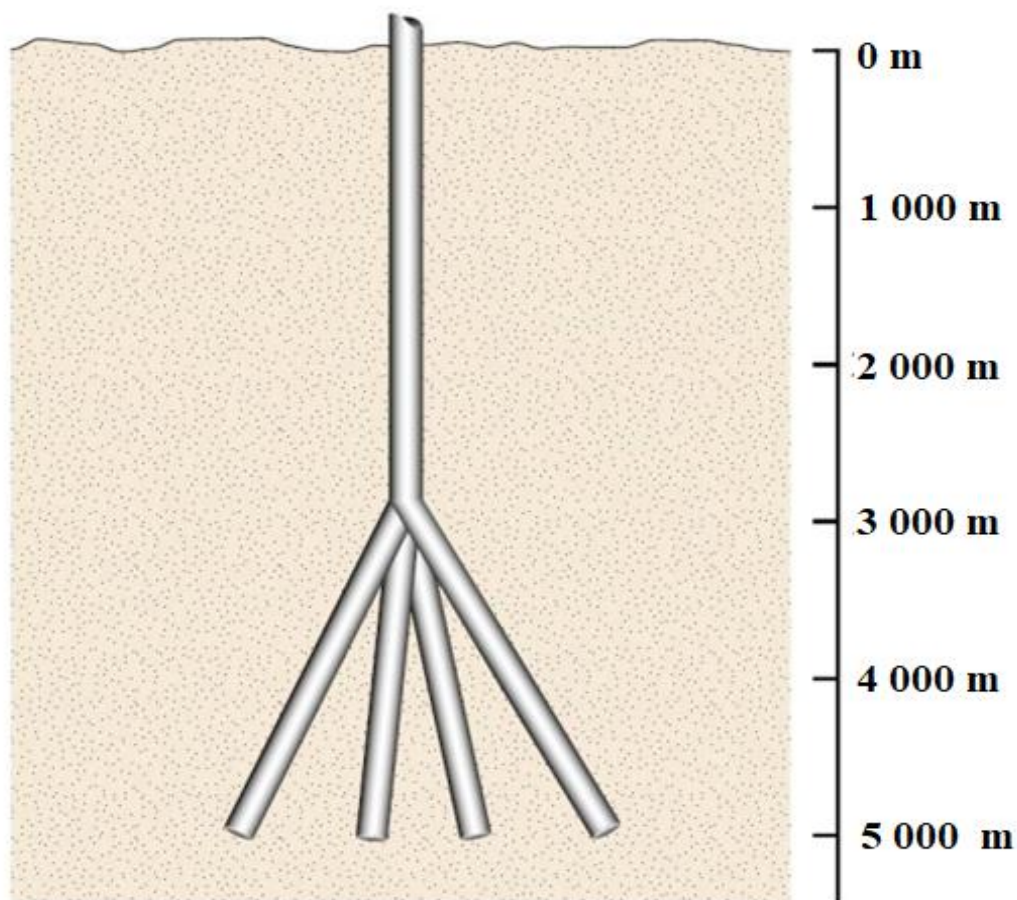
Različiti načini postavljanja spremnika u bušotinu prikazani su na slici 5-1. Nakon što se zona odlaganja ispuni određenim materijalom, gornji dio kanala bušotine bi se punio kombinacijom cementne kaše, izdrobljene stijene i drugih materijala. Pri samom vrhu kanala bušotine postavio bi se cementni čep veće duljine, kolona zaštitnih cijevi odrezala bi se najmanje 1,5 m ispod razine tla kako s površine ne bi bio vidljiv početak bušotine. Uklonilo bi se i bušaće postrojenje kako bi se okoliš vratio u stanje blisko prvobitnom, a zabilježile bi se koordinate ušća bušotine i zapis o lokaciji čuvao za buduće potrebe (Hippel i Hayes, 2010).



Slika 5-1. Različiti načini postavljanja spremnika u bušotinu (Hippel i Hayes, 2010)

Usmjereno bušenje, koje se sve češće koristi u naftnoj i plinskoj industriji, omogućilo bi izradu multilateralnih bušotina kao što je to prikazano na slici 5-2. Time bi se omogućilo da se iz jednog osnovnog vertikalnog kanala bušotine izradi nekoliko bočnih (lateralnih) kanala čime bi se smanjili troškovi bušenja i povećala efikasnost skladištenja. Međutim, postojale bi određene komplikacije oko postavljanja spremnika u željeni bočni kanal. Stoga je potreban

razvoj novih tehnologija koje bi pomogle pri odlaganju otpada u ovakvim slučajevima.



Slika 5-2. Multilateralna bušotina namijenjena za odlaganje radioaktivnog otpada (Hippel i Hayes, 2010)

5.3. Ključne nepoznanice i potencijalne prepreke

Unatoč značajnom istraživanju ovog koncepta odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine (iako je dosta više novca uloženo na istraživanje pogodnih plitkih geoloških odlagališta), ipak postoje određene nesigurnosti i prepreke za provedbu koncepta. Prije nego se koncept može početi primjenjivati, potrebno je prevladati tehnološke nesigurnosti, pravne prepreke, a možda i najvažnije, političke i institucionalne barijere.

5.3.1. Tehnološke prepreke

Većina iskustava u bušenju dubokih bušotina potječe iz naftne i plinske industrije, ali se nije dosegla tolika tehnološka razvijenost da se izrade bušotine dovoljno velikih promjera na velikim dubinama. Ključno je pitanje koliki je potreban tehnološki napredak da se omogući pravovremena provedba koncepta te kakav bi utjecaj imao napredak na troškove zbrinjavanja otpada. Potrebno je bolje razumijevanje tehničkih pitanja kao što je stabilnost kanala bušotine uslijed povećanja temperature i zračenja, te pod ekstremnim tlakovima koji se javljaju u dubokim bušotinama. Upitno je hoće li kanal bušotine na velikoj dubini nakon nekog vremena ostati isti kao na početku kada je bio izbušen. Neki dokazi sugeriraju da promjene dimenzija kanala bušotine na dubinama 4-5 km mogu biti dovoljno značajne da utječu na postavljanje spremnika otpada.

