

Konstrukcija bušotine za trajno zbrinjavanje spremnika s visoko radioaktivnim otpadom i istrošenim nuklearnim gorivom

Andrašić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:169:509221>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**KONSTRUKCIJA BUŠOTINE ZA TRAJNO ZBRINJAVANJE SPREMNIKA S
VISOKO RADIOAKTIVNIM OTPADOM I ISTROŠENIM NUKLEARNIM
GORIVOM**

Diplomski rad

Ivan Andrašić

N 354

Zagreb, 2022.

KONSTRUKCIJA BUŠOTINE ZA TRAJNO ZBRINJAVANJE SPREMNIKA S
VISOKO RADIOAKTIVNIM OTPADOM I ISTROŠENIM NUKLEARNIM GORIVOM

IVAN ANDRAŠIĆ

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

Sažetak

Nuklearna energija izrazito je efikasan izvor energije korišten u svijetu. Sve veća potražnja za energijom vodi ka izgradnji sve više nuklearnih postrojenja, no velika opasnost koju iskorištavanje takve energije nosi dovodi do sve više razmatranja o njenom korištenju. Nadalje, razne vrste radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, kao nusprodukt proizvodnje nuklearne energije, predstavljaju veliki problem kada je u pitanju njihovo zbrinjavanje. U svrhu što sigurnijeg i boljeg načina skladištenja i odlaganja tih nusprodukata, proučavaju se razni načini kojima bi se isti mogli zbrinuti. Kada su u pitanju visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo, skladištenje u duboke bušotine, tj. duboke geološke strukture, smatra se jednim od mogućih rješenja problema proizvodnje nusprodukata nuklearne energije.

Ključne riječi: radioaktivni otpad, duboke bušotine, odlaganje, spremnici

Diplomski rad sadrži: 55 stranica, 24 slike, 7 tablica, 26 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: 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. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNf-a
Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNf-a

Datum obrane: 21.9.2022. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

BOREHOLE CONSTRUCTION FOR THE PERMANENT DISPOSAL OF WASTE
CANISTERS WITH HIGHLY RADIOACTIVE WASTE AND SPENT NUCLEAR FUEL

IVAN ANDRAŠIĆ

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

Nuclear energy is an extremely efficient source of energy used in the world. The ever-increasing demand for energy leads to the construction of more and more nuclear facilities, but great danger that the exploitation of such energy carries leads to more consideration of its use. Furthermore, various types of radioactive waste and spent nuclear fuel, as a by-product of nuclear energy production, represent a major problem when it comes to their disposal. For the purpose of a safer and better way of storing and disposing of these by-products, various ways of their disposal are being studied. When it comes to highly radioactive waste and spent nuclear fuel, storage in deep boreholes, i.e. deep geological structures, is considered one of the possible solutions to the problem of nuclear energy by-products production.

Keywords: nuclear waste, deep boreholes, disposal, canisters

Thesis contains: 55 pages, 24 figures, 7 tables, 26 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD
Full Professor Zdenko Krištafor, PhD
Assistant Professor Želimir Veinović, PhD

Date of defense: September 21st, 2022., Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| POPIS SLIKA | I |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS KRATICA | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. NUKLEARNI OTPAD..... | 2 |
| 2.1. Skladištenje istrošenog nuklearnog goriva i visokoradioaktivnog nuklearnog otpada | 3 |
| 2.1.1. <i>Mokro skladištenje</i> | 3 |
| 2.1.2. <i>Suho skladištenje.....</i> | 4 |
| 2.2. Odlaganje VRAO-a u duboke geološke formacije (tuneli) | 6 |
| 2.2.1 <i>KBS-3</i> | 6 |
| 2.2.2. <i>Odlagališta nuklearnog otpada u Švedskoj i Finskoj.....</i> | 8 |
| 3. ODLAGANJE ING-a I VRAO-a U DUBOKE BUŠOTINE..... | 10 |
| 3.1. Razvoj koncepta | 10 |
| 3.2. Koncept kompanije Woodward-Clyde iz 1983. godine | 11 |
| 3.3. Program Climax iz 1986. godine | 13 |
| 3.4. Koncept Juhlina i Sandstedta iz 1989. godine | 13 |
| 4. KONCEPT KOMPANIJE SANDIA NATIONAL LABORATORIES..... | 16 |
| 4.1. Tehnički zahtjevi kod izrade bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada .. | 17 |
| 4.2. Tehničke specifikacije dijelova kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada | 18 |
| 4.3. Ispitivanja u bušotini | 22 |
| 4.3.1. <i>Rasjedi i frakture.....</i> | 22 |
| 4.3.2. <i>Stratigrafija.....</i> | 23 |
| 4.3.3. <i>Strukturalna stabilnost i litologija slojeva.....</i> | 23 |
| 4.3.4. <i>Integritet kanala bušotine i izolacijskih čepova.....</i> | 23 |
| 4.4. Spremnici za odlaganje nuklearnog otpada | 25 |
| 4.4.1. <i>Tehnički zahtjevi konstrukcije spremnika</i> | 25 |
| 4.4.2. <i>Punjenje spremnika otpadom.....</i> | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.3. Spajanje spremnika | 29 |
| 4.5. Odlaganje spremnika u bušotinu | 30 |
| 4.5.1. Izolacijski materijali..... | 30 |
| 4.5.2. Manipulacija spremnicima u tornju i odlaganje u bušotinu..... | 31 |
| 4.6. Zatvaranje bušotine..... | 34 |
| 4.6.1. Izolacijski materijali..... | 34 |
| 4.6.2. Tehnološki zahtjevi operacije zatvaranja bušotine | 37 |
| 5. KONCEPT ODLAGANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA U HORIZONTALNE BUŠOTINE | 40 |
| 5.1. Konstrukcija horizontalne bušotine | 41 |
| 5.2. Spremnici s otpadom | 42 |
| 5.3. Odlaganje spremnika s otpadom..... | 42 |
| 5.3.1. Mogući problemi prilikom spuštanja spremnika..... | 45 |
| 5.3.2. Ponovno izvlačenje spremnika | 45 |
| 5.4. Usporedba vertikalnih i horizontalnih bušotina za odlaganje radioaktivnog otpada | 45 |
| 6. KORIŠTENJE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI U KONSTRUKCIJI BUŠOTINE ZA ODLAGANJE NUKLEARNOG OTPADA..... | 48 |
| 6.1. Postupak ugradnje proširivih zaštitnih cijevi | 49 |
| 6.2. Prednosti | 50 |
| 7. MOGUĆNOST ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO51 | |
| 8. ZAKLJUČAK | 52 |
| 9. LITERATURA | 53 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2-1. Nuklearna elektrana Krško, bazen za skladištenje ING-a..... | 4 |
| Slika 2-2. Dvonamjenski spremnik za skladištenje s košarom za 24 goriva elementa CASTOR V/19..... | 5 |
| Slika 2-3. Dvonamjenski spremnik CONSTOR (lijevo) i suho skladište RAO-a (desno) | 5 |
| Slika 2-4. Vrste KBS-3 koncepta trajnog zbrinjavanja nuklearnog otpada..... | 7 |
| Slika 2-5. Spremnik namijenjen za odlaganje nuklearnog otpada u Švedskoj i Finskoj | 8 |
| Slika 2-6. Shema odlagališta nuklearnog otpada u blizini nuklearne elektrane Forsmark u Švedskoj | 9 |
| Slika 2-7. Shema odlagališta nuklearnog otpada Onkalo u Finskoj | 9 |
| Slika 3-1. Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine..... | 11 |
| Slika 3-2. Shematski prikaz postrojenja za odlaganje otpada prema kompaniji Woodward-Clyde | 12 |
| Slika 3-3. Shema predloženih konstrukcija kanala bušotine | 14 |
| Slika 4-1. Shema kanala bušotine za odlaganje RAO-a | 19 |
| Slika 4-2. Presjek tankostjenog spremnika s 367 gorivih šipki promjera 1 cm..... | 28 |
| Slika 4-3. Spojnica velike nosivosti sa slabije izraženim konusnim navojem..... | 29 |
| Slika 4-4. Shema spremnika sa spojnicom prema Sandia National Laboratories | 29 |
| Slika 4-5. Shema tlocrta radilišta s nadograđenim sustavom tračnica za prijenos spremnika u toranj..... | 32 |
| Slika 4-6. Podizanje transportnog spremnika u vertikalni položaj na sustav za prijenos u bušaći toranj..... | 32 |
| Slika 4-7. Zaštićeni prostor za manipulaciju spremnika ispod podišta tornja | 33 |
| Slika 4-8. Shema izolacijskog intervala kanala bušotine za odlaganje spremnika | 39 |
| Slika 5-1. Shema multilateralnih bušotina izrađenih iz jednog glavnog kanala bušotine | 40 |
| Slika 5-2. Presjek spremnika za odlaganje sa jednim gorivnim elementom | 43 |
| Slika 5-3. Shema transporta gorivnih elemenata od privremenog skladišta nuklearne elektrane ili trajnog skladišta do bušotine za odlaganje..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Slika 5-4. Spajanje alatke za spuštanje na spremnik za odlaganje (a), spajanje bušotinskog traktora na alatku za spuštanje (b), položaj spremnika u tornju bušaćeg postrojenja spremnog za spuštanje u kanal bušotine (c), bušotinski traktor prilikom odlaganja spremnika u horizontalni dio kanala bušotine (d)..... | 44 |
| Slika 6-1. Shematski prikaz konstrukcije tipske bušotine i odabira dubine za ugradnju zaštitnih cijevi s obzirom na slojni tlak i tlak frakturiranja | 48 |
| Slika 6-2. Postupak proširivanja zaštitnih cijevi sustavom odozdo prema gore..... | 50 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 2-1. Klasifikacija RAO-a..... | 2 |
| Tablica 4-1. Specifikacije dijelova kanala bušotine | 19 |
| Tablica 4-2. Površinska i potpovršinska istraživanja i njihova svrha | 24 |
| Tablica 4-3. Dimenzije spremnika za odlaganje | 27 |
| Tablica 5-1. Dimenzije spremnika i dimenzije kanala bušotine potrebne za odlaganje | 41 |
| Tablica 5-2. Prednosti i nedostaci horizontalnih i vertikalnih bušotina | 47 |
| Tablica 7-1. Procjena inventara istrošenog nuklearnog goriva NEK-a..... | 51 |

POPIS KRATICA

API – Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute*)

IAEA - Međunarodna agenciju za atomsku energiju (engl. *International Atomic Energy Agency*)

ING – istrošeno nuklearno gorivo (engl. *Spent nuclear fuel*)

KOP – točka skretanja (engl. *kick-off point*)

NAS - Nacionalna akademija znanosti Sjedinjenih Američkih država (engl. *The U.S. National Academy of Sciences*)

NEK – nuklearna elektrana Krško

NRAO – nisko radioaktivni otpad

NSRAO – nisko i srednje radioaktivni otpad

PWR – tlačni reaktori (engl. *Pressurised Water Reactor*)

RAO – radioaktivni otpad

SKB - švedska kompanija za upravljanje i odlaganje radioaktivnog otpada (engl. *Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag*)

SRAO – srednje radioaktivni otpad

UN - Ujedinjeni narodi (engl. *United nations*)

VRAO – visoko radioaktivni otpad

1. UVOD

Nuklearna energija je energija koja se oslobađa ili troši u spontanim ili izazvanim nuklearnim reakcijama. Nuklearne reakcije nastaju sudarom dviju atomskih jezgara ili sudarom atomske jezgre s nekom česticom, npr. s neutronom, a proizvodi takvih reakcija mogu biti nove jezgre i čestice. U užem, energetske smislu, nuklearna energija je ona energija koja se oslobađa pri spajanju ili fuziji lakih i pri cijepanju ili fisiji teških atomskih jezgara. Kontrolirana nuklearna fuzija ostvarena je korištenjem vodikovih izotopa, no još uvijek nije zaživjela u smislu komercijalne upotrebe, obzirom na kompleksnost procesa i ograničenja trenutne tehnologije. S druge strane, nuklearna fisija uranija, izazvana bombardiranjem neutronima, otkrivena je potkraj 1938., pred II. svjetski rat, što je bilo ključno za smjer daljnjega razvoja nuklearne energije. Ujedinjeni narodi (engl. *United nations - UN*) osnovali su 1956. Međunarodnu agenciju za atomsku energiju (engl. *International Atomic Energy Agency - IAEA*) sa zadaćom da potiče i pomaže mirnodopsku upotrebu nuklearne energije, obzirom na događanja za vrijeme hladnog rata i utrke u nuklearnom naoružanju.

Nuklearni reaktori za proizvodnju energije intenzivnije su se počeli razvijati 1960-ih i 1970-ih. Vodom hlađeni reaktori prevladavaju među približno 440 energetske reaktora koji su u pogonu početkom 3. tisućljeća. S obzirom na aktualne energetske trendove, u prvom redu ograničenje emisija CO₂ te smanjenje korištenja fosilnih goriva, studije pokazuju da su korištenje, razvoj, te povećanje kapaciteta proizvodnje nuklearne energije s današnjih 6,7% na otprilike 40% u budućnosti, jedan od bitnih faktora koji će nas dovesti bliže tom cilju. Nuklearne elektrane postoje u tridesetak zemalja svijeta, od toga trinaest članica Europske unije posjeduje nuklearne elektrane, koje pokrivaju oko 35% potrebe za električnom energijom.

Odlaganje i trajno zbrinjavanje radioaktivnog otpada (RAO), nusprodukta dobivanja energije u nuklearnim reaktorima, problem je koji se nastoji riješiti na više načina. Još uvijek se razmatra koji način je najbolji i najpovoljniji za odložiti i trajno zbrinuti ovu vrstu otpada, te se danas u većini slučajeva radioaktivni otpad još uvijek privremeno odlaže u masivne čelično-betonske spremnike unutar samog kompleksa nuklearne elektrane. Jedan od potencijalnih načina je odlaganje spremnika u duboke bušotine za trajno odlaganje radioaktivnog otpada, čime će se detaljnije baviti ovaj rad. S obzirom na to da i Republika Hrvatska koristi energiju iz nuklearne elektrane Krško (NEK) u Sloveniji, obvezala se zbrinuti polovicu proizvedenog radioaktivnog otpada. Razmatranja u vidu odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva iz NEK-a, također će biti opisana u ovom radu.

2. NUKLEARNI OTPAD

RAO se klasificira ovisno o sadržaju radionuklida i vremenu njihovog poluraspada te ukupnoj i specifičnoj aktivnosti. Klasifikacija RAO-a u Republici Hrvatskoj prikazan je tablicom 2-1.

Tablica 2-1. Klasifikacija RAO-a (Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, Vlada RH, 2018)

| Klasa RAO | Tipična svojstva |
|---|--|
| 1. Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO) | Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora |
| 2. Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO) | Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana |
| 3. Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO) | Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživićih radionuklida u ovoj kategoriji otpada su zanemarive. |
| 4. Nisko radioaktivni otpad (NRAO) | Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene aktivnosti dugoživićih radionuklida (4000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m ³ |
| 5. Srednje radioaktivni otpad (SRAO) | Radioaktivni otpad koji sadrži veće koncentracije aktivnosti od NRAO |
| 6. Visoko radioaktivni otpad (VRAO) | Radioaktivni otpad u kojemu je proizvodnja topline iznad 2 kW/m ³ |

Nisko radioaktivni otpad (NRAO) i srednje radioaktivni otpad (SRAO) se, budući da granice nisu jasno određene, često klasificira zajedno (NSRAO) te se zajedno i odlaže. No, za zbrinjavanje u površinskom odlagalištu postavljaju se ograničenja na sadržaj dugovječnih radionuklida, osobito alfa emitera, pa se takav otpad obično naziva „kratkoživi NSRAO“. NSRAO se pojavljuje u plinovitom, krutom i tekućem agregatnom stanju, dok je visoko radioaktivni otpad (VRAO) koji nastaje preradom istrošenoga nuklearnog goriva (ING) najvećim dijelom u tekućem agregatnom stanju (tekućina kontaminirana radionuklidima). Skladištenje tekućeg RAO-a nije dozvoljeno, stoga je njegova obrada važna, jer se tako pretvara u oblik prikladan za skladištenje i odlaganje, te mu se smanjuje volumen (<https://www.radioaktivniotpad.org>, 2021).

2.1. Skladištenje istrošenog nuklearnog goriva i visokoradioaktivnog nuklearnog otpada

U skladištu se VRAO ili ING čuvaju pod stalnim aktivnim nadzorom. Skladištenje je potrebno iz više razloga:

- radioaktivnost svježega ING-a neposredno nakon vađenja iz reaktora, kao i VRAO-a koji preostaje nakon prerade ING-a, mnogostruko se umanjuje već tijekom nekoliko prvih godina skladištenja, što značajno olakšava daljnje postupanje s njima;
- za sigurno odlaganje treba pričekati da se količina topline koju (zbog radioaktivnosti) razvija ING/VRAO dovoljno umanjuje;
- danas još nije u pogonu niti jedno licencirano odlagalište VRAO-a u koje bi se takav otpad mogao nepovratno odložiti.