Sljedeći problem koji se javlja je nadziranje bušotine, tj. koje će vrste sustava nadzora biti potrebne kako bi se osiguralo da koncept funkcionira kako je i očekivano. Potrebna su dodatna istraživanja kako bi se bolje razumjelo kretanje podzemnih voda na jako velikim dubinama i utjecaji koje same bušotine mogu imati na kretanje podzemnih voda. Također, nejasno je koji dijelovi bušotine bi trebali biti zacjevljeni te koje vrste zaštitnih cijevi bi se koristile. Potrebna su hidrološka istraživanja i procjena stabilnosti kanala na velikim dubinama kako bi se utvrdio idealan način zacjevljenja bušotine (Hippel i Hayes, 2010).

5.3.2. Pravne prepreke

Uz već navedena tehnička pitanja, niz nacionalnih i međunarodnih pravnih propisa će se trebati donijeti (ili doraditi) prije početka izgradnje objekata za odlaganje otpada. Postojeći nacionalni zakoni koji dopuštaju (ili ne dopuštaju) odlaganje istrošenog nuklearnog goriva moraju se procijeniti i po potrebi modificirati. U nekim državama zakoni dodatno otežavaju odlaganje istrošenog nuklearnog goriva. Ukoliko se države dogovore za izgradnju jednog međunarodnog objekta za odlaganje otpada, bit će potrebno istražiti i modificirati zakone pojedinih zemalja vezane za uvoz i izvoz istrošenog nuklearnog goriva i visoko radioaktivnog otpada. Također će biti potrebni propisi o licenciranju objekta kako bi se omogućilo legalno funkcioniranje objekta kojeg bi koristile i druge države u regiji. Postojeći propisi za geološka

odlagališta mogu poslužiti kao početna smjernica, ali objekti za duboko odlaganje imat će sadržaje koji zahtijevaju dodatno licenciranje. Prije nego se počne odlagati otpad, bit će potrebno testirati protok podzemne vode, odrediti standarde za konstrukciju bušotine, odrediti sigurnosne mjere na objektu kao i mnoge druge zahtjeve. Razvoj, pregovaranje i stupanje na snagu takvih propisa bit će dugotrajno u pojedinim zemljama. Također će biti potrebni nacionalni i međunarodni zakoni i protokoli koji se odnose na zaštitne mjere prilikom transporta i rukovanja nuklearnim gorivom u svakoj od zemalja koje sudjeluju u projektu. Takvi zakoni već postoje u nekim zemljama Istočne Azije, ali je za provedbu koncepta potrebno da zakoni budu usklađeni između svih zainteresiranih zemalja (Hippel i Hayes, 2010).

U Europi svaka država članica Europske unije preuzima odgovornost za uspostavu nacionalnog sustava za sigurno zbrinjavanje otpada koji nastaje na teritoriju države, odnosno kojega je vlasnik. Navedeno proizlazi iz odredbi o danih u zajedničkoj konvenciji, Direktivi 2011/70 i Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Republika Hrvatska je bilateralnim ugovorom preuzela odgovornost za zbrinjavanje svog dijela radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva iz Nuklearne elektrane Krško. Za provedbu navedene direktive i drugih međunarodnih propisa, te pravnu regulaciju temeljem navedenog Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti donesena je Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. U Republici Hrvatskoj se uz pomoć Strategije nastoji upotpuniti nacionalni sustav zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, kojom se, u Europskoj uniji, uspostavljaju ujednačeni standardi za njihovo odgovorno i sigurno zbrinjavanje (<https://radioaktivniotpad.org>, 2015c).

5.3.3. Političke i institucionalne prepreke

Vjerojatno važnije od tehničkih i pravnih pitanju su političke i institucionalne prepreke koje se javljaju u zemljama regije, ali i u široj međunarodnoj zajednici. Razumijevanje ovih prepreka i način njihovog rješavanja bit će ključ uspjeha primjene koncepta pod pretpostavkom da daljnja istraživanja nastavljaju pokazivati da je koncept tehnički izvediv. Izgradnji objekta na određenom mjestu može se suprotstaviti lokalna politika na temelju njihove percepcije utjecaja na okoliš i mogućih rizika koji bi se javili. Također, ekološke udruge koje djeluju u tim

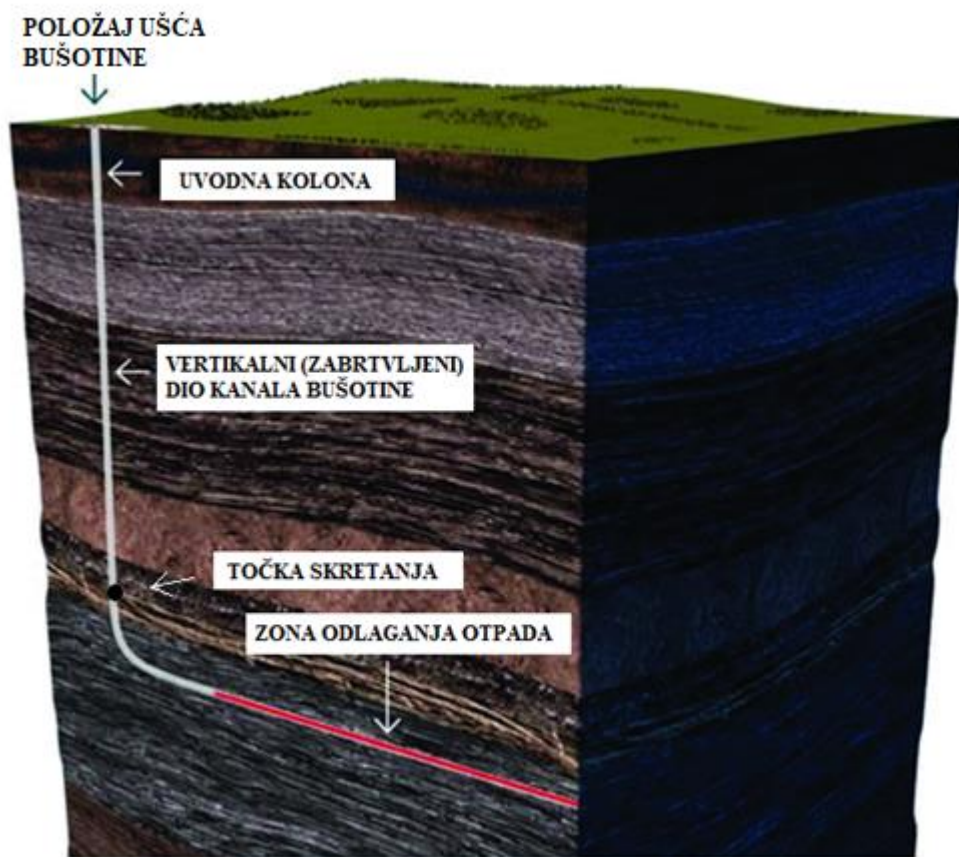
zemljama bi mogle stvarati probleme tijekom realizacije ovakvih projekata. Vrlo je vjerojatno da će se zbog transporta nuklearnog materijala kroz određene regije žaliti raznorazne udruge i nevladine organizacije. Na nacionalnoj razini problem će biti političko protivljenje nepovratnom zbrinjavanju istrošenog goriva. U pojedinim zemljama trajno zbrinjavanje nuklearnog goriva može se protumačiti kao rasipanje nacionalnog resursa, s obzirom da se gorivo može preraditi. U zemlji koja je kandidat da bude domaćin međunarodnog objekta vrlo je vjerojatno da će se provoditi nacionalne rasprave o točnoj lokaciji za izgradnju objekta te je za očekivati da postoji političko protivljenje prihvaćanju radioaktivnog materijala iz drugih zemalja.

Političke i institucionalne barijere se mogu pokazati kao najveći problemi za provedbu koncepta odlaganja otpada u duboke bušotine. Za rješavanje različitih problema bit će potrebne informativne kampanje usmjerene na javnost i donositelje odluka (Hippel i Hayes, 2010).

6. MOGUĆNOST ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA U HORIZONTALNE BUŠOTINE

Visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo mogu se odlagati u duboke horizontalne bušotine u sedimentnim, metamorfnim ili magmatskim stijenama. Koncept odlaganja otpada u horizontalne bušotine ima svoje sigurnosne, operativne i ekonomske koristi. Odlagalište se nalazi duboko ispod vodonosnika u okruženju formacija za koje se može pokazati da su izolirane od površine milijunima godina uz pretpostavku postojanja slojeva soli iznad zone odlaganja. Velika dubina pruža sigurnost u slučaju nenamjernog prodora radionuklida, potresa ili smetnji u blizini površine. Bušotina se može izraditi blizu reaktora i privremenih skladišta kako bi se smanjili troškovi prijevoza. U odnosu na odlagališta otpada u rudnicima, troškovi zbrinjavanja po toni otpada mogu biti znatno niži zbog svoje manje veličine spremnika, smanjenih potreba za infrastrukturom i postupne implementacije. U predloženom konceptu odlaganja, spremnici otporni na koroziju koji sadrže gorivne elemente iz komercijalnih reaktora smjestili bi se jedan do drugog u horizontalne bušotine promjera do 50 cm. Takva konfiguracija smanjuje mehanička naprezanja i održava temperature ispod točke vrelišta soli. Ostali visoko radioaktivni otpad, poput kapsula koje sadrže stroncij i cezij, može se odlagati u bušotine manjeg promjera (Muller et al., 2019).

Na slici 6-1. nalazi se shematski prikaz horizontalne bušotine namijenjene za odlaganje radioaktivnog otpada. Vertikalni dio kanala bušotine izbušen je do točke skretanja (engl. *kick off point*) koja se nalazi na oko 1 000 m dubine, nakon čega se bušotina postupno zakrivljuje dok ne postane približno horizontalna. Zatim se nastavlja bušiti horizontalno nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara ovisno o broju spremnika s obzirom da će taj horizontalni dio kanala bušotine predstavljati zonu odlaganja otpada (Muller et al., 2019).



Slika 6-1. Shematski prikaz horizontalne bušotine za odlaganje radioaktivnog otpada (Muller et al., 2019)

6.1. Konstrukcija horizontalne bušotine za odlaganje spremnika s radioaktivnim otpadom

Nakon što se izradi vertikalni dio kanala bušotine, ugradio bi se sustav zaštitnih cijevi od površine do točke skretanja. Sustav bi se sastojao od konduktorske cijevi, uvodne kolone i tehničke kolone. Uloga konduktorske cijevi i uvodne kolone jest zaštita slatkovodnih vodonosnika te da služe kao vodič prilikom nastavka bušenja. Nakon točke skretanja na dubini