Uz to, skladištenje ING-a ima funkciju da omogućava odgađanje odluke o tome hoće li se ING prerađivati ili u cijelosti odlagati kao VRAO. Neke zemlje su tu odluku već donijele, a neke su izabrale „*strategiju odgađanja odluke*“ koju im omogućuje skladištenje ING-a. Postoje dvije vrste skladištenja, a to su mokro i suho skladištenje (<https://www.radioaktivniotpad.org>, 2021).

2.1.1. Mokro skladištenje

Istrošeno nuklearno gorivo se nakon vađenja iz reaktora pohranjuje u bazene napunjene vodom s dodatnom bornom kiselinom za apsorpciju neutrona kako bi se spriječilo odvijanje lančane reakcije i kako bi se gorivi elementi hladili, te se ti bazeni većinom nalaze u samoj nuklearnoj elektrani (Slika 2-1.). Osim skladištenja u nuklearnim elektranama, postoje i posebna centralna postrojenja u koje se skladišti ING iz više nuklearnih elektrana. Minimalni period pohrane je devet do dvanaest mjeseci, no u većini slučajeva se ING skladišti na nekoliko godina, pa i nekoliko desetaka godina. U bazenu se nalazi metalna konstrukcija u koju se gorivi elementi postavljaju u vertikalnom položaju, na odgovarajući potreban razmak u svrhu dobrog hlađenja. Metalna konstrukcija s ING-om se mora nalaziti minimalno 6 metara ispod površine vode kako bi se postiglo adekvatno hlađenje, te radi sigurnosti radnika. ING se u bazenu hladi prirodnom cirkulacijom, ili je bazen opremljen dodatnim sustavom za hlađenje (<https://www.radioaktivniotpad.org>, 2021).



Slika 2-1. Nuklearna elektrana Krško, bazen za skladištenje ING-a (<https://www.nek.si>, 2022)

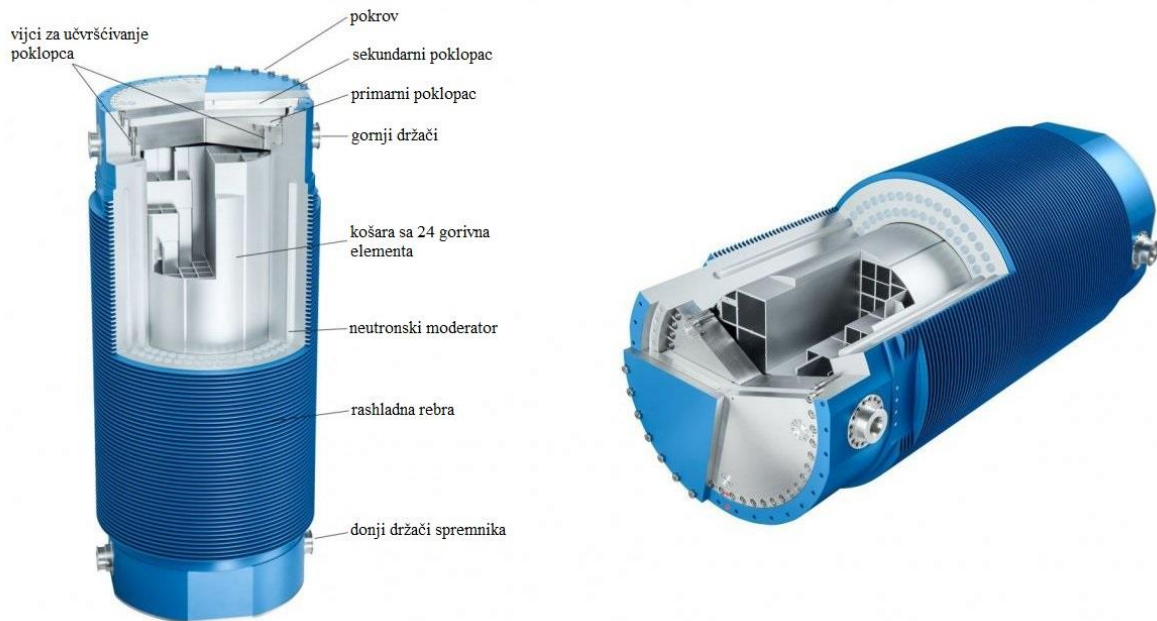
2.1.2. Suho skladištenje

Istrošeno nuklearno gorivo se može se nakon dovoljno dugog vremena iz bazena premjestiti u suho skladište. Ono služi za skladištenje ING-a kada je kapacitet skladištenja u bazenima premašen. Troškovi ove vrste skladištenja mogu se rasporediti kroz vrijeme, a sustavi hlađenja su manji s obzirom na troškove održavanja i operativne troškove. Uobičajeni tipovi sustava za suho skladištenje su:

- samostojeći masivni spremnici (engl. *cask*) koji se drže na ograđenom otvorenom prostoru na armirano betonskoj ploči ili unutar jednostavne zgrade;
- robusne armirano-betonske građevine s posebno dizajniranim nišama u koje se ING umeće pakiran u puno lakše tankostjene spremnike (engl. *canister*).

Spremnici se dizajniraju tako da ih je moguće koristiti za ključne aktivnosti skladištenja i zbrinjavanja, a to su transport, skladištenje i odlaganje. Danas se proizvode i koriste dvonamjenski spremnici koji služe istovremeno i za transport i za skladištenje (slike 2-2. i 2-3.), no i dalje se koriste i spremnici koji služe samo za jednu od navedenih aktivnosti zbrinjavanja. Mogu biti pohranjeni u prostore same nuklearne elektrane predviđene za skladištenje, ili u posebno izgrađenim centralnim skladištima. Zajednička karakteristika svim

spremnici je ta da predstavljaju barijeru ispusta radioaktivnosti, te održavaju ING-a u potkritičnom stanju (<https://www.radioaktivniotpad.org>, 2021).



Slika 2-2. Dvonamjenski spremnik za skladištenje s košarom za 24 goriva elementa CASTOR V/19 (<https://www.gns.de>, 2022)



Slika 2-3. Dvonamjenski spremnik CONSTOR (lijevo) i suho skladište RAO-a (desno) (<https://www.gns.de>, 2022)

2.2. Odlaganje VRAO-a u duboke geološke formacije (tuneli)

Kada se VRAO i ING dovoljno ohlade u fazi skladištenja, može se pristupiti procesu odlaganja s konačnim ciljem trajnog zbrinjavanja. Svo ING se može tretirati kao VRAO i kao takvo odlagati, ili se može preraditi, što smanjuje količinu otpada. U odlagalištu se radioaktivni otpad zbrinjava na neodređeno vrijeme. Kad predviđeni kapacitet odlagališta bude popunjen spremnicima s RAO-om, preostali prostor se ispunjava punilima radi dodatne izolacije (mort, beton, bentonit...). S obzirom na više koncepata odlaganja VRAO-a, odlučeno je da je duboko geološko odlaganje u stijeni na dubinama od 400 do 1000 metara trenutno najbolji način za izolaciju te vrste otpada od čovjeka. Glavna karakteristika potrebna u svrhu odlaganja izolacijsko je svojstvo same stijene. S obzirom na to, pogodne geološke strukture za odlaganje nuklearnog otpada su (<https://www.radioaktivniotpad.org/>, 2021):

- ležišta soli,
- karbonati,
- škriljci,
- granitne stijene.

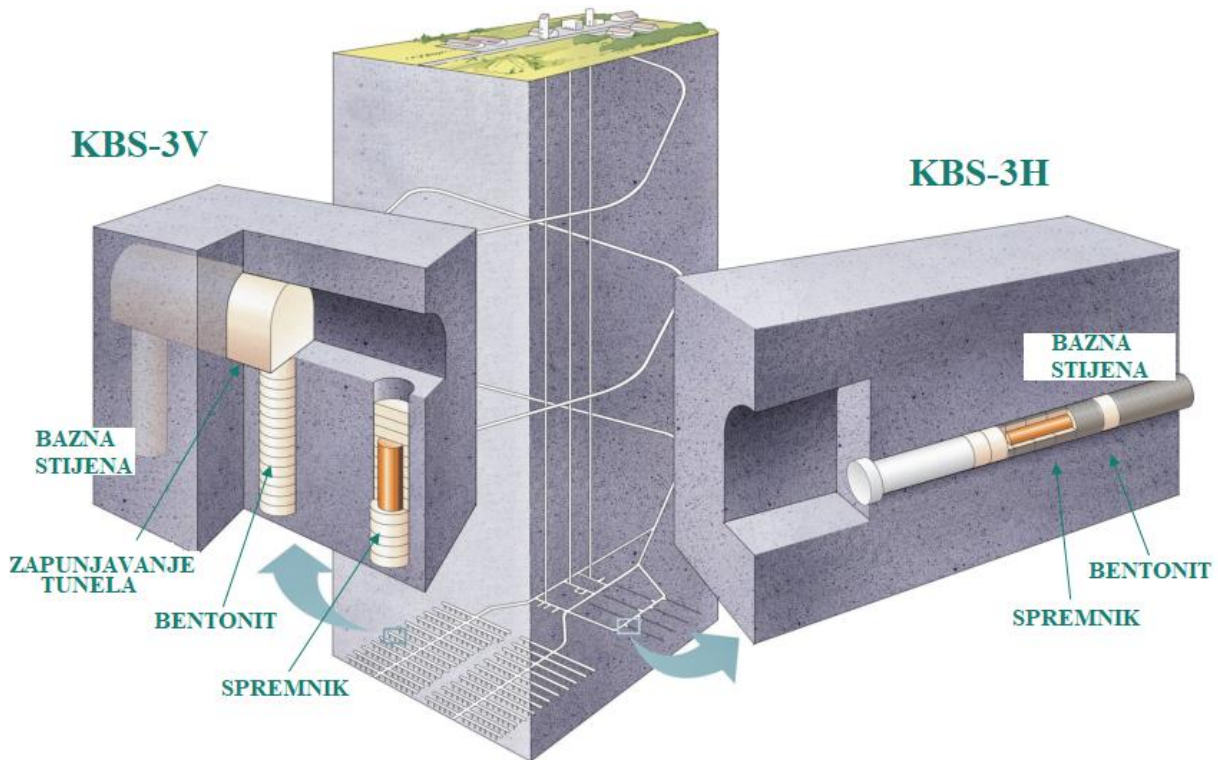
Primarni zahtjev za potencijalnu geološku formaciju u koju bi se odlagao radioaktivni otpad sposobnost je zadržavanja i izolacije otpada od okoline čovjeka dok razina radioaktivnosti ne padne na razinu koja nije opasna za čovjeka i njegovu okolinu. Takvi koncepti odlaganja oslanjaju se na sustave višestrukih barijera kako bi se otpad što bolje osigurao. Vrste barijera neophodnih za zadržavanje VRAO-a i ING-a su (<https://www.radioaktivniotpad.org/>, 2021):

- pogodna geološka formacija,
- nepropusni materijali koji okružuju spremnik,
- antikorozivni spremnik koji sadrži VRAO/ING,
- otpad u krutom stanju.

2.2.1 KBS-3

KBS-3 naziv je za koncept odlaganja visokoradioaktivnog otpada osmišljen od strane švedske kompanije SKB (engl. *Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag*), na zahtjev švedske državne sigurnosne agencije za radioaktivnost. Koncept je razvijen proučavajući prirodno nastala ležišta uranija, npr. u regiji Oklo u državi Gabon, te rudnik Cigar Lake u Kanadi, gdje se događaju spontane nuklearne reakcije koje u prošlosti pa do danas nisu imale štetan utjecaj na ljudsku populaciju. Postoje dvije vrste ovog koncepta odlaganja (Slika 2-4.).

O konceptu KBS-3V govori se u slučaju vertikalnog bušenja otvora u tunelima za odlaganje, a u slučaju horizontalnog bušenja otvora govori se o konceptu KBS-3H. KBS-3V trenutno je jedina metoda koja se koristi u postojećim projektima koji su u procesu realizacije u Švedskoj i Finskoj (<https://en.wikipedia.org>, 2022).



Slika 2-4. Vrste KBS-3 koncepta trajnog zbrinjavanja nuklearnog otpada (Patrakka, 2010)

Prema kompaniji SKB koncept odlaganja provodi se u sljedećim koracima (<https://en.wikipedia.org>, 2022):

- radioaktivni otpad skladišti se dovoljno dugo da mu se umanju radioaktivnost te oslobađanje topline (jedna do više godina);
- otpad se postavlja u čelične spremnike, koji se zatim postavljaju u bakrene spremnike (Slika 2-5.);
- spremnici se postavljaju u vertikalne otvore dubine 8 metara te promjera 2 metra, nabušene u tunelima 500 m unutar kristalinične stijene;
- nakon postavljanja, otvori se zapunjavaju izolacijskim materijalima, te se mjesto odlaganja obilježava



Slika 2-5. Spremnik namijenjen za odlaganje nuklearnog otpada u Švedskoj i Finskoj (<https://en.m.wikipedia.org>, 2022)

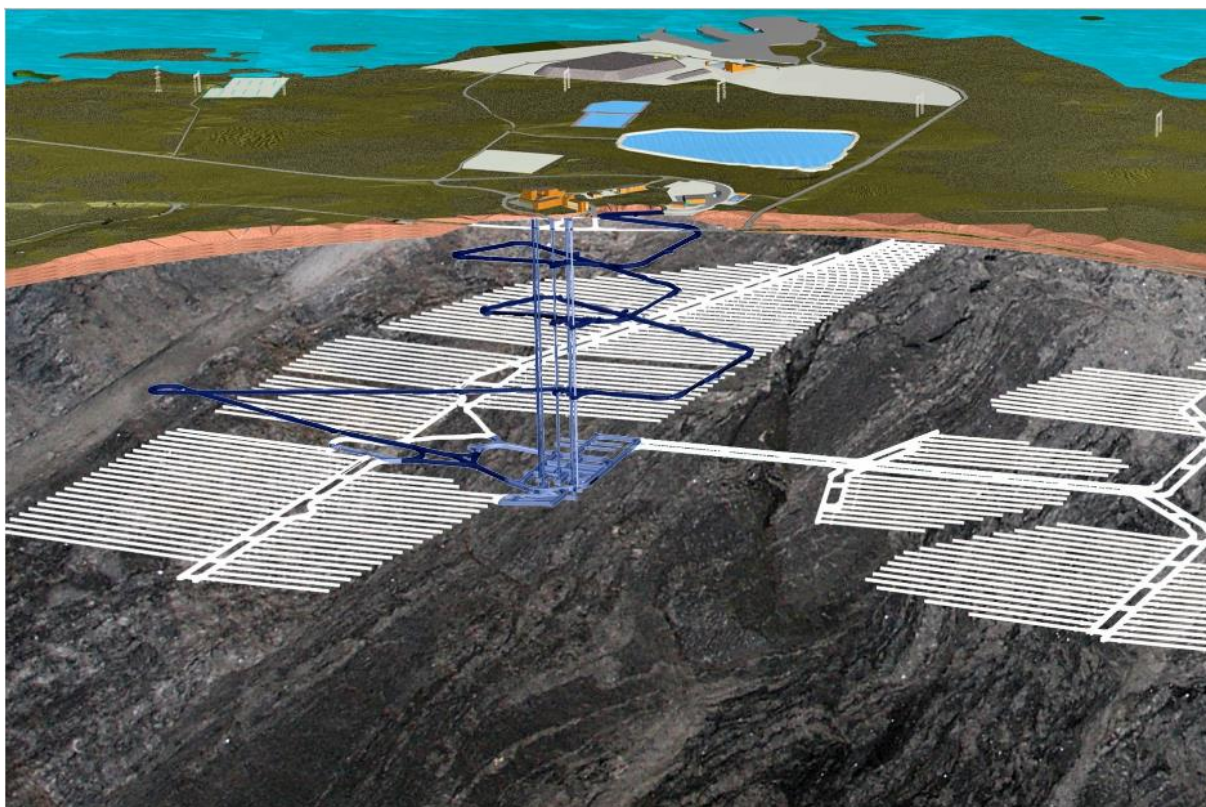
2.2.2. Odlagališta nuklearnog otpada u Švedskoj i Finskoj

Švedska i Finska prve su države koje će na principu spomenutog koncepta odlaganja KBS-3 zbrinuti svoj nuklearni otpad. Prvo takvo odlagalište nuklearnog otpada u Švedskoj nalazit će se u mjestu Osthhammar, u blizini nuklearne elektrane Forsmark (Slika 2-6.). Švedska vlada je u siječnju 2022. godine odobrila izgradnju odlagališta. (<https://en.wikipedia.org>, 2022).

U Finskoj, u pokrajini Eurajoki, u blizini nuklearne elektrane Olkiluoto u završnim fazama izgradnje gradi se odlagalište nuklearnog otpada Onkalo (Slika 2-7.). Gradnju odlagališta počela je 2004. godine tvrtka Posiva, koja će biti nadležna i za vođenje operacija odlaganja i trajnog zbrinjavanja nakon izgradnje, a sam završetak izgradnje planiran je 2022. godine. S operacijama odlaganja nuklearnog otpada počelo bi se oko 2023. godine. Pretpostavka je kako je kapacitet odlagališta dovoljan za odlaganje nuklearnog otpada otprilike sljedećih 100 godina, gdje bi se nakon toga pristupne tunele popunilo izolacijskim materijalima te zatvorilo (<https://en.wikipedia.org>, 2022).



Slika 2-6. Shema odlagališta nuklearnog otpada u blizini nuklearne elektrane Forsmark u Švedskoj (Patrakka, 2010)



Slika 2-7. Shema odlagališta nuklearnog otpada Onkalo u Finskoj (Patrakka, 2010)

3. ODLAGANJE ING-a I VRAO-a U DUBOKE BUŠOTINE

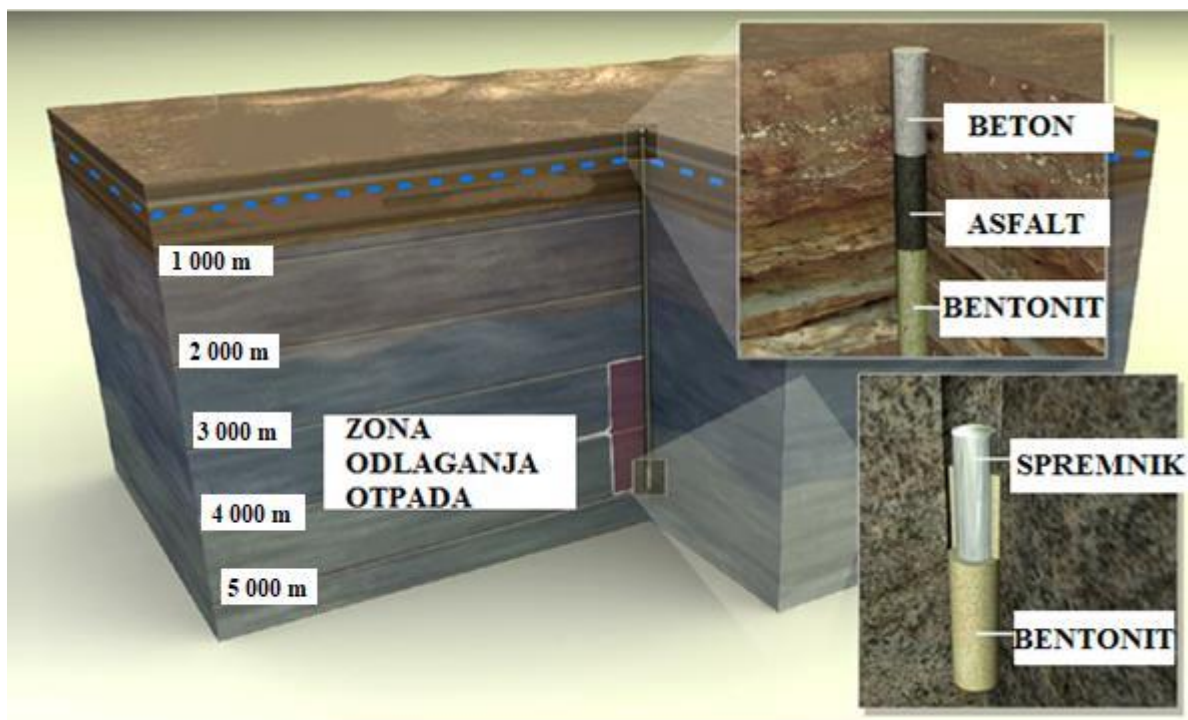
Osim dubokog geološkog odlaganja u duboke geološke formacije (tunele) razmatra se i koncept odlaganja u duboke bušotine. ING I VRAO odlagali bi se tako da se spremnici spuštaju vertikalno u bušotine u intervalu od 3 do 5 kilometara. Spomenuti koncept je razmatran dulje vremena, još od 50-ih godina prošlog stoljeća, no počeo se razmatrati sve više kao posljedica razvoja tehnologije bušenja u naftno plinskoj industriji.

3.1. Razvoj koncepta

Inicijalnu ideju za odlaganje radioaktivnog otpada u duboke bušotine pokrenula je 1957. godine Nacionalna akademija znanosti Sjedinjenih Američkih država (engl. *The U.S. National Academy of Sciences - NAS*). Iako je uobičajena praksa od tada bila takva da su se VRAO i ING odlagali u napuštene rudnike koji zadovoljavaju sve potrebne kriterije, u manjoj mjeri se razvijao i spomenuti koncept odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine.

Primjer koncepta odlaganja radioaktivnog otpada u najjednostavnijem obliku prikazan je na slici 3-1. Izvodi se tako da se do dubine od 5000 metara u kristalinsku baznu stijenu nabuši jedna ili više bušotina velikog promjera, gdje bi se u intervalu od 3000 do 5000 metara spustili spremnici s istrošenim nuklearnim gorivom ili vitrificiranim visokoradioaktivnim otpadom, dobivenim obradom istrošenog nuklearnog goriva. U spomenuti interval bi se moglo spustiti 400 spremnika dugih po 5 metara. Gornji interval, od 3000 m do površine bio bi popunjen materijalima koji bi služili kao trajna izolacija. Izolacijski interval sastojao bi se od naizmjeničnih slojeva bentonita i cementa. U plićem dijelu izolacijskog intervala mogao bi se koristiti i asfalt (Arnold et al., 2011).

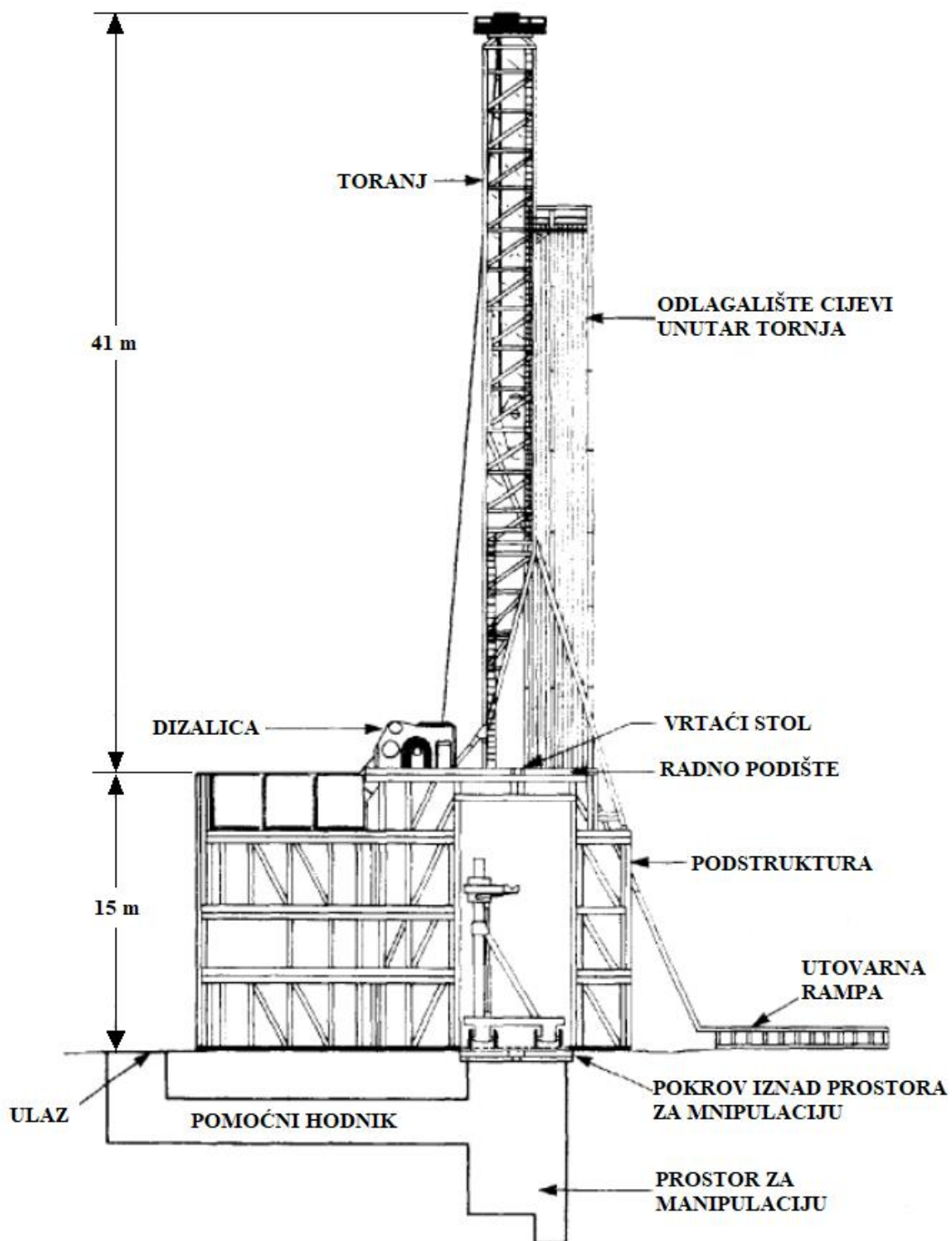
Iako se isprva čini kao relativno jednostavan koncept, sama izrada takve vrste bušotine, te operacije transporta i spuštanja radioaktivnog otpada u bušotinu, predstavljaju vrlo kompleksnu operaciju gdje nema mjesta pogreškama. Do danas niti jedan takav projekt nije realiziran, no kroz godine se taj koncept odlaganja usavršavao, te su s vremenom u teoriji donesene određene tehničke preporuke vezane za samu izvedivost i sigurnost, te ekonomske procjene za potencijalnu realizaciju tog koncepta.



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

3.2. Koncept kompanije Woodward-Clyde iz 1983. godine

Kompanija Woodward-Clyde 1983. godine razvila je koncept odlaganja otpada koji je obuhvaćao izradu bušotine promjera 0,51 m (20“) do dubine 6 100 m, koja bi mogla biti napravljena pod pretpostavkom razvoja tehnologije naftne industrije i tehnologije bušenja koja bi bila dostupna do 2000. godine. Predloženo je da bušotina bude nezacjevljena u donjem dijelu kanala, na dubini od 3 050 m do 6 100 m, gdje bi se trebao odlagati otpad. 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 duljine 3 m te vanjskog promjera 0,32 m koji bi bili ispunjeni dodatnim materijalom kako bi se spriječile moguće deformacije uslijed djelovanja hidrostatičkog tlaka. Takav koncept zahtijevao je poseban dizajn postrojenja, prikazan na slici 3-2., kako bi se otpadom moglo sigurno rukovati, a to je uključivalo povišenu podstrukturu, zaštićenu prostoriju ispod podstrukture 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).



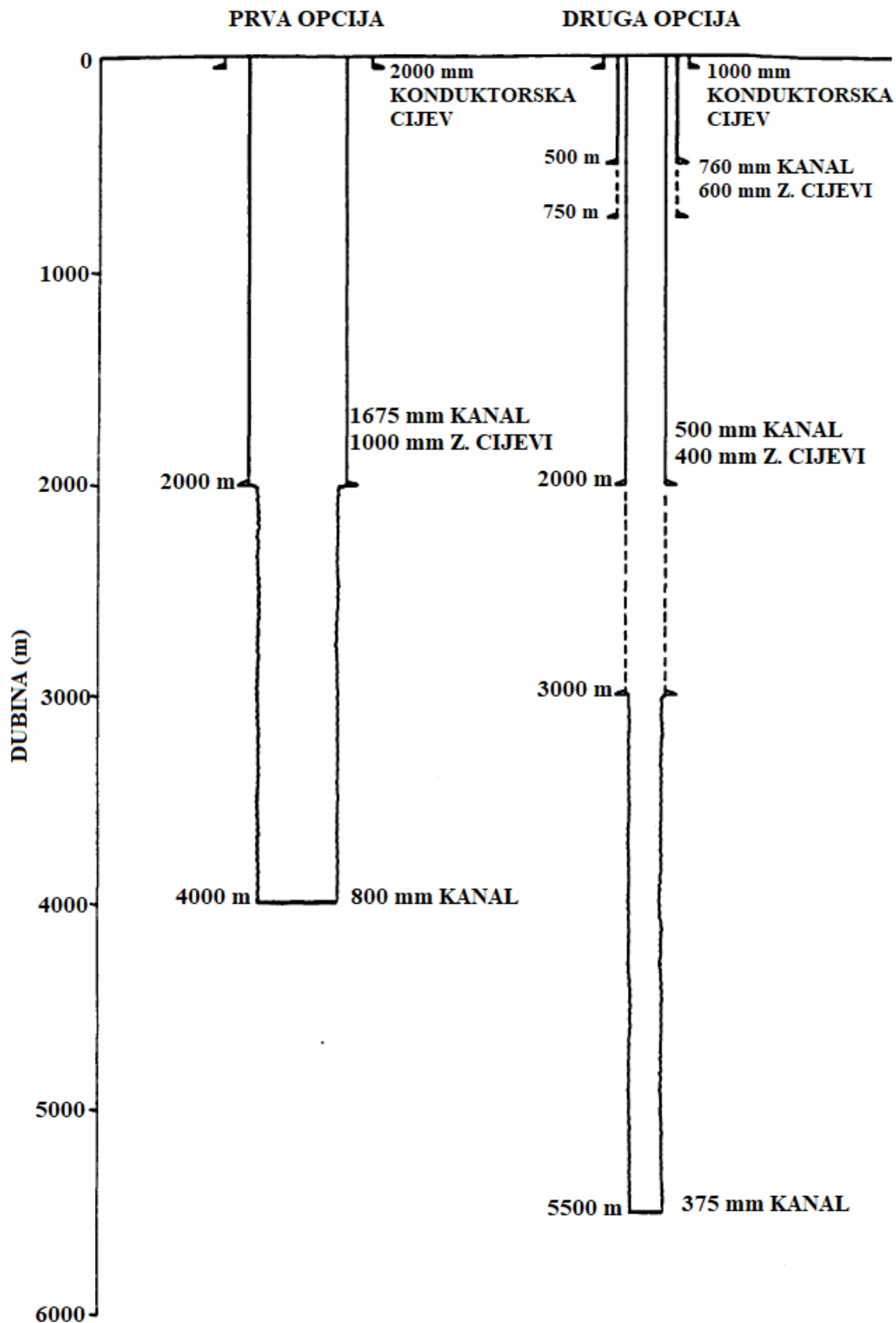
Slika 3-2. Shematski prikaz postrojenja za odlaganje otpada prema kompaniji Woodward-Clyde (Woodward-Clyde Consultants, 1983)

3.3. Program Climax iz 1986. godine

U Nevadi je 1986. godine proveden program Climax, tj. 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 duljine oko 4,50 m i promjera 0,36 m bile su pohranjene gorivne šipke. Rukovanje 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 čeličnom užetu kroz zacjevljenu bušotinu promjera 0,48 m do dubine od 420 m. Nakon postavljanja spremnika na dno, sljedeće 3,5 godine trajala su ispitivanja vezana za propuštanje radionuklida te su potom spremnici kroz istu bušotinu izvučeni natrag na površinu, te je zaključeno kako je test uspješno i sigurno proveden uz minimalno izlaganje radnika zračenju (Patrick, 1986).

3.4. Koncept Juhlina i Sandstedta iz 1989. godine

Godine 1989. Juhlin i Sandstedt zaključili su da bi duboke bušotine bile pogodne za trajno odlaganje istrošenog nuklearnog goriva. Razmatrali su tri varijante kanala bušotine s obzirom na promjer i dubinu. Prva opcija bio bi kanal bušotine promjera 0,80 m i dubine 4 000 m, gdje bi zona za odlaganje bila na dubini od 2000 m do 4000 m. Druga opcija je kanal bušotine promjera 0,375 m i dubine 5500 m, sa zonom za odlaganje na dubini od 2000 m ili 3000 m do 5500 m. Treća razmatrana opcija kanal je bušotine promjera 0,375 m i dubine 4000 m, sa zonom za odlaganje od 2000 m do 4000 m. Usporedba kanala bušotine prve i druge opcije prikazana je na slici 3-3. Bušotine druge i treće opcije karakterizirali su kao konvencionalne kanale bušotina velikog promjera rađene u naftno-plinskoj industriji, koristeći opsežno iskustvo prikupljeno izradom plinske bušotine Gravberg-1 u Švedskoj. Pomoću te bušotine približe bi odredili dizajn te cijenu samih bušotina za odlaganje nuklearnog otpada za te dvije opcije. Ipak, detaljnom diskusijom zaključili su da je za odlaganje nuklearnog otpada najpogodnija prva predložena opcija, jer je promjer od 0,8 m pogodniji za spuštanje spremnika u bušotinu, te je prostor između kanala i samih spremnika puno veći, što ide u prilog boljem popunjavanju izolacijskim materijalom, te posljedično tome i većoj sigurnosti od propuštanja radionuklida. Nadalje, kako je izrada takvog kanala puno skuplja od kanala bušotine promjera 0,375 m, zaključili su kako je manji broj potrebnih bušotina prihvatljiva kompenzacija s obzirom na samu cijenu izrade (Juhlin i Sandstedt, 1989).