oko 1 000 m, bušilo bi se manjim promjerom s kutom odklona manjim od 0,25 °/m sve dok bušotina ne postane horizontalna. Polumjer zakrivljenosti je dovoljno velik da se izbjegne bilo kakav otpor prilikom ugradnje zaštitnih cijevi i spuštanja spremnika otpada. Nakon što se ugrade zaštitne cijevi u zakrivljeni dio kanala bušotine, nastavilo bi se bušiti horizontalno do previđene dubine. Tehnologija bušenja je napredovala do te mjere da rotacijski upravljivi sustavi imaju relativnu preciznost manju od 1 m. Dok se izrađuje bušotina, skupljaju se uzorci stijena i fluida za procjenu formacije odabrane za odlaganje otpada, odnosno njenu potpunu karakterizaciju te bi se samim tim olakšalo donošenje odluka o postavljanju spremnika. Za spremnike većeg promjera, horizontalni dio kanala bušotine se može izraditi u dva koraka: prvo bi se izbušio kanal manjeg promjera kako bi se formacija mogla ispitati i testirati, a potom bi se proširio kanala bušotine do promjera koji omogućava smještanje spremnika. Nakon što se izbuši horizontalni dio kanala, ugradio bi se još jedan niz zaštitnih cijevi uz mogućnost korištenja sustava za nadziranje prilikom ugradnje koji bi prenosio podatke iz bušotine na površinu u realnom vremenu. Zaštitne cijevi u zakrivljenom i horizontalnom dijelu kanala bušotine olakšavaju postavljanje spremnika i potencijalno izvlačenje u slučaju zaglave. Štoviše, zaštitne cijevi i cementni kamen djeluju kao dodatne barijere tijekom postavljanja otpada pružajući mehaničku zaštitu i sprječavajući protok fluida oko spremnika. Zaštitne cijevi također učinkovito preraspodjeljuju toplinu, smanjujući temperaturne gradijente i povezana toplinska naprezanja. Horizontalni dio kanala bušotine može imati lagani nagib od nekoliko stupnjeva. Takav nagib može biti koristan u sprječavanju migracije fluida i otopljenih radionuklida prema vertikalnom dijelu kanala bušotine (Muller et al., 2019).

6.2. Ugradnja spremnika s radioaktivnim otpadom

Prije spuštanja u bušotinu, gorivni elementi će se ukloniti iz bazena za hlađenje ili iz privremenih spremnika ukoliko se radi o suhom skladištenju, te će se svaki element postaviti u spremnik izrađen od legure otporne na koroziju. Spremnici se zabrtvljuju i prevoze do lokacije bušotine u transportnim bačvama koje pružaju zaštitu od zračenja. Zatim se spremnici spuštaju u bušotinu i guraju u horizontalni dio kanala pomoću bušotinskog traktora, savitljivog tubinga

ili bušaćih šipki. Spremnici se mogu spuštati pojedinačno ili u nizovima kako bi se uštedilo na vremenu. U slučaju da se tijekom spuštanja spremnici odvoje i počnu slobodno padati, postoji nekoliko mjera koje se mogu osmisлити kako bi se smanjilo ili spriječilo oštećenje spremnika ili zaštitnih cijevi. Krajnja brzina pada spremnika ograničena je prisutnošću vode, slanih otopina ili drugih viskozni fluida koji se nalaze u bušotini. Međutim, teški spremnici mogu postići vrlo velike brzine koje predstavljaju opasnost za integritet spremnika, posebice ako dođe do sudara sa drugim spremnikom koji je prethodno postavljen. Maksimalna brzina može se bitno smanjiti upotrebom uređaja poput proširivog centralizera ili pak upotrebom pjene. Šteta od sudara može se ublažiti i upotrebom amortizera za udar koji se postavlja na prednji kraj spremnika. Ako se spremnik ošteti, mora se primijeniti postupak dekontaminacije bušotine i pripadajuće opreme.

Drugi rizik koji se može pojaviti tijekom spuštanja spremnika jest zaglava iznad zone odlaganja zbog vijugavosti zaštitnih cijevi ili drugih prepreka i nepravilnosti. Veliki radijus zakrivljenosti i preciznost rotacijske tehnologije bušenja smanjuju vjerojatnost zaglave spremnika. Međutim, za daljnje ublažavanje ovog rizika, u bušotinu se može spustiti kaliper za određivanje unutarnjeg promjera ili prazni spremnik kako bi se dokazalo da u bušotini nema prepreka i da oprema za postavljanje funkcionira kako je predviđeno. Alati i postupci za vađenje zaglavljene spremnika iz bušotine rutinski se koriste u naftnoj industriji te se mogu dodatno poboljšati za operacije odlaganja nuklearnog otpada (Muller et al., 2019).

6.3. Usporedba s vertikalnim bušotinama

Koncept odlaganja radioaktivnog otpada u vertikalne bušotine uključuje izradu bušotine dubine oko 5 km u kristaliničnoj stijeni, najčešće granitu, koja se nalazi ispod sedimentne stijene. Otpad bi se trebao odlagati na dubini od 3 do 5 km. Nasuprot tome, koncept odlaganja radioaktivnog otpada u horizontalne bušotine podrazumijeva smještanje spremnika otpada u horizontalni dio koji se nalazi na manjoj dubini u odnosu na vertikalne bušotine. Većina razlika između ova dva koncepta izravna je posljedica različite orijentacije zone odlaganja.

Najbitniji uvjeti u podzemlju (hidrostatički tlak, temperatura, gustoća fluida, salinitet) su raslojeni horizontalno. To znači da će se vertikalna bušotina protezati kroz mnoštvo slojeva i

stalno nailaziti na različite uvjete. Suprotno tome, horizontalna bušotina može prolaziti kroz jedan sloj i susretati se sa sličnim termodinamičkim uvjetima duž cijele zone odlaganja. Izuzetak predstavlja presijecanje rasjeda, gdje veća vjerojatnost postoji kod horizontalnih bušotina. Činjenica da su tlak, temperatura i salinitet relativno jednoliki u horizontalnoj bušotini implicira da je mogućnost protoka fluida i transporta radionuklida relativno mala. U vertikalnoj bušotini toplina koja proizlazi iz spremnika otpada može stvarati uske kanaliće duž bušotine koji mogu poslužiti kao put za protok radionuklida. U konačnici, geotermalni gradijent dovodi do neujednačenih i znatno viših temperatura u zoni odlaganja vertikalne bušotine, što može imati negativan utjecaj na ukupnu izvedbu.

Slaganje teških spremnika otpada jedan na drugog u vertikalnoj bušotini dovodi do znatnog opterećenja spremnika. Detaljne analize naprezanja pokazuju da su sigurnosni čimbenici relativno mali, posebno za spremnike koji se nalaze na većoj dubini s obzirom da imaju veća opterećenja i smanjenu otpornost na lomljenje zbog smanjene čvrstoće popuštanja pri visokim temperaturama. Kao mjera predostrožnosti, potrebno je ugraditi višestruke mehaničke čepove kako bi se podnijela težina spremnika koji se nalaze iznad. Međutim, čepovi se smatraju jednom od najslabijih karika u vertikalnoj bušotini. Takve tehničke komplikacije se ne odnose na horizontalne bušotine, što dovodi do pojednostavljenog izračuna procjene izvedbe. Štoviše, prilikom dizajniranja moguće je odabrati lakše spremnike i zaštitne cijevi koji će omogućiti dodatne prednosti u vezi s rukovanjem, postavljanjem, izvlačenjem te ukupnim troškovima (Muller et al., 2019).

Tehnologija bušenja koju je razvila naftna industrija dovoljno je uznapredovala da omogući izradu dubokih vertikalnih ili horizontalnih bušotina u različitim geološkim uvjetima. Troškovi bušenja uglavnom ovise i dubini, promjeru kanala bušotine, dizajnu zaštitnih cijevi i geološkim uvjetima. Još jednu razliku između ova dva tipa bušotina predstavlja način postavljanja spremnika. U vertikalnoj bušotini je moguće koristiti metodu slobodnog pada, dok je ta metoda ipak neizvediva u horizontalnim bušotinama gdje se treba koristiti oprema za guranje spremnika u bušotinu. U tablici 6-1 prikazane su osnovne razlike između odlaganja otpada u vertikalne i horizontalne bušotine.

Tablica 6-1. Osnovne razlike između vertikalnih i horizontalnih bušotina za odlaganje otpada (Muller et al., 2019)

	Vertikalna bušotina	Horizontalna bušotina
Dubina	3-5 km	>1 km
Vrsta stijene	Kristalinična stijena, solna formacija	Metamorfna, magmatska, sedimentna stijena
Uvjeti u bušotini	Ovisni o dubini	Konstantni
Mogućnost zaglave spremnika	Da	Mala mogućnost
Spremnici	Teški	Lagani
Postavljanje spremnika	Jednostavno	Složeno
Duljina zone odlaganja	Limitirana dubinom i brojem spremnika	Ne ovisi o broju spremnika

7. STRATEŠKA RAZMATRANJA I NEDOSTACI KONCEPTA

Tehničke karakteristike neće biti presudne u tome hoće li se visoko radioaktivni otpad odlagati u duboke bušotine ili ne, one samo pokazuju može li se takav koncept primijeniti. Strateški i politički utjecaj će odrediti hoće li se takav koncept koristiti u budućnosti. Pobornici koncepta tvrde da bi se cjelokupni proces mogao brže razviti nego odlaganje u plitke pogodne geološke formacije. Odlaganje otpada u pogodne plitke geološke formacije zahtijeva najmanje desetljeće za istraživanja površine i podzemnih iskopavanja. Jednom kada se izgrade pristupni i podzemni radni prostori, objekt mora ostati funkcionalan do eventualnog zatvaranja, čak i ako se odlaganje otpada odvija serijski. To bi po nekim nacionalnim programima moglo trajati i do stotinu godina. S druge strane, izgradnja bušotine i spuštanje otpada u nju moglo bi se postići u roku od jedne do dvije godine, nakon čega postrojenje ne mora ostati u funkciji sve dok ne bude potrebna izgradnja nove bušotine. Pojedine države mogu imati male količine otpada koji se može zbrinuti u dubokim bušotinama bez potrebe za odlaganjem u plitkim geološkim formacijama. Uz to, gotovo sve države bez nuklearnih elektrana imaju neku vrstu otpada koja zahtijeva geološko odlaganje. Na primjer, ako bi se male količine istrošenog nuklearnog goriva mogle odložiti u duboke bušotine, tada bi se druge vrste otpada (npr. čvrsti otpad nastao u reaktoru) mogle zbrinuti u plićem i manje zahtjevnom geološkom odlagalištu (Chapman, 2019).

Slična bi se situacija mogla dogoditi ako je država obvezana u suradnji s nekom drugom državom zbrinuti otpad u zajedničku plitku pogodnu geološku formaciju. Za svaku zajedničku geološku formaciju očekuje se da ima dovoljno velik kapacitet kako bi se mogao prihvatiti sav otpad od korisnika, inače bi države morale izgraditi vlastiti sustav odlaganja.

Neke vrste otpada se teže uklapaju u program zbrinjavanja u pogodnim plitkim geološkim formacijama i mogle bi zahtijevati prilagodbe dizajna.

Postoje brojni politički i socijalni razlozi koji bi se mogli razmatrati oko toga zašto je korisno, ili čak potrebno, odlagati otpad u blizini mjesta na kojem je nastao ili je pohranjen. Koncept odlaganja u duboke bušotine je prilično fleksibilan u smislu prikladnosti mjesta s obzirom da se radi o velikoj dubini odlaganja, dok se za odabir lokacije geološkog odlagališta mora razmatrati puno više faktora te je sam način postavljanja spremnika puno riskantniji. To je jedan od razloga zašto su zagovornici koncepta odlaganja u duboke bušotine u SAD-u predložili brojne lokacije za odlaganje otpada. Postoje brojne prednosti u tome što bi se otpad odlagao u neposrednoj blizini nuklearne elektrane. Također, postoje i negativna strana, a to je

mišljenje javnosti. Na primjer, stanovnici koji žive u blizini nuklearne elektrane u Fukushimi se oštro protive da se otpad odlaže na licu mjesta.

Za neke programe gospodarenja otpadom vrlo važnu ulogu bi mogli imati cjelokupni troškovi odlaganja. Zbog jednostavnijih inženjerskih zahtjeva, dugotrajnosti i manjih ukupnih troškova, koncept odlaganja otpada u duboke bušotine je znatno u prednosti u odnosu na odlaganje u plitke geološke formacije. Jasno je da su strateški i politički čimbenici potencijalno ograničavajući i znatno složeniji od čisto tehničkih čimbenika (Chapman, 2019).