Slika 3-3. Shema predloženih konstrukcija kanala bušotine za odlaganje i trajno zbrinjavanje istrošenog nuklearnog goriva (Juhlin i Sandstedt, 1989)

Juhlin i Sandstedt 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 2000 m. Nakon spuštanja spremnika u zonu odlaganja, zaštitne cijevi u donjem dijelu bušotine predviđenom za postavljanje cementnih čepova bile bi uklonjene kako bi se čepovi mogli postaviti. Za razliku od čeličnih spremnika predloženih od strane kompanije Woodward-Clyde, u izradi spremnika koristili bi se titan ili bakar. Spremnici bi bili duljine 5 m s unutarnjim promjerom 0,39 m te vanjskim promjerom 0,50 m, a praznine unutar spremnika bi se trebale popuniti određenim izolacijskim materijalima. Prvo bi se u bušotinu utisnula bentonitna suspenzija velike gustoće, a zatim bi se spuštali spremnici s otpadom. Predložili su da se u dio bušotine iznad spremnika, predviđen za izolaciju, u bentonitnu suspenziju spuštaju zbijeni bentonitni blokovi, te da se u gornjih 500 m kanala bušotine postave asfaltni i cementni čepovi (Juhlin i Sandstedt, 1989).

4. KONCEPT KOMPANIJE SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Kompanija Sandia National Laboratories okupila je tim znanstvenika i inženjera iz područja odlaganja radioaktivnog otpada, bušenja, geohidrologije, geokemije i geomehanike čiji je zadatak bio razviti jasan i relativno jednostavan koncept koji bi bio primjenjiv u praksi, te bi zadovoljavao sve uvjete sigurnosti provođenja operacija odlaganja te istovremeno predstavljao veoma mali rizik za čovjeka. Zadani ciljevi bili su usmjereni na stvaranje detaljnijeg koncepta bušotine za odlaganje s obzirom na prethodne radove iste tematike, uključujući izvedivost i međuodnos svih pojedinih dijelova sustava odlaganja gledajući ih kao cjelinu, sagledavanje alternativa s obzirom na dostupnost tehnologije, procjenu rizika, te stvaranje točnije referentne točke vezano za procjenu troškova cjelokupne operacije odlaganja nuklearnog otpada.

Jedan od glavnih kriterija korištenih za odabir ovog koncepta odlaganja temelji se na inženjerskoj i operativnoj izvedivosti, obzirom na trenutno dostupnu tehnologiju izrade kanala bušotine i na specifične izvedbe vezane za određene kompleksne radnje u operacijama odlaganja, primjerice transport i odlaganje spremnika s otpadom na dno kanala bušotine. Nadalje, sigurnost provedbe kriterij je koji se odnosi na potencijalne opasnosti tijekom same operacije odlaganja otpada u bušotinu, te potencijalne opasnosti nakon zatvaranja kanala bušotine. Opasnosti tijekom same operacije odnose se prvenstveno na izloženost radnika radioaktivnom materijalu, te nesreće i neželjene situacije tijekom cijele operacije odlaganja otpada, primjerice zaglava spremnika s otpadom u neželjeni dio kanala bušotine. Opasnosti nakon zatvaranja kanala bušotine baziraju se na ispuštanju radionuklida u biosferu u nekom trenutku u budućnosti s obzirom na protok fluida kroz bušotinu, te s obzirom na djelotvornost samog sustava izolacije bušotine. Kriterij koji se odnosi na jednostavnost izvedbe važan je s obzirom na to da u praksi ovakav koncept bušotine još uvijek nije realiziran. S obzirom na to, pretpostavka je da će tijekom procesa doći do pogrešaka koje bi u nekim slučajevima mogle biti veoma skupe. Bitna pogreška koju je pod svaku cijenu potrebno izbjeći zaglava je spremnika u kanalu bušotine. Vjerojatnost zaglave značajno bi se smanjila tako da je koncept odlaganja što jednostavniji, te pravilnom interpretacijom svih prikupljenih podataka o formaciji i samoj bušotini (Arnold et al., 2011).

4.1. Tehnički zahtjevi kod izrade bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada

Tehnički zahtjevi za izradu bušotine za odlaganje i trajno zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada prema Sandia National Laboratories su (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 osigurale nesmetano postavljanje spremnika s otpadom na ciljano dubinu uz minimalnu mogućnost zaglave spremnika u kanalu bušotine;
- Bušotina mora imati dovoljno veliki promjer 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 od 5000 m 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 popunjavanje i izolaciju bušotine. Optimalan učinak ispune postiže se kod izravnog kontakta materijala za popunjavanje i kanala bušotine;
- Zaštitne cijevi i cementni kamen u zoni odlaganja otpada moraju omogućiti toplinsko širenje fluida i protok u okolnu stijenu kako bi se izbjegao preveliki tlak fluida koji okružuje spremnike s otpadom,
- Konstrukcija kanala bušotine mora biti izvedena tako 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, tj. sve dok svi izolacijski intervali nisu kompletirani.

4.2. Tehničke specifikacije dijelova kanala bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada

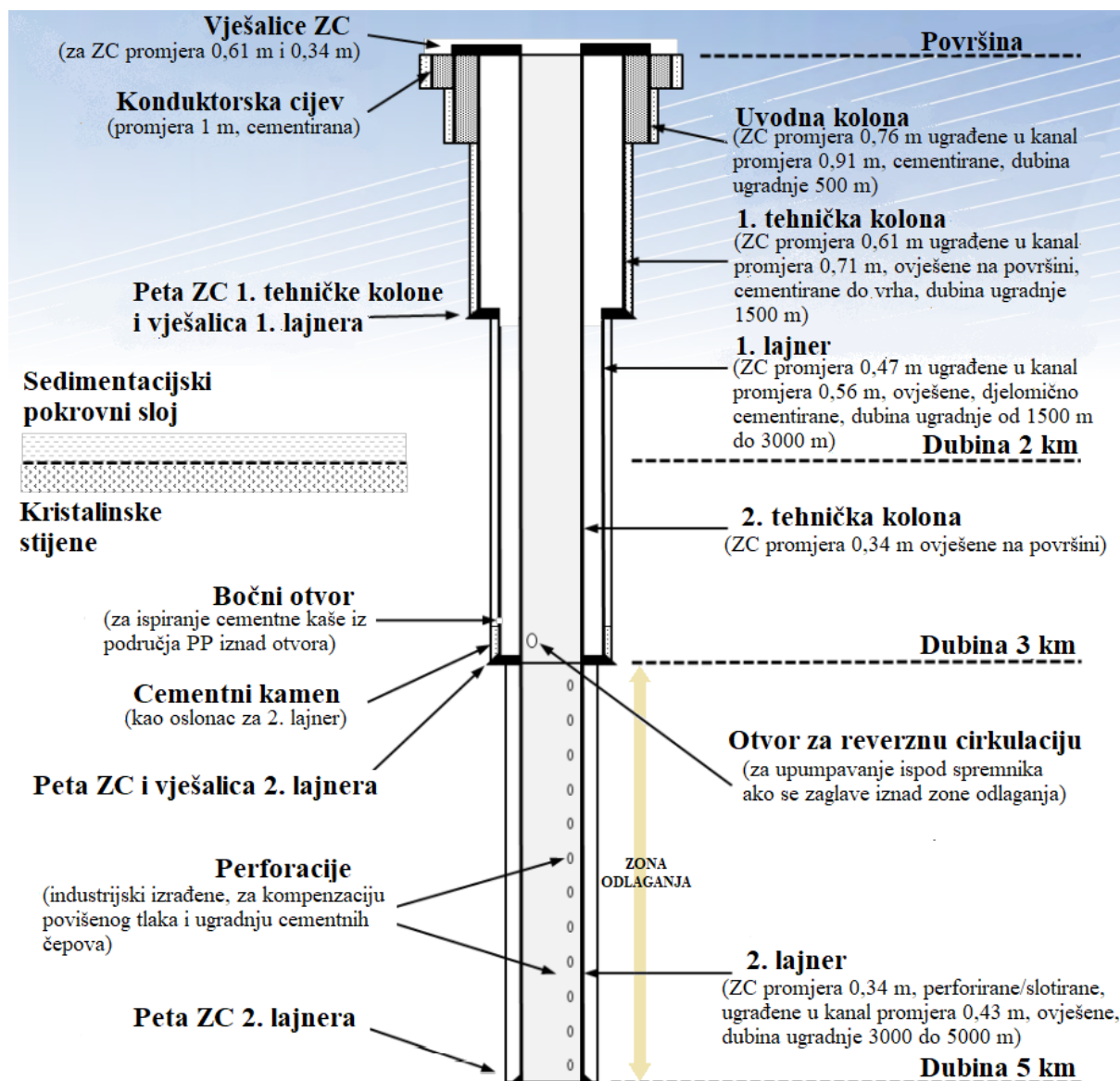
Prema Arnoldu i suradnicima konstrukcija bušotina za odlaganje i trajno zbrinjavanje otpada podrazumijeva ugradnju sljedećih kolona zaštitnih cijevi (Arnold et al., 2011):

- Konduktorske cijevi promjera 1 m (40") koju bi se ugradilo u kanal bušotine promjera 1,2 m (48") na dubinu 15 do 30 m i cementiralo;
- Uvodne kolone zaštitnih cijevi 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 ovisi o tome koliko će nadležna tijela dopustiti bušenje bez preventerskog sustava, u ovom slučaju to je oko 457 m;
- 1. tehničke kolone zaštitnih cijevi 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 1500 m;
- 1. lajnera 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 kroz bočni otvor jer bi se gornji dio lajnera morao ukloniti zbog postavljanja brtvenog sustava;
- 2. lajnera 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 slotiran ili perforiran te ovješeno o prethodni lajner;
- 2. tehničke kolone zaštitnih cijevi promjera 0,34 m (13 3/8") koju bi se ugradilo od ušća bušotine pa do dubine od 3 000 m, koju se ne bi cementiralo. 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.

Specifikacije dijelova kanala bušotine prikazane su tablicom 4-1., a shema konstrukcije kanala bušotine prikazana je slikom 4-1.

Tablica 4-1. Specifikacije dijelova kanala bušotine (Arnold et al., 2011)

| INTERVAL | VANJSKI PROMJER (m) | DEBLJINA STIJENKE (m) | TEŽINA (N/m) | VLAČNA ČVRSTOĆA (MPa) |
|------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Uvodna kolona | 0,76 | 0,019 | 3431 | 386,1 |
| 1. tehnička kolona | 0,61 | 0,017 | 2540,4 | 861,8 |
| 1. lajner | 0,47 | 0,0176 | 1985,6 | 861,8 |
| 2. lajner (perforiran) | 0,34 | 0,0097 | 795,7 | 386,1 |
| 2. tehnička kolona | 0,34 | 0,0097 | 795,7 | 386,1 |



Slika 4-1. Shema kanala bušotine za odlaganje RAO-a (Chapman, 2019)

Prema Arnoldu i suradnicima tijekom operacija bušenja bušotine prikazane na slici 4.1. uključuje sljedeće korake (Arnold et al., 2011):

1. Postavljanje konuktorske cijevi vanjskog promjera 1 m (40“) do 30 m dubine;
2. Podizanje tornja, te bušenje kanala promjera 0,91 m (36“) do otprilike 497 m dubine (alternativno izbušiti kanal promjera 0,66 m (26“) te proširiti na promjer od 0,91 m);
3. Provođenje bušotinske karotaže od dna konuktorske cijevi sve do 497 m dubine;
4. Zacjevljenje kanala bušotine uvodnom kolonom vanjskog promjera 0,76 m (30“) do 497 m dubine;
5. Cementacija zaštitnih cijevi promjera 0,76 m (30“) do površine;
6. Navarivanje prirubnice promjera 0,76 m (30“), te instaliranje i testiranje opreme preventerskog sklopa;
7. Bušenje cementacijske pete te provođenje leak-off testa;
8. Bušenje kanala bušotine vanjskog promjera 0,71 m (28“) od 497 m do 1500 m dubine;
9. Provođenje bušotinske karotaže u nezacjevljenom dijelu kanala, od 497 m do 1500 m dubine;
10. Zacjevljenje kanala bušotine 1. tehničkom kolonom vanjskog promjera 0,61 m (24“) od površine do 1500 m dubine;
11. Cementacija zaštitnih cijevi promjera 0,61 m (24“) od dna do vrha kanala bušotine;
12. Rezanje prirubnice promjera 0,76 m (30“), te navarivanje prirubnice promjera 0,61 m (24“) na zaštitne cijevi;
13. Postavljanje i testiranje preventerskog sklopa;
14. Bušenje cementacijske pete te provođenje leak-off testa;
15. Bušenje kanala bušotine vanjskog promjera 0,56 m (22“) od 1500 m do 3000 m dubine;
16. Provođenje bušotinske karotaže u nezacjevljenom dijelu kanala, od 1500 m do 3000 m dubine;
17. Ugradnja 1500 m 1. lajnera promjera 0,47 m (18 5/8“) vješanjem na dno zaštitnih cijevi promjera 0,61 m (24“). Lajner će imati bočni otvor na određenom mjestu ispod vrha sloja granita;
18. Cementacija donjeg dijela lajnera, sve dok cementna kaša ne dođe u prstenasti prostor iznad bočnog otvora. Nakon toga otvoriti bočni otvor i cementnu kašu koja se nalazi iznad otvora iscirkulirati van prstenastog prostora;
19. Zatvaranje bočnog otvora, bušenje cementacijske pete te provođenje leak off-testa;
20. Bušenje kanala bušotine vanjskog promjera 0,43 m (17“) od 3000 m do 5000 m dubine;

21. Provođenje bušotinske karotaže u nezacijevljenom dijelu kanala, od 3000 m do 5000 m dubine;
22. Ugradnja 2000 m 2. lajnera ,slotiranog ili perforiranog, promjera 0,34 m (13 3/8“) vješanjem na dno 1. lajnera promjera 0,47 m (18 5/8“) na dubini od 3000 m;
23. Ugradnja 2. tehničke kolone vanjskog promjera 0,34 m (13 3/8“) od površine do vješalice 2. lajnera, na dubini od 3000 m. Dno 2. tehničke kolone bit će postavljeno u priključak koji će se nalaziti na vješalici 2. lajnera, te će omogućavati vertikalni pomak dna same kolone. Vrh 2. tehničke kolone bit će ovješan o priključak ispod prirubnice promjera 0,61 m (24“). Kolona neće biti cementirana;
24. Demontaža opreme preventerskog sklopa i demontaža tornja.

Iako izrada kanala bušotine velikog promjera do 0,5 m na dubini od 5000 m još uvijek nije izvedena, u Australiji, Francuskoj i Sjedinjenim Američkim Državama su izrađene bušotine u slojevima granita, ali s manjim promjerima kanala. S obzirom na to, te na dostupnu tehnologiju, izrada takve bušotine u teoriji je izvediva, no u praksi bi to bio veoma kompleksan zahvat. U izradi bi se koristio veliki konvencionalni toranj s radnom šipkom, te sa žrvanjским dlijetima s insertima od volframova karbida, dijamantnim ili polikristalinskim dlijetima, ili pak turbinska bušilica s utisnutim dijamantnim rezačima.

S obzirom na to da minimalni razmak između više kanala bušotine za odlaganje ne smije biti manji od 50 m, bušotine bi se izrađivale pomoću metode usmjerenog bušenja, kako bi se trajektorija bušenja mogla kontrolirati, te kako bi se po potrebi korigirao otklon bušotine. Samim tim, brzina bušenja kroz kristaliničnu stijenu bila bi spora, oko 1 m/h, te bi se dlijeto brzo trošilo i zahtijevalo čestu zamjenu. Kako će svojstva nabušenih stijena utjecati na brzinu bušenja, odnosno parametre bušenja (opterećenje na dlijeto, ispiranje, rotacijska brzina), potrebno je što bolje poznavati litologiju stijena cijelom dionicom koja se buši.

Ako se ovi faktori uzmu u obzir, cijena izrade kanala bušotine velikog promjera za odlaganje VRAO-a, posebice prve bušotine na određenoj lokaciji, bila bi veoma visoka i teško procjenjiva. S obzirom na to, kako bi se dobio što bolji uvid u kanal bušotine i pojednostavio sam proces bušenja kanala, potrebno je izvršiti što više operacija bušotinske karotaže, o kojima će više biti u nastavku rada.