7.1. Nedostaci koncepta

Britanski odbor za gospodarenje radioaktivnim otpadom (engl. *The Committee on Radioactive Waste Management - CoRWM*) je dao svoj pregled o mogućoj primjeni dubokih bušotina za odlaganje radioaktivnog otpada u Velikoj Britaniji. Prijedlog o odlaganju otpada visoke radioaktivnosti uključujući plutonij, vitrificirani visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo na prvi pogled se čini atraktivan jer bi smjestio otpad daleko izvan biosfere. Međutim, postoje brojna pitanja koja će vjerojatno biti teško rješiva što koncept odlaganja u duboke bušotine čini potencijalno problematičnim. Segmenti koji mogu predstavljati problem su (CoRWM, 2019):

- a) promjer kanala bušotine;
- b) stabilnost kanala bušotine;
- c) izvlačenje spremnika u slučaju zaglave;
- d) brtveni sustav bušotine;
- e) veličina spremnika otpada;
- f) korištenje postojećih dubokih bušotina.

a) Promjer bušotine

Koristeći postojeću tehnologiju trenutno je nemoguće izbušiti bušotinu dubine nekoliko kilometara s promjerom na dnu od skoro pola metra. Dosad su izrađene bušotine takvog promjera, ali znatno manjih dubina. Postoje značajni izazovi koji bi se trebali savladati kako bi bilo moguće izbušiti bušotine dovoljnog promjera i na odgovarajućim dubinama, a za to će biti potrebna znatna financijska ulaganja i vrijeme.

b) Stabilnost kanala bušotine

Postoji nekoliko vrsta stijena koji bi potencijalno bile prikladne za odlaganje otpada na dubinama od nekoliko kilometara, ali je potrebno osigurati stabilnost kanala bušotine kako bi odlagalište (kanal bušotine) bilo funkcionalno. Za osiguranje stabilnosti, kanal mora biti zacjevljen većim dijelom svoje duljine. Za postizanje konačnog promjera od skoro 0,5 m na dnu bušotine, bit će potreban znatno veći početni promjer. Težina zaštitnih cijevi velikog promjera znatno će otežati njihovu ugradnju i rukovanje.

c) Izvlačenje spremnika u slučaju zaglave

Ako spremnik otpada zaglavi u kanalu bušotine iznad zone odlaganja, morat će se posebnim zahvatima izvaditi kako bi bilo moguće daljnje spuštanje spremnika. Ovisno o dubini i uvjetima u bušotini, izvlačenje spremnika će vjerojatno biti problematično i skupo.

d) Brtveni sustav bušotine

Brtvljenje oko spremnika otpada na većim dubinama trenutno nije testirano i može biti teško ili gotovo nemoguće za provjeriti. Ovisno o dubini i načinu njihove ugradnje, zaštitne cijevi mogu otežati proces brtvljenja bušotine te mogu predstavljati put za migraciju radionuklida do površine u slučaju nesreće i istjecanja otpada.

e) Veličina spremnika otpada

Potreban je promjer bušotine od skoro 1 m za odlaganje vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada iz Velike Britanije. No, gotovo je nemoguće ostvariti takav promjer i to bi zahtijevalo brojne tehničke izazove te je praktičnije izraditi promjer bušotine 0,5 m. Takav promjer bi zahtijevao i manje veličine spremnika koji bi se postavljali u bušotinu. Zbog toga bi

bila potrebna promjena trenutnog oblika krutog otpada kako bi se mogao smjestiti u spremnike manjeg promjera.

f) Korištenje postojećih dubokih bušotina

Postojeće naftne bušotine nemaju dovoljno velik promjer za odlaganje otpada i bilo bi dosta skupo povećati promjer s obzirom da bi bilo potrebno ukloniti zacementirane zaštitne cijevi. Bušotine u kojima je primjenjeno hidrauličko frakturiranje stijena za povećanje proizvodnje neće biti pogodne za odlaganje otpada jer se samim hidrauličkim frakturiranjem narušio hidraulički integritet stijene.

8 DISKUSIJA

Na kraju pregleda koncepta odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine i dosadašnjih istraživanja, postavlja se pitanje zašto se još uvijek takva vrsta odlagališta ne primjenjuje u praksi. Brojni problemi i pitanja još uvijek se moraju riješiti kako bi koncept bilo moguće primjenjivati. U posljednjih nekoliko godina provedena su brojna istraživanja i testiranja koja su pokazala da koncept unatoč svim svojim prednostima, ipak ima svoje nedostatke. Određeni elementi koncepta su vrlo diskutabilni ili čak neizvedivi.

Prema Arnoldovim istraživanjima se pretpostavlja da se tijekom postavljanja spremnika u bušotinu sastav fluida unutar kanala bušotine može kontrolirati. No iskustva iz naftne industrije pokazuju da to baš i nije moguće. Naime ako se u bušotinu spuštaju spremnici koji su zatvoreni, odnosno kroz njih nije moguć protok fluida, tada je vrlo teško izvesti zamjenu fluida u bušotini. Jedini prolaz za protok fluida preostaje prstenasti prostor između spremnika otpada i zaštitnih cijevi. No gotovo je nemoguće samo kroz prstenasti prostor izvršiti utiskivanje novog fluida i istiskivanje fluida koji se već nalazi u kanalu bušotine.