4.3. Ispitivanja u bušotini

Veliki dio cijene same izrade bušotina velikog promjera bit će posljedica samih promjera potrebnih kako bi spremnici s nuklearnim otpadom mogli u njih biti postavljeni. S obzirom na to, kako bi se smanjila cijena izrade bušotina velikog promjera prvo bi se na predviđenoj lokaciji izbušila bušotina malog promjera malo dublje od ciljane dubine samih bušotina predviđenih za odlaganje radioaktivnog otpada. Bušotina ne bi bila predviđena za odlaganje nuklearnog otpada, već samo za provođenje potrebnih istraživanja i mjerenja. Značajno smanjenje cijene u prvom redu postiglo bi se korištenjem manjeg bušaćeg tornja koji ima manji dnevni najam, te korištenjem zaštitnih cijevi manjih promjera uz koje bi se koristilo manje materijala za operacije cementacije. Bušotina bi bila dovoljno velikog promjera, najmanjeg promjera na dnu bušotine od 0,22 m (8 ½“), za obavljanje svih potrebnih ispitivanja i testiranja u bušotini, od kojih su neki navedeni u tablici 4-2. Analiza tih ispitivanja i testova uvelike bi pridonijela smanjenju pogrešaka pri bušenju bušotina velikog promjera, znajući u kojim dionicama bi moglo doći do problema i kako ih izbjeći, te koja dlijeta bi bila najpogodnija za korištenje. Uz to, neki uređaji za bušotinsku karotažu mogu se koristiti do maksimalnog promjera bušotine od 0,51 m, a aparati za jezgrovanje velikog promjera veoma su skupi, samim tim ekonomski neisplativi. Istražna bušotina bi se nakon svih potrebnih operacija zapunila i zatvorila na isti način kao i bušotine za odlaganje otpada, kako kroz nju ne bi došlo do bilo kakvog vertikalnog migriranja radionuklida u biosferu (Arnold et al., 2011).

Pomoću istražne bušotine određivala bi se sljedeća geološka i hidrogeološka svojstva slojeva (Brady et al., 2012):

- rasjedi i frakture,
- stratigrafija,
- strukturalna stabilnost i litologija,
- integritet kanala bušotine i izolacijskih čepova,
- kemizam fluida u bušotini.

4.3.1. Rasjedi i frakture

Međusobno povezana područja rasjeda i fraktura visoke propusnosti predstavljaju potencijalne smjerove kretanja podzemnih voda prema površini koje bi mogle transportirati radionuklide, pogotovo u fazi najvećeg otpuštanja topline radioaktivnog otpada iz spremnika. Stoga je važno prepoznati zone rasjeda i fraktura, točnije njihove lokacije i smjer pružanja. Neki

rasjedi koji izbijaju na površinu Zemlje mogu se pružati duboko u zemljinu koru, tako i u moguća područja predviđena za smještanje bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada (Brady et al., 2012).

4.3.2. Stratigrafija

Kada je u pitanju stratigrafija, važno je locirati samu baznu stijenu za odlaganje, te otkriti postoje li u blizini bazne stijene rasjedi, solne dome, kao i relativno mlade magmatske stijene i magmatske intruzije. Kako bi lokacija bušotina za odlaganje bila pogodna za daljnje operacije, potrebno je eliminirati postojanje ovakvih geoloških struktura koje mogu utjecati na zadržavanje radionuklida u zoni odlaganja i na efikasnost spremnika za odlaganje (Brady et al., 2012).

4.3.3. Strukturalna stabilnost i litologija slojeva

Područja koja su podložna potresima, ili imaju povijesne zapise o potresima, nisu pogodna za izradu bušotina za odlaganje radioaktivnog otpada. Zaključke o strukturalnoj stabilnosti te tektonskoj aktivnosti može se dobiti iz proučavanja horizontalnog naprezanja u pojedinim slojevima u podzemlju, u slučaju da se radi o različitim vrijednostima horizontalnog naprezanja. Također, proučavanje sastava stijena i fluida unutar pojedinih slojeva može pružiti informacije o geološkoj povijesti strukture razmatrane za odlaganje, koje su bitne za dugoročnu stabilnost i izolaciju zone odlaganja (Brady et al., 2012).

4.3.4. Integritet kanala bušotine i izolacijskih čepova

Što bolji spoj kanala bušotine i izolacijskih čepova važan je kada je riječ o izoliranju, tj. zadržavanju odloženog otpada unutar bušotine. Alatke za ispitivanje integriteta bušotine nužne su kako bi se što bolje opisale njene značajke, kao što su mehanička svojstva bazne stijene koja okružuje bušotinu, utjecaj anizotropije u horizontalnom naprezanju i rasjedi koji presijecaju kanal bušotine. Identifikacija tih značajki važna je u donošenju odluke da li je određena lokacija pogodna za odlaganje otpada.

Svojstva izolacijskih čepova također je poželjno što bolje proučiti, budući da je njihova zadaća da izoliraju nuklearni otpad unutar kanala bušotine, da podupiru težinu spremnika koji se nalaze iznad, te da izdrže tlak kao posljedicu širenja fluida oko kanala bušotine uslijed otpuštanja topline iz samog otpada (Brady et al., 2012).

Tablica 4-2. Površinska i potpovršinska istraživanja i njihova svrha (Brady et al., 2012)

| Metoda | Svrha istraživanja |
|---|---|
| Površinsko mapiranje | Određivanje litologije stijena na površini, koreliranje površinske litologije sa vrstama stijena u bušotini |
| 3D seizmičko mapiranje | Određivanje potencijalnih presjecanja kanala bušotine sa rasjedima ili frakturama, snimanje stratigrafije slojeva |
| Kaliper | Određivanje promjene promjera kanala (bubrenje glina, urušavanje kanala) |
| Karotaža spontanog potencijala | Određivanje litologije stijena, određivanje zona velike propusnosti (frakture), saliniteta i ionske koncentracije podzemne vode |
| Karotaža električne otpornosti | Određivanje kontakta kristalinične bazne stijene, informacija o litostratigrafiji, informacija o propusnosti formacije i zasićenosti fluida |
| Temperaturna karotaža | Određivanje geotermalnog gradijenta |
| Mikroskenner formacije (FMI) | Odrediti promjene u promjeru kanala bušotine, te frakture uzrokovane bušenjem |
| Neutronska karotaža | Procijeniti pojavu fraktura u baznoj stijeni, te poroznost (uz kombinaciju drugih metoda) |
| Jezgrovanje | Odrediti litologiju stijena i njihova mehanička svojstva |
| Uzorkovanje krhotina (tijekom bušenja) | Određivanje vertikalnog profila nabušenih slojeva |
| Karotaža anizotropnosti formacije | Određivanje <i>in situ</i> maksimalnog i minimalnog horizontalnog naprezanja |
| Testiranje bušotine kroz bušaću šipku (DST) | Određivanje tlaka formacije |
| Ispitivanje bušotine metodom pada tlaka | Odrediti informacije o mogućim kretanjima fluida kroz i oko izolacijskih čepova |

4.4. Spremnici za odlaganje nuklearnog otpada

Konstrukcija samog spremnika za odlaganje (Arnold et al., 2011) mora biti takva da omogućava najveći mogući nivo sigurnosti, tj. da radioaktivni materijal bude u potpunosti izoliran unutar spremnika tijekom svih faza operacija skladištenja, od transporta na lokaciju bušotine sve do spuštanja spremnika, te do trenutka kada su izolacijski čepovi postavljeni u bušotinu. Osim toga, sve nadzemne operacije moraju biti podvrgnute svim potrebnim provjerama i mjerama sigurnosti kada je u pitanju radioaktivno zračenje.

4.4.1. Tehnički zahtjevi konstrukcije spremnika

Prema Arnoldu i suradnicima konstrukcija spremnika mora zadovoljiti sljedeće tehničke zahtjeve (Arnold et al., 2011):

- Konstrukcija spremnika za odlaganje (prvenstveno varovi i brtveni sustavi na samom spremniku), mora omogućiti dovoljnu razinu sigurnosti kako kod operacija transporta i spuštanja spremnika u bušotinu ne bi došlo do ispuštanja radionuklida u bilo kojem agregatnom stanju;
- Spremnici moraju održati strukturalnu cjelovitost tijekom punjenja, prijevoza, te manipulacije, prije same operacije odlaganja, tj. spuštanja u bušotinu;
- Spremnici moraju održati strukturalnu cjelovitost tijekom operacije odlaganja, popunjavanja izolacijskim materijalima, te napuštanja bušotine. Nadalje, spremnici moraju biti takve čvrstoće da mogu izdržati sva mehanička opterećenja, tlakove fluida, te temperaturu u bušotini tijekom faze odlaganja i faze popunjavanja izolacijskim materijalima;
- Spremnici moraju imati sustav spajanja koji omogućava međusobno spajanje spremnika, te povezivanje spremnika s bušaćim alatima kako bi se kod spuštanja u kanal bušotine niz spremnika spuštao kao cjelina. Spojevi moraju biti takve čvrstoće da izdrže sva moguća opterećenja za vrijeme i nakon samog spuštanja u kanal bušotine, te u slučaju mogućeg povrata tijekom same operativne faze;
- Unutarnja duljina spremnika mora biti takva da može primiti netaknute gorive elemente. Mehanički netaknuti gorivi elementi određuju minimalnu unutarnju duljinu spremnika;
- Spremnici moraju što dulje održati mehaničku cjelovitost nakon operativne faze, iako se ovaj koncept odlaganja ne oslanja na to da će spremnici biti značajna barijera kada je riječ o ispuštanju radionuklida nakon operativne faze;

- Konstrukcija, rukovanje i odlaganje spremnika u bušotinu moraju biti takvi da nema nikakve šanse da se pojave problemi uz rad s visoko radioaktivnim otpadom.

Nominalno mehaničko opterećenje koje spremnici moraju podnijeti proizlazi od pretpostavke da bi se spremnici u bušotinu spuštali kao cjelina od 40 spremnika, čija bi kumulativna duljina bila otprilike 200 m. U toj cjelini najveće tlačno opterećenje na najdonji spremnik bio bi jednako najvećem vlačnom opterećenju najgornjeg spremnika u fazi spuštanja u bušotinu. Konstrukcija spremnika s obzirom na cjelinu od 40 spremnika i spomenuta opterećenja proizlazi iz pretpostavke da bi svaki spremnik sadržavao 421 gorivni element, od kojih bi svaki težio 2,39 kg. Tako bi ukupna težina 40 spremnika s otpadom bila otprilike 69 400 kg. Što se tiče uzgona, u ovom konceptu odlaganja on je zanemaren. Nadalje, sile izazvane potencijalnom potrebom za izvlačenjem spremnika moraju biti razmatrane u granicama sigurnosti s obzirom na samu konstrukciju spremnika.

S obzirom na varijacije dubine odlaganja i razinu topline koju bi gorivi elementi otpuštali, osmišljena su dva dizajna spremnika za nuklearni otpad (Arnold et al., 2011):

1. tankostjeni spremnik – konstruiran za temperature do 160 °C, te
2. debelostjeni spremnik – konstruiran za temperature do 300 °C

Maksimalne temperature navedenih spremnika proizlaze iz prethodnih istraživanja (Brady et al., 2009) gdje su vrijednosti temperatura ugrubo određene pomoću simulacija odlaganja istrošenog nuklearnog goriva i vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada dobivenog reprocesingom.

Hidrostatski tlak slojnog fluida koji bi djelovao na spremnike funkcija je dubine bušotine i gustoće slojnog fluida u bušotini. Gustoća slojnog fluida ovisi o temperaturi i salinitetu koji variraju promjenom dubine. U matičnoj stijeni na dubinama do kojih bi se izrađivale duboke bušotine za odlaganje očekuje se podzemna voda visokog saliniteta, ali sastav fluida unutar zacijevljene bušotine mogao bi se kontrolirati do određene mjere tijekom spuštanja spremnika u bušotinu. Vrijednost tlaka slojnog fluida temelji se na pretpostavljenoj vrijednosti saliniteta varirajući od vrijednosti gustoće slatke vode na površini do 1,1 puta veće vrijednosti gustoće slatke vode za dubinu do 500 m, te varirajući od 1,1 puta veće vrijednosti gustoće slatke vode od 500 m do 1,3 puta veće vrijednosti gustoće slatke vode na dubini do 5000 m. Pretpostavljeni temperaturni gradijent je 25 °C/km, te bi konačni tlak na dnu bušotine bio oko 57 MPa. Spremnici bi bili dizajnirani tako da bez ikakvih unutarnjih mehaničkih

ojačanja mogu izdržati taj proračunati tlak. Debljina stijenke samog spremnika određena je preko specifikacije API 5CT za K55 bešavne cijevi sa sigurnosnim faktorom 1,2. Standardno odstupanje debljine stijenke prema toj specifikaciji je $\pm 12,5\%$, te je vrijednost loma spremnika proračunata preko minimalne vrijednosti debljine stijenke obzirom na odstupanje. S obzirom na zahtjeve specifikacije, te odabrane bešavne cijevi, dimenzije spremnika za odlaganje prikazane su tablicom 4-3.

Tablica 4-3. Dimenzije spremnika za odlaganje (Arnold et al., 2011)

| | Unutarnji promjer (m) | Vanjski promjer (m) | Debljina stijenke (m) |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Tankostjeni spremnici (do 160 °C) | 0,212 | 0,273 | 0,0307 |
| Debelostjeni spremnici (do 300 °C) | 0,204 | 0,273 | 0,0343 |

4.4.2. Punjenje spremnika otpadom

Kada je u pitanju punjenje spremnika otpadom, koncept se bazira na tome da se gorivni elementi iz tlačnih reaktora (engl. *Pressurised Water Reactor - PWR*) same nuklearne elektrane ili centralnog skladišta rastave na zasebne šipke te pakiraju u spremnike. Ovakav način intenzivniji je vremenski i financijski, no omogućava upotrebu spremnika manjih dimenzija, posljedično tome i konstrukciju kanala bušotine manjih promjera, te smanjuje kompleksnost i težinu izrade bušotine do potrebne dubine. Nadalje, što bolje pakiranje gorivnih šipki u spremnike za posljedicu ima korištenje manjeg ukupnog broja spremnika, manje potrebnih bušotina za odlaganje, te nižu cijenu transporta, bušenja i drugih operativnih troškova.

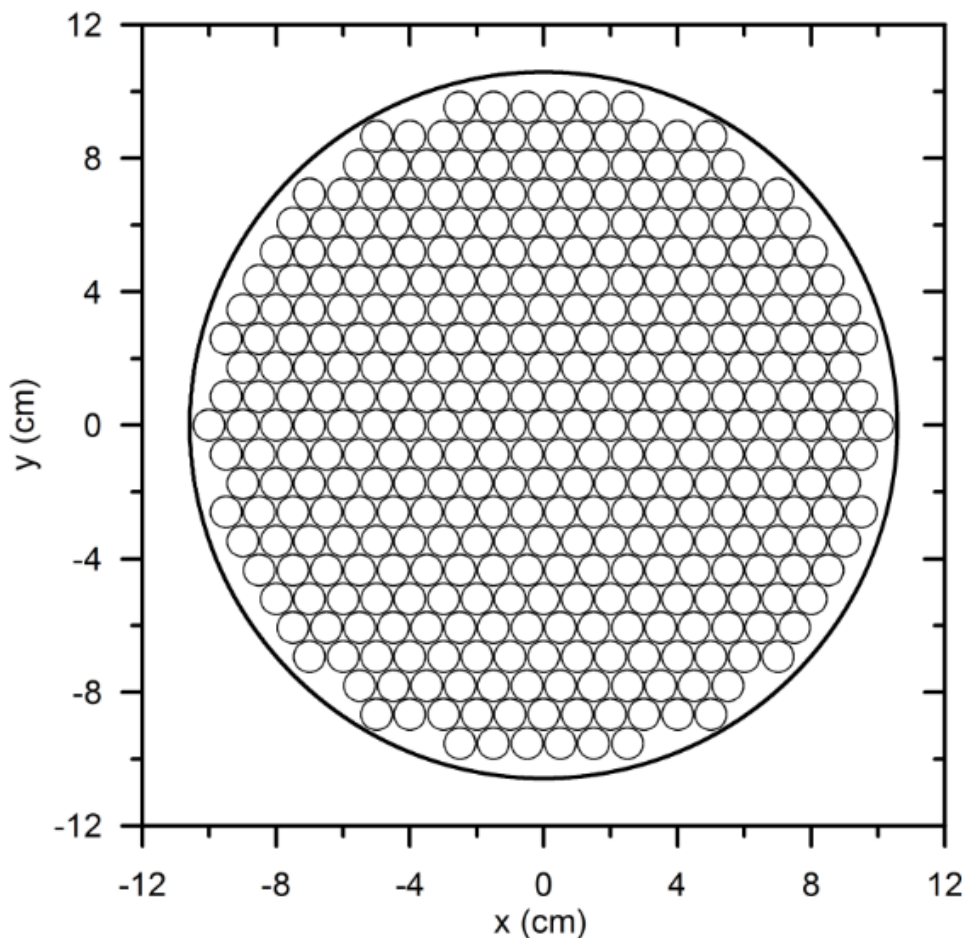
Gibbs (2010) je obuhvatio zaključke financijskih procjena prethodnih studija kada je u pitanju rastavljanje gorivih elemenata na zasebne gorivne šipke, te njihovo pakiranje u spremnike. Zaključci koncepta su sljedeći:

- koncept je tehnički izvediv,
- cjenovno je prihvatljiv,
- viša cijena bila bi kompenzirana uštedom s obzirom na manji broj spremnika te bušenje bušotina manjih promjera.

Kada su u pitanju gorivni elementi iz tlačnih reaktora, gotovo svi se mogu rastaviti na zasebne gorivne šipke. Nadalje, mnoge nuklearne elektrane te skladišta nuklearnog otpada imaju dijelove postrojenja koji bi se mogli prenamijeniti i nadograditi u tu svrhu, a projektiranje takvih dijelova postrojenja bilo bi relativno jednostavno, obzirom na veličinu samih spremnika.

Njihova svrha bila bi u pravilu sastavljanje, točnije spajanje, zavarivanje, osiguravanje brtvljenja te rukovanje spremnicima otpada (Arnold et al., 2011).

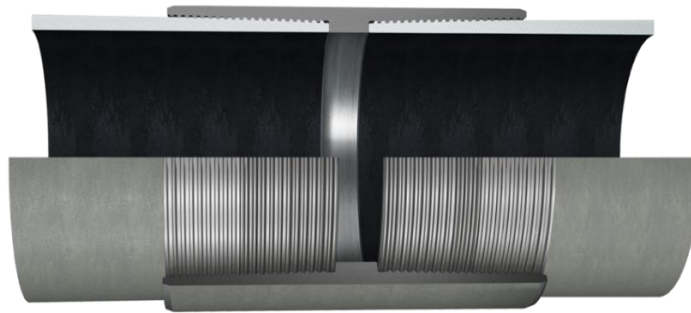
Smještanje u spremnike zasebnih gorivnih šipki kružnog presjeka i 1 cm promjera temelji se na heksagonalnom pakiranju, prikazanom na slici 4-2. Tankostjeni spremnici konstruirani su tako da mogu primiti otprilike 367 pojedinačnih gorivih šipki, a debelostjeni spremnici, nešto manjeg unutarnjeg promjera, mogu primiti otprilike 349 gorivih šipki. Za usporedbu, tankostjeni spremnici imaju 37% veći kapacitet skladištenja s obzirom na standardne jezgre tlačnih reaktora dimenzija 17 x 17 koji sadrže svega 268 pojedinačnih gorivih šipki. Prema ovom gušćem načinu pakiranja, procjenjuje se da bi se za odlaganje svog dotadašnjeg proizvedenog istrošenog nuklearnog goriva proizvedenog u Sjedinjenim američkim državama moralo izraditi 700 bušotina umjesto 950 kada su u pitanju jezgre standardnih tlačnih reaktora (Brady et al., 2009).



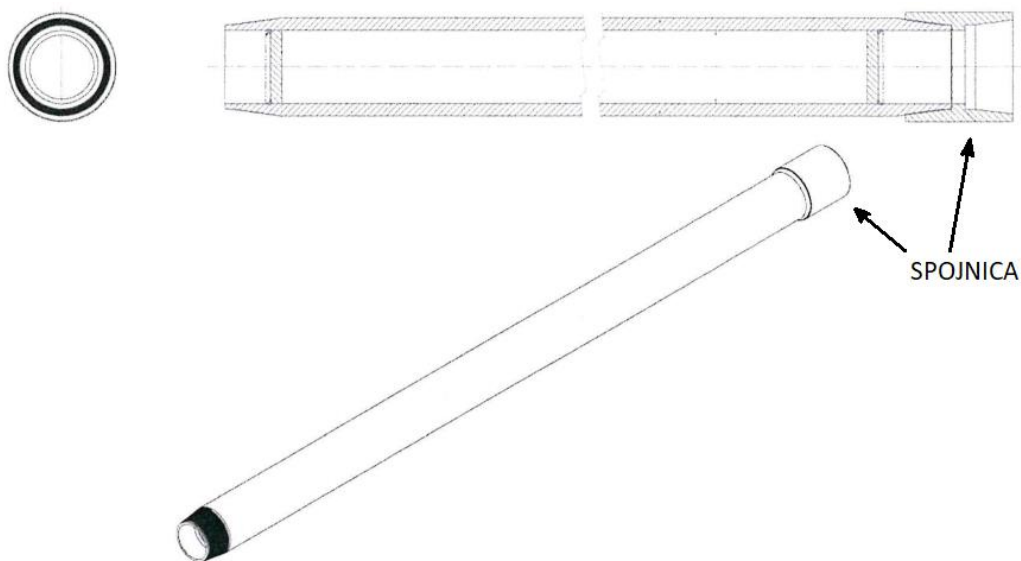
Slika 4-2. Presjek tankostjenog spremnika s 367 gorivih šipki promjera 1 cm (Arnold et al., 2011)

4.4.3. Spajanje spremnika

Spremnici bi se međusobno spajali tankostjenim „premium“ spojnicama velike nosivosti korištenim u naftno-plinskoj industriji (Veinović, 2020). Primjer takve spojnice prikazan je na slici 4-3, a shema spremnika te spoj spremnika sa spojnicom prikazani su na slici 4-4. Spojnice bi bile vanjskog promjera koji odgovara veličinama spremnika, te bi po postojećim podacima o minimalnoj čvrstoći za spojnice s manjom debljinom stijenke imali čvrstoću od 550 MPa. Prvi najgornji spremnik u cjelini od 40 spremnika imao bi sigurnosnu J-bravu, koja ima relativno jednostavan način odvajanja niza cijevi od samih spremnika kada se isti spuste na predviđenu dubinu zone odlaganja. Razni proizvođači proizvode različite oblike sigurnosnih brava, no u pravilu sve se koriste na sličan način te imaju istu namjenu (Arnold et al., 2011).



Slika 4-3. Spojnica velike nosivosti sa slabije izraženim konusnim navojem (<https://www.tenaris.com>, 2022)



Slika 4-4. Shema spremnika sa spojnicom prema Sandia National Laboratories (Arnold et al., 2011)

4.5. Odlaganje spremnika u bušotinu

Nakon rastavljanja jezgri tlačnih reaktora u zasebne gorivne šipke i pakiranja u spremnike za odlaganje, za transport do lokacije odlaganja koristili bi se posebno dizajnirani robusni spremnici. Za vrijeme transporta radnici koji sudjeluju u transportu bili bi zaštićeni, kao i ljudi i područja kojima bi se spremnici prevozili. U svakom spremniku mogao bi se transportirati po jedan spremnik napunjen gorivnim šipkama. Kako se u ovom konceptu predlaže korištenje postrojenja predloženog od strane kompanije Woodward-Clyde iz 1983. godine (Slika 3-2.), spremnici za transport trebali bi biti osmišljeni tako da se dolaskom na lokaciju odlaganja mogu postaviti u vertikalni položaj, da se mogu postaviti u bušaći toranj, te da se spremnik s otpadom može spojiti na niz bušaćih šipki pomoću kojih bi se spuštao u bušotinu. Za postavljanje spremnika u vertikalni položaj i postavljanje u područje ispod podstrukture na radilištu bi bio izgrađen sustav tračnica, prikazan na slici 4-5., pomoću kojeg se spremnici u vertikalnom položaju relativno jednostavno mogu prevesti s transportnog vozila do same bušotine. Radi najveće razine sigurnosti, spremnici s otpadom bili bi u zaštitnim spremnicima od trenutka rastavljanja i postavljanja gorivnih šipki, te zatvaranja, pa sve do spajanja na niz cijevi u tornju i spuštanja u bušotinu (Arnold et al., 2011).

4.5.1. Izolacijski materijali

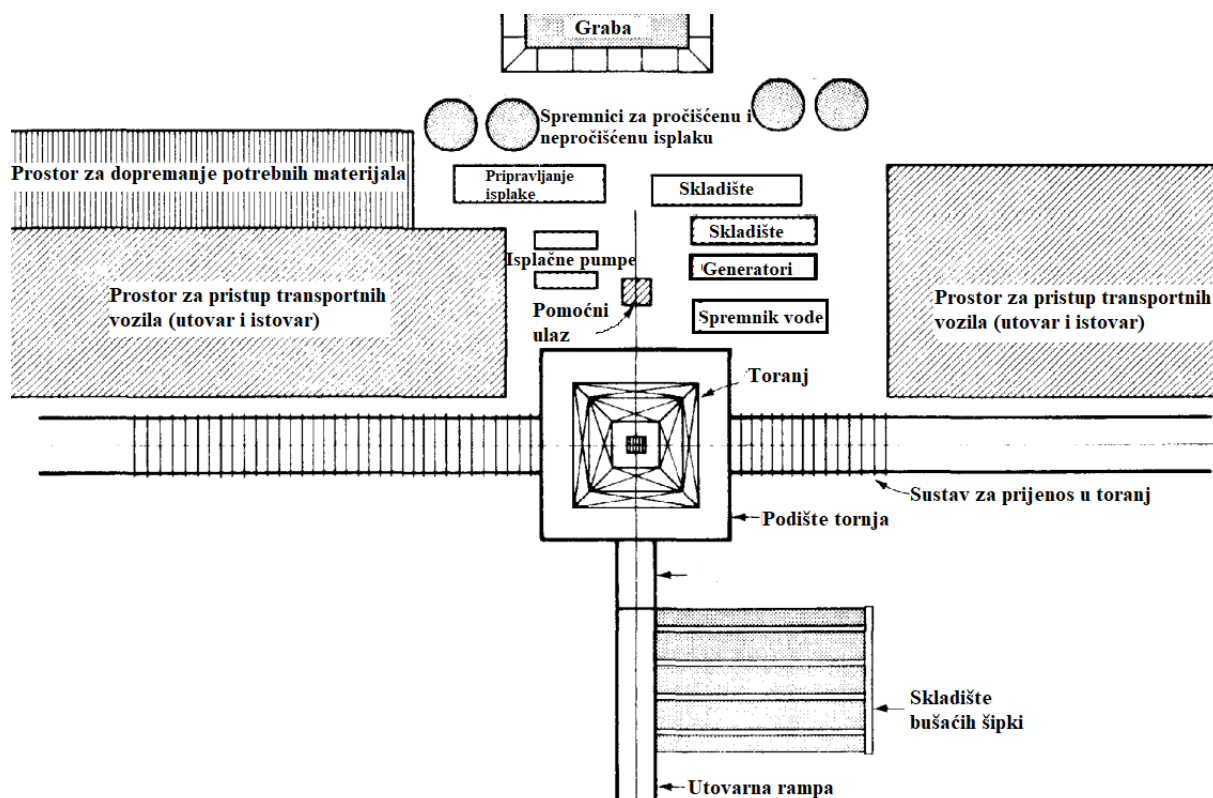
Kod operacija odlaganja koristila bi se sintetička isplaka na bazi ulja koja sadrži bentonit. Kako spremnici nakon spuštanja neće biti cementirani, ova vrsta isplake popuniti će prostore između spremnika i kanala bušotine. Također, uloga isplake bit će i podmazivanje stjenki kanala bušotine kako bi se omogućio što lakši prolazak spremnika, ili u slučaju zaglave vađenje spremnika iz bušotine.

Mosni i cementni čepovi bit će postavljeni između svake cjeline od 40 spremnika. Uloga mosnih čepova je ta da služe kao temelj na koji će deblji cementni čepovi biti postavljeni. Ti čepovi kao cjelina moraju biti u mogućnosti podupirati težinu cjeline spremnika koja se nalazi iznad njih. Također, cementni čep bi ulazio u prstenasti prostor između perforiranog ili slotiranog 2. lajnara (slika 4-1.) i stjenki kanala bušotine, te bi služio kao barijera migracije fluida između pojedinih ugrađenih cjelina spremnika. Zbog nekompatibilnosti isplake na bazi ulja i cementne kaše, prije samog postavljanja cementnih čepova isplaku je u području iznad cementnog čepa potrebno iscirkulirati iz bušotine, tj. zamijeniti isplakom kompatibilnom sa cementnom kašom. Nakon postavljanja zadnje cjeline spremnika u bušotinu, u područje iznad postavlja se jedan dodatni cementni čep (Arnold et al., 2011).

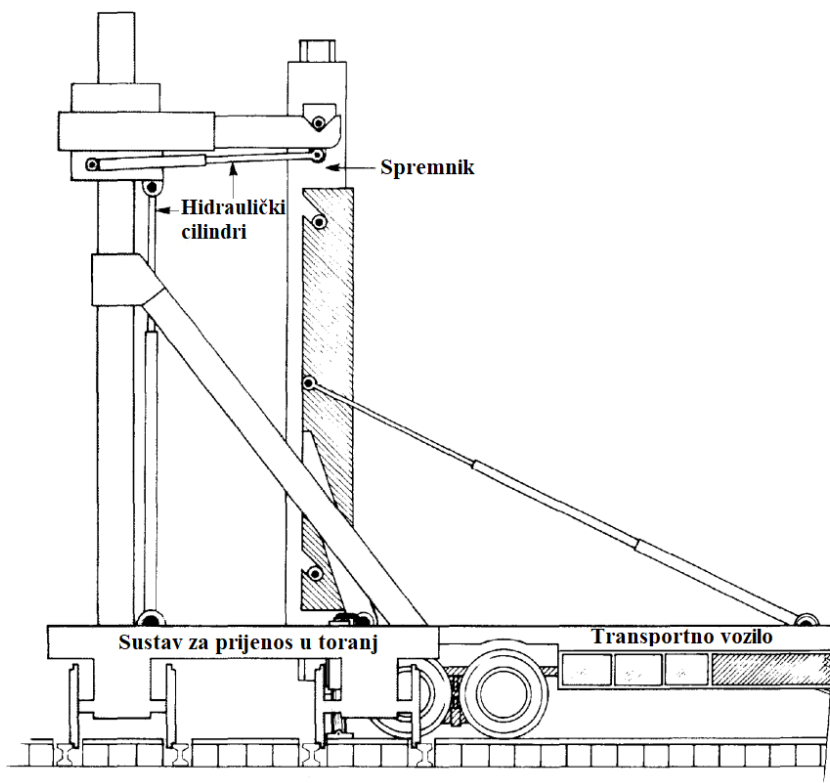
4.5.2. Manipulacija spremnicima u tornju i odlaganje u bušotinu

Tijek operacija manipulacije spremnicima i njihovo odlaganje u kanal bušotine je sljedeći (Woodward-Clyde Consultants, 1983):