Još jedna stvar koja je diskutabilna u Arnoldovim razmatranjima vezana je za tlak koji se koristi prilikom dizajniranja spremnika za otpad. Arnold navodi da je proračunom utvrđeno da maksimalni mogući tlak na dno kanala bušotine iznosi 57 MPa (8 250 psi). Taj proračun nije nigdje prikazan i vrlo je upitno kako se došlo do toga broja. Još jedna diskutabilna stvar vezana je za spuštanje spremnika u bušotinu pomoću bušačkih šipki. Na vrhu niza spremnika s otpadom nalazio bi se sigurnosni spoj s J-utorom koji bi povezivao bušaće šipke i niz spremnika. Kada bi se niz spremnika spustio na željenu dubinu, rotacijom u suprotnom smjeru bušaće šipke bi se izvukle na površinu i ponovno spustile novi niz spremnika s otpadom u bušotinu. U naftnoj industriji J-brava (J-utor) se koristi prilikom ugradnje pakera kako bi spriječila njegovo prerano aktiviranje te držala sve njegove elemente na jednom mjestu. Vrlo je diskutabilno kako bi se takav princip mogao primijeniti u ovom konceptu prilikom spuštanja niza od 40 spremnika.

Hippel i Hayes (2010.) u svojim istraživanjima također imaju elemente koji su diskutabilni. Prva stvar se odnosi na mogućnost postavljanja kamera i rasvjete na dnu niza spremnika kako bi se spremnici mogli nadgledati na putu prema dnu bušotine. Time bi se omogućilo da se uz pomoć pametne robotizirane opreme promatra napredak spremnika kroz zahtjevnije dionice kanala bušotine. Sljedeća situacija vezana je za mogućnost korištenja električnih grijaćih elemenata u bušotini kako bi se omogućilo taljenje i brtvljenje stijena

prilikom odlaganja spremnika s ohlađenim otpadom. Obje situacije su jako upitne u smislu izvedivosti. Hippel i Hayes (2010.) u svojim razmatranjima navode da je nakon spuštanja spremnika u bušotinu i zapunjavanja gornjeg dijela kanala bušotine potrebno postaviti cementni čep, odrezati zaštitne cijevi i ukloniti bušaće postrojenje kako bi se okoliš vratio u prvobitno stanje. Naime kada bi se napravio takav tip odlagališta, malo je vjerojatno da će se dozvoliti u potpunosti vraćanje okoliša u prvobitno stanje jer bi to značilo da svi imaju pristup odlagalištu.

S obzirom da koncept zahtijeva izradu bušotina vrlo velikih promjera na velikim dubinama, ipak nije moguće to ostvariti koristeći se trenutnom tehnologijom bušenja iz naftne industrije. Stoga je potreban izniman razvoj tehnologije bušenja kako bi se omogućila izrada bušotina promjera do 0,5 m u tvrdim stijenama. Tek kada bi se riješio taj glavni problem, koncept bi se mogao razmatrati kao trajno rješenje za odlaganje otpada. Stoga je potrebno steći iskustvo izrade bušotina velikog promjera u sličnim formacijama kako bi se unaprijed mogli pretpostaviti i zaobići mogući problemi. Ukoliko brtveni sustav ne bude pravilno funkcionirao, to bi moglo predstavljati veliki problem s obzirom da bi se stvorili putevi za migraciju radionuklida do površine. Analiza potencijalnih nesreća tijekom zbrinjavanja otpada pokazuje da bi najveći problem bio kada bi se niz spremnika zaglavio iznad zone odlaganja i ne bi se mogao izvući. U takvom slučaju bušotina bi morala biti zabrtvljena na najbolji mogući način i potom napuštena. Posljedica toga može biti da zaglavljani spremnici propuštaju radionuklide koji će doći u kontakt s podzemnom vodom. Još jedan od problema koji se mogu dogoditi tijekom spuštanja niza spremnika u bušotinu jest taj da se spremnici odvoje i počnu slobodno padati do dna bušotine. Teški spremnici mogu postići velike brzine tonjenja što predstavlja opasnost za njihov integritet u slučaju udaranja o prethodno ugrađene spremnike. Ukoliko se spremnici oštete i otpad se počne širiti, potrebno je dekontaminirati bušotinu, isplaku i pripadajuću opremu.

Potencijal koji nudi koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine je velik. Međutim, mali broj zemalja je razmotrio mogućnost korištenja takvog koncepta, i to samo za određene vrste otpada. U većini slučajeva, nacionalni projekti izgradnje geoloških odlagališta potrajat će desetljećima, pa je možda bolje pričekati da se referentni koncept razvije i potom primijeniti sustav koji pruža dugotrajniju izolaciju otpada.

Također, vrlo je bitno prikazati javnosti da je koncept siguran i jednostavan za izvedbu s obzirom da se radi o vrlo opasnom otpadu koji dugoročno može naštetiti ljudima. Izgradnji

objekta na određenom mjestu vjerojatno će se suprotstaviti lokalna politika i ekološke udruge na temelju njihove percepcije utjecaja na okoliš i mogućih rizika koji bi se javili. Jasno je da su politički i strateški čimbenici potencijalno ograničavajući i znatno složeniji od čisto tehničkih čimbenika. Tehničke karakteristike pokazuju samo može li se takav koncept primjenjivati, no strateški i politički čimbenici će biti presudni u tome hoće li se zaista takav koncept i primjenjivati.

Dosadašnja istraživanja su dobar početak primjene koncepta, ali ipak je potreban dodatan razvoj tehnologije te uspješna demonstracija koja bi pokazala da je takav tip odlagališta zaista funkcionalan i odbacila sve sumnje u određene elemente koncepta.

9. ZAKLJUČAK

Radioaktivni otpad nastaje u mnogim djelatnostima poput medicine, industrije, znanosti, energetike. Najviše otpada nastaje pri proizvodnji električne energije u nuklearnim elektranama i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa. S obzirom da će se u budućnosti sve češće koristiti nuklearna energija, logično je zaključiti da će se stvarati sve veće količine otpada kojeg će trebati propisno odložiti što dalje od doticaja ljudi i biosfere pomoću prirodnih i inženjerskih barijera. Za nisko i srednje radioaktivni otpad već postoje adekvatna rješenja za odlaganje koja se primjenjuju dugi niz godina. No, za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva još uvijek ne postoji aktivno odlagalište. Stoga su potrebna brojna istraživanja i testiranja koja će dovesti do tehnički, ekološki i ekonomski prihvatljivog rješenja koje će zadovoljavati sve sigurnosne zahtjeve.

Koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine, koji je za sada još uvijek na ideji, podrazumijeva smještanje otpada u bušotine na dubinama od 3 do 5 km. Nekoliko istraživačkih skupina u svijetu aktivno radi na razvoju ovog koncepta. Zbog jednostavnijih inženjerskih zahtjeva, dugotrajnosti i manjih ukupnih troškova, koncept odlaganja otpada u duboke bušotine je znatno u prednosti u odnosu na odlagališta koja su izgrađena kao zasebni objekti u pogodnim plitkim geološkim formacijama. U scenarijima koji predviđaju istjecanje radioaktivnog materijala najvažniji hidrogeološki čimbenik je taj da će zona odlaganja otpada u potpunosti biti okružena stabilnom podzemnom vodom slojevite gustoće koja nema kontakta s površinom. Odlagalište na dubini od 3 do 5 km će biti vrlo malo osjetljivo na snažne potrese, terorističke napade, promjene uvjeta podzemne vode tijekom budućih ledenih doba, kao i na ostale neželjene događaje. Ukoliko se donese odluka da se otpad odlaže u solnim formacijama, to bi predstavljalo veliku prednost jer solne formacije imaju najveći izolacijski potencijal i gotovo je nemoguće očekivati kontakt između otpada i podzemnih voda zbog malog broja povezanih pora.

Na kraju, uz sve prednosti koje su prikazane, ipak postoji puno više nedostataka koji su glavni razlog zašto se nigdje u svijetu trenutno ne primjenjuje ovakav koncept. Za očekivati je da će se uz daljnja istraživanja, testiranja i razvoj tehnologije jednog dana ovakav tip odlagališta primjenjivati u mnogim zemljama.

10. LITERATURA

1. ARNOLD, B.W., BRADY, P.V., BAUER, S.J., HERRICK, C., PYE, S., FINGER, J., 2011. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 12-21, 23-32, 36-40, 50-55.
2. BESWICK, J., 2008. Status of Technology for Deep Borehole Disposal. Contract No. NP 01185, EPS International, Tokyo, Japan, 9-11.
3. BRADY, P.V., ARNOLD B.W., FREEZE G.A., SWIFT P.N., BAUER S.J., KANNEY J.L., RECHARD R.P., STEIN J.S., 2009. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 15-22, 47-48.
4. CHAPMAN, N.A., 2019. Who Might Be Interested in a Deep Borehole Disposal Facility for Their Radioactive Waste. Department of Materials Science and Engineering, University of Sheffield, UK, 3-6.
5. COCHRAN, J.R., HARDIN E.L., 2015. Handling and Emplacement Options for Deep Borehole Disposal Conceptual Design. SAND2015-6218, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 11-13.
6. CORWM, 2019. CoRWM Position Paper: Deep Borehole Disposal. CoRWM doc. 3574, UK, 3-4.
7. GIBBS, J.S., 2010. Feasibility of Lateral Emplacement in Very Deep Borehole Disposal of High-Level Nuclear Waste. Department of Nuclear Science and Engineering, MIT, Massachusetts, USA, 52-55.
8. HIPPEL, V.D., HAYES, P., 2010. Deep Borehole Disposal of Nuclear Spent Fuel and High Level Waste as a Focus of Regional East Asia Nuclear Fuel Cycle Cooperation. Nautilus Institute for Security and Sustainability, 10-15, 27-29, 34-38.
9. IAEA, 2009. IAEA safety standards: Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, Vienna, Austria, 1-4.
10. JUHLIN, C., SANDSTEDT, H., 1989. Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes. Svensk Karnbranslehantering AB, Sweden, 68.

11. MINKLEY, W., LUEDELING, C., 2016. Deep Borehole Disposal in Salt Rocks. ARMA-2016-410, 50th ARMA Symposium, Houston, USA, 15-16.
12. MULLER, R.A., FINSTERLE, S., GRIMISCH, J., BALTZER, R., MULLER, E.A., RECTOR, J.W., PAYER, J., APPS, J., 2019. Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes. Energies, 12, 2052, 1-3, 5-10, 22-23.
13. NWTRB, 2016. Technical Evaluation on the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. Arlington, UK, 5-6, 11, 21-24.
14. PATRICK, W.C., 1986. Spent Fuel Test – Climax: An Evaluation of the Technical Feasibility of Geologic Storage of Spent Nuclear Fuel in Granite – Final Report. UCRL-53702, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA, 1-3.
15. PAYER, J.H., FINSTERLE, S., APPS, J., MULLER, R.A., 2019. Corrosion resistant alloy canisters for nuclear waste disposal in horizontal drillholes. Proceedings of the International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Knoxville, Tennessee, USA, 3-4.
16. WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS, 1983. Very Deep Hole Systems Engineering Studies. ONWI-226, Columbus, Ohio, USA, 1-4.

Web izvori:

17. RADIOAKTIVNI OTPAD, 2015. Klasifikacija radioaktivnog otpada.
URL: <https://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/> (01.05.2021.)
18. GOSPODARENJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM U HRVATSKOJ, 2015. Fond za financiranje razgradnje NEK.
URL: https://radioaktivniotpad.org/wp-content/uploads/2015/02/NUK-BROSURA_02.pdf (27.08.2021.)
19. RADIOAKTIVNI OTPAD, 2015. Zakoni i regulativa.
URL: <https://radioaktivniotpad.org/zakoni-i-regulativa/> (28.08.2021.)

IZJAVA

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

Miroslav Dilber

Miroslav Dilber



KLASA: 602-04/21-01/97
URBROJ: 251-70-12-21-2
U Zagrebu, 3.9.2021.

Miroslav Dilber, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/97, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 22.4.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

MOGUĆNOST ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U DUBOKE BUŠOTINE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)