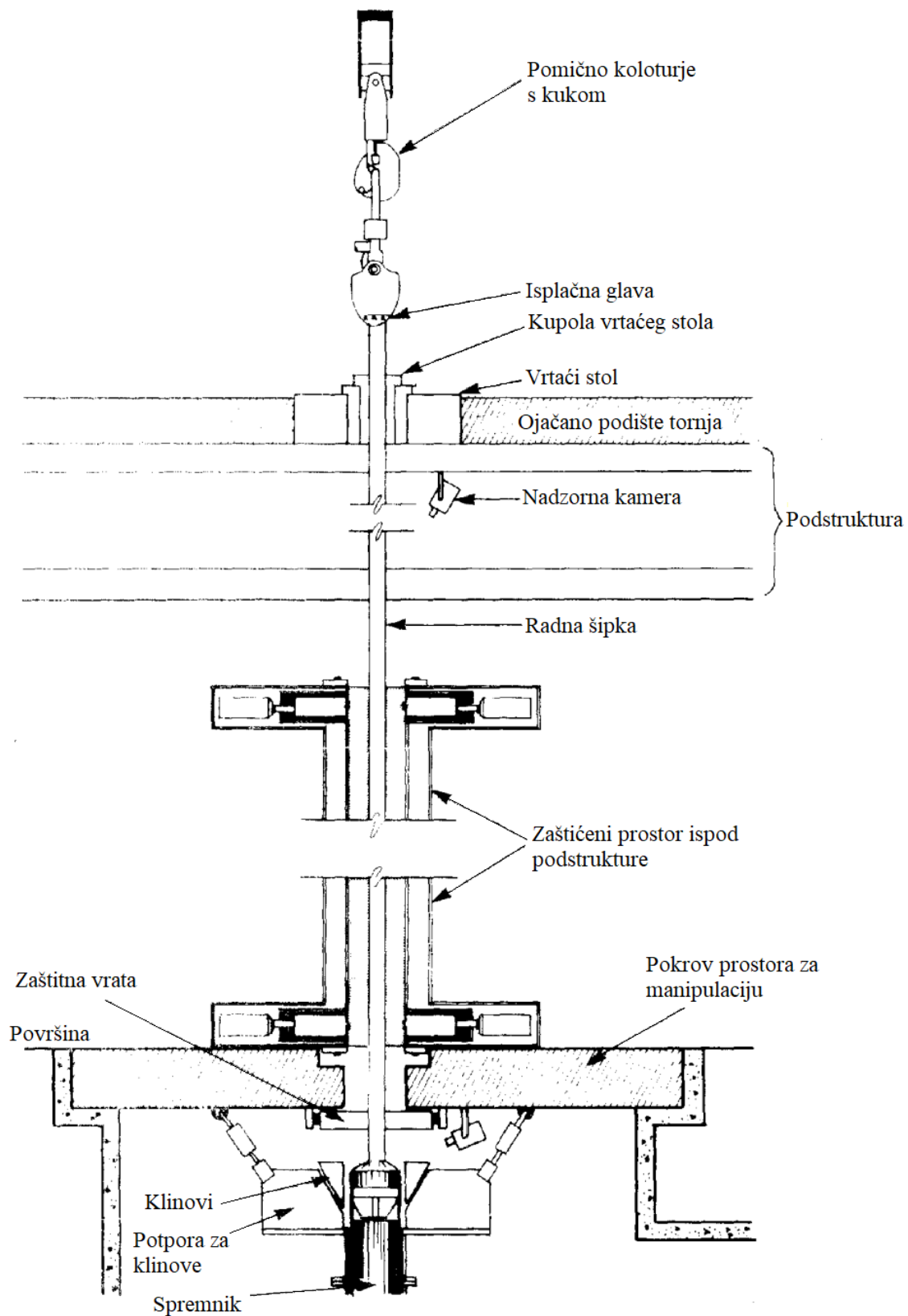
1. Pozicioniranje vozila za iskrcavanje prvog transportnog spremnika;
2. Podizanje transportnog spremnika u vertikalni položaj na sustav za prijenos u toranj i postavljanje u zaštićeni prostor ispod podišta tornja (Slika 4-6.);
3. Zatvaranje vrata zaštićenog prostora ispod podišta tornja;
4. Otvaranje vrata iznad kanala bušotine;
5. Otvaranje gornjeg poklopca transportnog spremnika;
6. Spajanje radne šipke na spremnik s otpadom odgovarajućom spojnicom;
7. Podizanje spremnika s otpadom kako bi se smanjila težina s donjeg poklopca transportnog spremnika;
8. Otvaranje donjeg poklopca transportnog spremnika;
9. Spuštanje spremnika u zaštićeni prostor za manipulaciju (Slika 4-7.);
10. Spajanje spremnika s prethodno spuštenim spremnikom kojeg pridržavaju klinovi i hidrauličke čeljusti;
11. Otvaranje klinova i hidrauličkih čeljusti;
12. Spuštanje niza za duljinu novog spremnika i aktiviranje klinova i hidrauličkih čeljusti;
13. Otpajanje i podizanje radne šipke iznad prostora za manipulaciju;
14. Zatvaranje vrata iznad kanala bušotine te donjeg i gornjeg poklopca transportnog spremnika;
15. Uklanjanje praznog transportnog spremnika iz zaštićenog prostora ispod podišta tornja;
16. Uvođenje i postavljanje novog transportnog spremnika iznad kanala bušotine;
17. Ponoviti korake 1 do 16 sve dok se niz od 40 spremnika ne nalazi u kanalu bušotine;
18. Spuštanje niza spremnika na dno zone za odlaganje, ili na vrh cementnog čepa postavljenog iznad prethodnog niza spremnika;
19. Otpuštanje niza spremnika te vađenje niza bušaćih šipki van kanala bušotine;
20. Spuštanje mosnog čepa opremom na žici;
21. Spuštanje niza bušaćih šipki i postavljanje cementnog čepa;
22. Utiskivanje bentonitne isplake na bazi ulja u donjih 200 m kanala bušotine, kao priprema za spuštanje sljedećeg niza spremnika za odlaganje;
23. Vađenje niza bušaćih šipki van kanala bušotine;
24. Ponoviti korake 1 do 23 sve dok u zonu odlaganja nije spušteno 10 nizova spremnika.



Slika 4-5. Shema tlocrta radilišta s nadograđenim sustavom tračnica za prijenos spremnika u toranj (Woodward – Clyde Consultants, 1983)



Slika 4-6. Podizanje transportnog spremnika u vertikalni položaj na sustav za prijenos u bušaći toranj (Woodward - Clyde Consultants, 1983)



Slika 4-7. Zaštićeni prostor za manipulaciju spremnika ispod podišta tornja (Woodward – Clyde Consultants, 1983)

4.6. Zatvaranje bušotine

Koncept odlaganja otpada u duboke bušotine oslanja se primarno na niz višestrukih barijera postavljenih u interval kanala bušotine predviđen za popunjavanje izolacijskim materijalima. Glavna zadaća izolacijskih materijala kojima bi se bušotina zatvorila minimiziranje je mobilnosti fluida kroz dugi niz godina kao posljedice otpuštanja topline radioaktivnog otpada, posebice u ranoj fazi odlaganja kada je toplinsko otpuštanje najintenzivnije. Uz izolacijske materijale postavljene u bušotinu, koncept se oslanja na samu dubinu odlaganja, tj. na područje oko kanala bušotine koje sadrži slojeve veoma niske propusnosti u svrhu sprječavanja mobilnosti fluida.

4.6.1. Izolacijski materijali

Kada su u pitanju bilo koje bušotine u kojima se koriste izolacijski materijali, oni moraju biti pouzdani te ispuniti svoju svrhu. U suprotnom, odabir krivih izolacijskih materijala za određene uvjete u bušotini i njihovo neadekvatno postavljanje mogu dovesti do velikih problema, u krajnjem slučaju do prisilnog zatvaranja i napuštanja bušotine. Zajednička svojstva svih izolacijskih materijala su sljedeća: niska propusnost, ostvarivanje dobre veze s kanalom bušotine (i oštećenim intervalima kanala kao posljedica bušenja), minimalan rizik oštećenja te otpornost prema termalnim, kemijskim i mehaničkim promjenama uslijed tlakova i temperatura očekivanih u bušotini koje mogu dovesti do degradacije (Freeze et al., 2019).

Cementi - Koriste se već dugi niz godina u izradi naftnih, plinskih i geotermalnih bušotina. Za svrhu ugradnje cementnih čepova koriste se cementne kaše pripravljene od cementa klase A, C, G i H, no odabir je ovisan o samim karakteristikama bušotine (dubina, tlakovi, svojstva formacije, svojstva fluida). Cementi imaju nisku propusnost, mogu popuniti vrlo male frakture, te su veoma dugotrajni. Prema nekim studijama, vrijednosti propusnosti Portland cementa pomiješanog s vodom u omjeru 0,4 nakon 14 dana stvrdnjavanja iznose 10^{-20} m². S obzirom na pojavu fraktura u cementnom kamenu, sažimanju tijekom stvrdnjavanja i kemijskim izmjenama kao posljedice uvjeta u bušotini propusnost se u terenskoj primjeni može smanjiti. Dugotrajnost cementnih čepova (Thompson et al., 1996) određena je tako da se proučavalo koliki je broj pornih volumena vode (slatke i slane) moguće protisnuti kroz cementni uzorak. Analizom je utvrđeno da je potrebno oko 100 pornih volumena prije no što dođe do degradacije matriksa.

Najslabije točke gdje bi se mogao pojaviti protok fluida kontakt je cementnog kamena sa stijenkama kanala bušotine. Prije samog utiskivanja cementne kaše kanal bušotine se mora

što bolje očistiti, kako u kanalu ne bi bilo zaostataka isplačnog obloga ili isplake koja nije kompatibilna s cementnom kašom. Tijekom i nedugo nakon upumpavanja cementne kaše kreće proces stvrdnjavanja i prelaska u cementni kamen, pogotovo u uvjetima visokog tlaka i temperature, gdje može doći do neadekvatnog izoliranja kanala bušotine pomoću cementnih čepova. Nadalje, veoma je teško vrlo precizno popuniti sve dijelove kanala bušotine kako bi se stvorio cementni kamen koji bi u kontinuiranom intervalu tvorio odličan izolacijski čep. Korištenjem aditiva mogla bi se kondicionirati cementna kaša kako bi se usporio proces stvrdnjavanja i što bolje popunili svi predviđeni dijelovi kanala te kako bi se spriječilo nastajanje fraktura unutar cementnog kamena uoči smanjenja volumena tijekom procesa stvrdnjavanja.

Bentonit - Glina koja u kontaktu s vodom nabubri, stoga je zanimljiv izolacijski materijal za razmatranje kada su u pitanju bušotine za odlaganje otpada. S obzirom na to da ima veliku kontaktnu površinu i stvara barijeru vrlo niske propusnosti, koristi se u raznim operacijama bušenja u naftno plinskoj industriji, primarno kao aditiv za reguliranje filtracijskih i reoloških svojstava isplake. Također se, obzirom na navedene prednosti, vrlo detaljno proučava u svrhu izoliranja spremnika nuklearnog otpada kod odlaganja u dubokim geološkim strukturama (tuneli).

Kako bentonit nabubri u kontaktu s vodom, predstavlja odličan izolacijski materijal, no veliki problem predstavlja postavljanje bentonita u bušotinu na veliku dubinu, a da prije toga ne reagira i ne nabubri. Izolacijska svojstva bentonita mogu se narušiti s obzirom na to da u bušotini mora biti hidratiziran, obzirom na razinu reaktivnosti s podzemnom vodom, te s obzirom na interakcije s drugim materijalima u bušotini. Nadalje, nabubrenje bentonita smanjuje se s porastom temperature te se izbjegava izlaganje bentonita temperaturama iznad 100 °C, a i zbog mogućeg prelaska u nebrubri ili.

Asfalt (bitumen) – Smjesa mineralnih tvari i bitumena koja s obzirom na njihov omjer prilikom same proizvodnje može imati različita svojstva. Svojstva asfalta kao izolacijskog materijala su netopivost u vodi, kemijska inertnost, duktilnost te dugotrajnost. Negativne strane korištenja asfalta su otežan način ugradnje na većim dubinama te upitno ponašanje u reakciji s podzemnom vodom, samim tim i nedovoljno dobra pretpostavka dugotrajnog sprječavanja mobilnosti radionuklida.

Drobljene stijene – Mogu biti korištene kao izolacijski materijal u kombinaciji s materijalima kao što su pijesak ili glina. Bez obzira na relativno jednostavan način ugradnje, teško je stvoriti

izolacijski interval bez šupljina. No, fino granulirane stijene mogu biti ugrađene kao balast koji će spriječiti kemijske reakcije između cementa i bentonita.

„Varenje“ stijene – Koncept kojim se drobljeni granit posebnom alatkom djelomično tali i rekristalizira te zajedno sa kanalom bušotine tvori „var“ sličnih svojstava kao prvotna kristalinska stijena. Ovim konceptom može se dobiti veoma jak i dugotrajan izolacijski čep sličnih svojstava kao bazna stijena te žarenjem zatvoriti oštećenja kanala bušotine nastala bušenjem. Koncept na laboratorijskoj razini pokazuje obećavajuće rezultate, no u praksi je potrebno još puno testova kako bi se optimizirao i koristio kao mogući način izoliranja na razini same bušotine.

Silikonska guma – Najčešće se koristi se u kombinaciji s cementom kod plinskih bušotina kako bi s kanalom bušotine stvorila nepropusnu barijeru za plin. Materijal je takav da ne dolazi do smanjenja volumena, otporan je na temperature do 300 °C kao i na razne kemijske uvjete u bušotini, te se lako može ugraditi pomoću postrojenja sa savitljivim tubingom. S obzirom na pozitivne aspekte ovog materijala poželjna su daljnja istraživanja u svrhu izolacije bušotina za odlaganje otpada.

Keramički (termitni) čepovi – Postavljaju se u predviđeni dio kanala bušotine te zapaljuju kako bi brzim hlađenjem ekspandirali. Pretpostavka je da su njihova izolacijska svojstva bolja od izolacijskih svojstava cementnih čepova kada je riječ o propusnosti te dugotrajnosti. Pokazuju veliki potencijal kada je u pitanju višezonsko izoliranje korištenjem različitih materijala.

Sandaband® - Patentirani proizvod, tj. izolacijska mješavina koja se sastoji od kombinacije barita i bentonita s do 75% silikatnog pijeska. Kada je pomiješan s vodom, viskoziferima i disperzantnima ponaša se kao Bingam fluid te se kao mobilna faza može upumpati u bušotinu, a u stanju mirovanja se ponaša kao krutina. Ima sposobnost deformiranja i samozacijeljenja kada se na njega primjeni naprezanje koje bi uzrokovalo prelazak granice elastičnosti. Ostala svojstva koja idu u prilog izoliranju kanala bušotine su mala propusnost, otpornost na smanjenje volumena i pojavu fraktura, stabilnost pri visokim temperaturama, te dugotrajnost. S druge strane, negativne karakteristike ovog proizvoda su te što sadrži organske materijale i samim tim ovisi o uvjetima u bušotini, ugradnja je otežana s obzirom na to da mora biti izoliran od ostalih fluida i materijala koji se nalaze u bušotini, te sama činjenica da nema mnogo studija koje opisuju korištenje u dubokim bušotinama.

Geopolimeri – Materijali proizvedeni alkalnom aktivacijom letećeg pepela klase C (nusprodukt sagorijevanja lignita i sub-bituminoznog ugljena) s otopinom natrijeva hidroksida i natrijeva silikata. S obzirom na to da su u ranim fazama proučavanja kada je u pitanju njihovo korištenje u dubokim bušotinama, nisu još uvijek primjenjivi u praksi.

4.6.2. Tehnološki zahtjevi operacije zatvaranja bušotine

Prema konceptu Sandia National Laboratories operacija zatvaranja bušotine mora zadovoljiti sljedeće tehnološke zahtjeve (Arnold et al., 2011):

- Izolacijski čepovi moraju služiti kao barijera kretanju fluida kanalom bušotine. Propusnost korištenih materijala u intervalu bušotine iznad spremnika s otpadom prema Herricku i sur. (2011) mora biti manja od $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, no Sandia National Laboratories za svoj koncept zahtjeva ukupnu propusnost manju od $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$;
- Izolacijski materijali moraju zajedno sa stjenkama bušotine stvoriti barijeru niske propusnosti kako se fluidi u bušotini ne bi mogli kretati oko samih izolacijskih čepova. Za tu svrhu posebno je pogodan kompaktni bentonit, koji popunjavanjem pukotina smanjuje propusnost bazne stijene;
- Izolacijski čepovi moraju biti izdržljivi, posebice za vrijeme najveće termalne aktivnosti kada je mogućnost kretanja fluida najveća (<2000 godina);
- Izolacijski čepovi moraju biti u mogućnosti izdržati mehanička opterećenja materijala koji se nalaze iznad te moguća povećanja tlaka iz nižih intervala kanala bušotine;
- Izolacijski materijali moraju biti stabilni na temperaturama do 200 °C najmanje 2000 godina, dok je termalna aktivnost otpada najveća;
- Određeni izolacijski materijali moraju imati sposobnost izmjene, tj. dopunjavanja s tvarima koji bi imali sposobnost usporavanja radionuklida koji se ne mogu adsorbirati;
- Kombinacije izolacijskih materijala i izolacijskih čepova po dubini zone zatvaranja moraju biti u mogućnosti spriječiti migraciju fluida i radionuklida ako dođe do gubljenja funkcije pojedinačnog izolacijskog dijela u bušotini;
- Kombinacija izolacijskih materijala i izolacijskih čepova po dubini zone zatvaranja također se izvodi zbog degradacije pojedinih izolacijskih materijala kroz duga vremenska razdoblja.

Testiranje izolacijskih čepova uključuje sljedeće (Arnold et al., 2011):

- Laboratorijska istraživanja kojima bi se proučavala čvrstoća materijala, propusnost, vremenska degradacija materijala, optimalan sastav materijala u cilju što bolje kompatibilnosti s kanalom bušotine s obzirom na karakteristike okolnih stijena i fluida u bušotini, te sastav materijala koji bi do neke mjere mogao hvatati radionuklide;
- *In situ* tlačna ispitivanja čvrstoće i propusnosti izolacijskih čepova postavljanjem pakera u kanal bušotine.

4.6.3. Postavljanje izolacijskih materijala

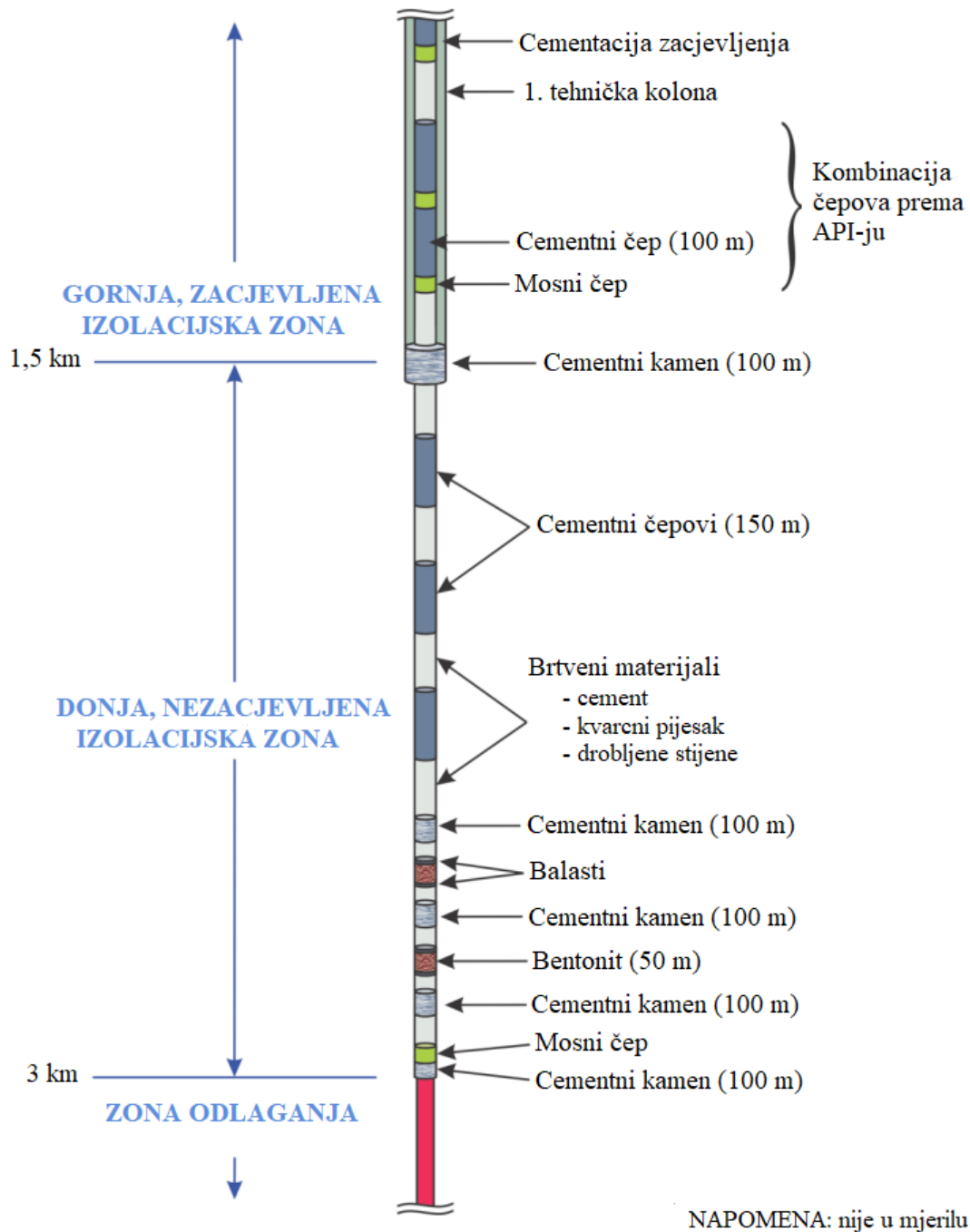
Prema konceptu Sandia National Laboratories (Arnold et al., 2011) prije samog početka postavljanja izolacijskih materijala iznad postavljenih spremnika iz kanala bušotine moraju se odrezati i izvaditi necementirani dijelovi 2. tehničke kolone zaštitnih cijevi promjera 0,34 m i 1. lajner promjera 0,47 m kako bi dio izolacijskih čepova bio postavljen u nezacjevljeni dio kanala od 1500 m do 3000 m dubine, tj. u kontaktu sa stjenkama kanala bušotine. Nakon spuštanja zadnjeg niza spremnika u zonu za odlaganje prvo bi se alatom za rezanje zaštitnih cijevi odrezala 2. tehnička kolona odmah iznad posljednjeg postavljenog cementnog čepa te bi se kolona izvadila korištenjem alatke za hvatanje zaštitnih cijevi (engl. *casing spear*). Nakon 2. tehničke kolone istim postupkom bi se iz bušotine uklonio 1. lajner.

Nezacjevljeni interval kanala bušotine protezat će se od 1500 m dubine do prethodno postavljenog cementnog čepa iznad spremnika u duljini od oko 100 m čija svrha je brtvljenje i termalna izolacija intervala iznad njega te mosnog čepa postavljenog iznad njega. Interval će biti popunjen naizmjeničnim sekcijama cementnih i bentonitnih čepova između kojih će se na predviđenim dubinama postavljati kvarcni pijesak te drobljene stijene koje služe kao balast, tj. zona odvajanja cementnih i bentonitnih čepova kako između njih ne bi došlo do nepoželjnih kemijskih interakcija. Cementni čepovi će osim funkcije brtvljenja služiti i za ograničavanje bubrenja bentonita te kao potpora balastnim materijalima. Nadalje, između pojedinih cementnih čepova bit će postavljeni materijali kao što su kvarcni pijesak ili drobljene stijene koji su kemijski kompatibilni s okolnim stijenama te imaju mogućnost usporiti smanjenje volumena tijekom prelaska cementne kaše u cementni kamen.

Gornji, zacjevljeni dio kanala bušotine bit će popunjen pretežito cementnim čepovima. Područje pete 1. tehničke kolone, na otprilike 1500 m, bit će cementirano 50 m ispod i iznad same pete zaštitnih cijevi. Preporuka Američkog naftnog instituta (engl. *American Petroleum*

Institute - API) postavljanje je mosnog čepa na koji će se postaviti cementni čep, nakon toga postavljanje drugog mosnog čepa nakon kojeg slijedi još jedan cementni čep. Ostatak izolacijskog intervala bit će popunjen pijeskom i drobljenim stijenama.

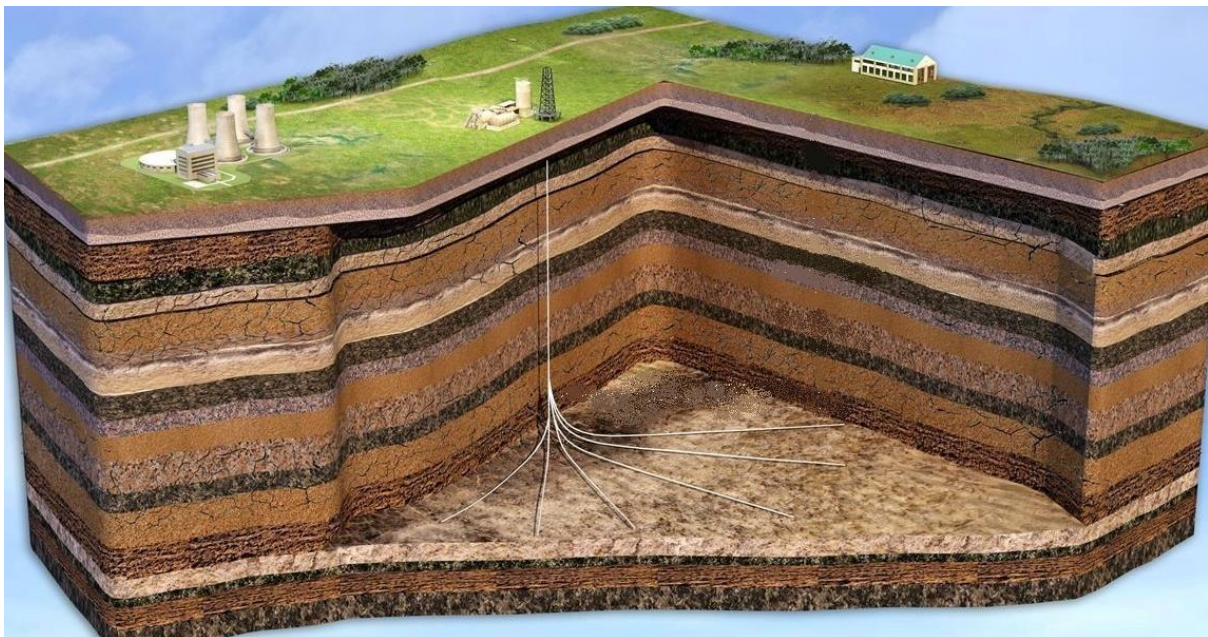
Slika 4-8. prikazuje shemu dijela kanala bušotine predviđenog za postavljanje izolacijskih materijala, podijeljenog na donji nezacjevljeni i gornji zacjevljeni dio.



Slika 4-8. Shema izolacijskog intervala kanala bušotine za odlaganje spremnika (Arnold et al., 2011)

5. KONCEPT ODLAGANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA U HORIZONTALNE BUŠOTINE

Razvoj tehnologije usmjerenog bušenja te prikupljeno iskustvo u zadnjih 20 godina omogućili su izradu horizontalnih bušotina velikog doseg a gdje ukupna duljina kanala više puta prelazi stvarnu vertikalnu dubinu bušotine. Postojeća tehnologija također omogućava izradu horizontalnih dionica dovoljno velikog promjera za odlaganje spremnika s visokoradioaktivnim nuklearnim otpadom i istrošenim nuklearnim gorivom. Kako bi se smanjili troškovi bušenja, kroz godine se razvijao i koncept izrade sustava multilateralnih bušotina (slika 5-1.), gdje se iz jednog glavnog kanala bušotine izrađuje više sporednih (lateralnih) kanala kojima je moguće obuhvatiti ležišta/dijelove ležišta nafte i plina koja nisu ekonomski isplativa za eksploataciju kroz vertikalne bušotine. Kada je u pitanju odlaganje nuklearnog otpada, horizontalne bušotine predstavljaju alternativu odlaganju u duboke geološke strukture (tuneli) i odlaganju u vertikalne bušotine, te se razmatraju kao jedno od mogućih rješenja problema vezanog za nuklearni otpad.



Slika 5-1. Shema multilateralnih bušotina izrađenih iz jednog glavnog kanala bušotine (Crichlow, 2018)

Muller i suradnici u članku „*Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes*“ iz 2019., koji je detaljnije prezentiran u nastavku, opisuju mogućnost odlaganja istrošenog nuklearnog goriva te kapsula stroncija i cezija u horizontalne bušotine, konceptualni opis izrade same horizontalne bušotine, te neke sigurnosne aspekte na koje za vrijeme i nakon samog odlaganja treba obratiti pozornost.

5.1. Konstrukcija horizontalne bušotine

Prvi korak ka izradi horizontalne bušotine ugradnja je konduktorske cijevi te bušenje vertikalne dionice velikog promjera do dubine predviđene za početak skretanja kanala bušotine, tj. do točke skretanja (engl. *kick-off point - KOP*). Taj interval bio bi zacijevljen i cementiran u svrhu izoliranja vodonosnika podzemnih voda te kao vodič za daljnji nastavak bušenja i samu ugradnju spremnika s otpadom. Nakon cementacije uvodne kolone bušenje se nastavlja uz istovremeno usmjeravanje niza pomoću klina za usmjeravanje. Intenzitet povećanja otklona kanala bušotine treba biti manji od $0,25^\circ$ po metru bušenja, te se bušenje nastavlja sve dok bušaći niz ne zauzme horizontalni položaj. Takav polumjer zakrivljenosti dovoljno je velik kako bi se izbjegli problemi kod ugradnje kolone zaštitnih cijevi i spremnika s otpadom. Nakon ugradnje druge kolone zaštitnih cijevi te cementiranja bušenje se nastavlja dlijetom promjera predviđenog za smještanje spremnika, obzirom da je horizontalna sekcija koja se buši ujedno predviđena zona odlaganja. Promjeri kanala bušotine potrebni za odlaganje spremnika s istrošenim nuklearnim gorivom i kapsula stroncija i cezija navedeni su u tablici 5-1 (Muller et al., 2019).

Tablica 5-1. Dimenzije spremnika i dimenzije kanala bušotine potrebne za odlaganje (Muller et al., 2019)

| Tip nuklearnog otpada | Promjer kapsule/jezgre reaktora (m) | Duljina kapsule/jezgre reaktora (m) | Unutarnji promjer spremnika (m) | Unutarnji promjer zaštitnih cijevi (m) | Promjer kanala bušotine (m) |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|
| Cezij | 0,066-0,083 | 0,55 | 0,1 | 0,13 | 0,15 |
| Stroncij | 0,066 | 0,53 | 0,1 | 0,13 | 0,15 |
| Jezgre reaktora sa kipućom vodom | 0,16-0,23 | 4,4 | 0,2-0,27 | 0,25-0,32 | 0,32-0,4 |
| Jezgre tlačnih reaktora | 0,23-0,31 | 4,09 | 0,27-0,35 | 0,32-0,40 | 0,4-0,48 |

Horizontalna sekcija može se protezati od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, a dostupna tehnologija bušenja pomoću rotirajućih upravljivih sustava omogućava preciznost uz maksimalnu devijaciju manju od 1 m. Za postavljanje spremnika većeg promjera, točnije spremnike sa jezgrama nuklearnog goriva iz tlačnih reaktora i jezgrama iz reaktora s kipućom vodom zona odlaganja mogla bi se izbušiti tako da se prvo izradi kanal bušotine dlijetom malog promjera, koji bi usputno koristio za izvođenje bušotinske karotaže, a nakon njega bi se kanal proširio dlijetom većeg promjera dovoljnog za ugradnju zaštitnih cijevi i samih spremnika. Zaštitne cijevi ugrađene od točke skretanja do samog kraja horizontalne dionice

služe za lakšu ugradnju spremnika te moguće operacije izvlačenja spremnika. Nadalje, služe kao dodatna barijera uz same izolacijske materijale postavljene oko spremnika te dobro redistribuiraju toplinu u svrhu smanjenja temperaturnih gradijenata te temperaturno izazvanih naprezanja.

Kako ne bi došlo do migracije radionuklida prema vertikalnom dijelu kanala bušotine, predlaže se da horizontalna dionica bude malo „*nagnuta*“ kako bi radionuklidi u slučaju migracije završili na krajnjem dijelu same bušotine. Bušotine se mogu, ako je to moguće, konstruirati što je bliže moguće trenutnim skladištima nuklearnog otpada kako bi se eliminirao trošak transporta (Muller et al., 2019).

5.2. Spremnici s otpadom

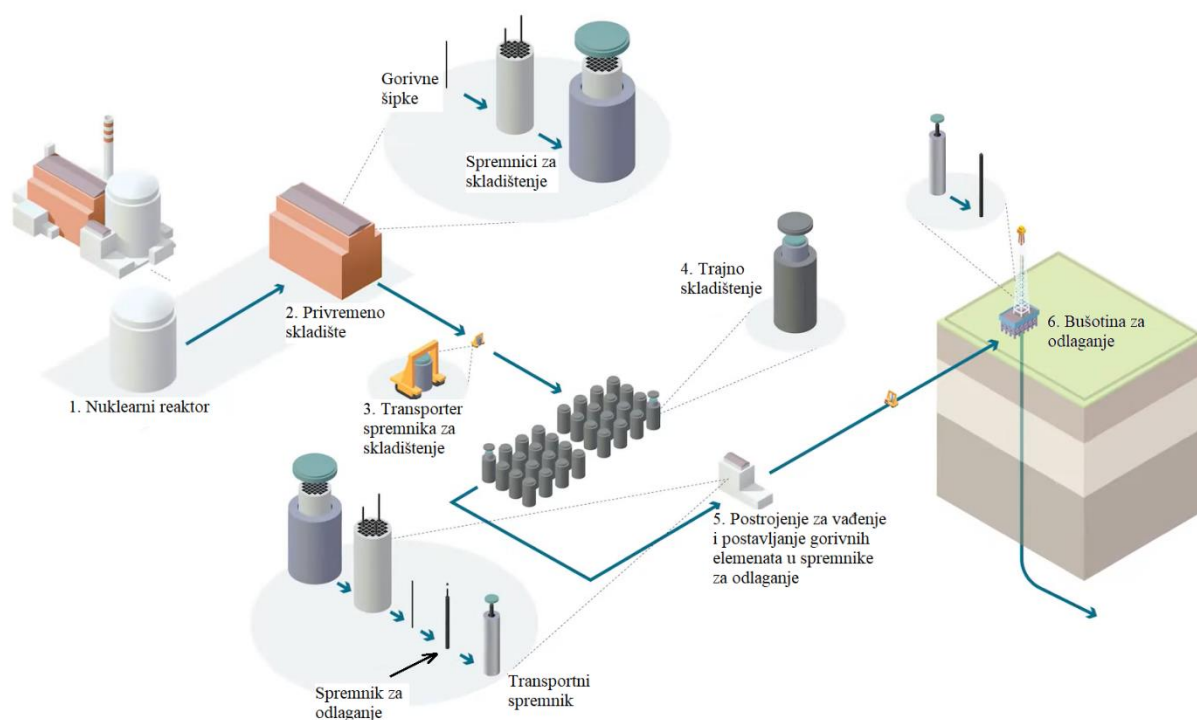
Primarna svrha spremnika s otpadom zadržavanje je radionuklida nuklearnog otpada što je dulje moguće. Muller i suradnici (2019) stoga predlažu korištenje spremnika sačinjenog od legura nikla, kroma i molibdena. S obzirom na svojstva navedenih legura, ti spremnici imali bi vrlo visoku otpornost na koroziju te stabilnost na vrlo visokim temperaturama, budući da visoke temperature u kanalu bušotine pospješuju koroziju spremnika i korozivnost same okoline bušotine. Spremnici bi također bili premazani tankim antikorozivnim slojem za dodatnu zaštitu. Prema studijama proučavanja korozivnosti ovih legura, pretpostavka je da će za gubitak debljine stijenki spremnika od 1 cm kao posljedica korozije biti potrebno najmanje 50 000 godina (Muller et al., 2019).

5.3. Odlaganje spremnika s otpadom

Prije samog transporta do lokacije odlaganja gorivni elementi izvadili bi se iz rashladnih bazena ili privremenih spremnika suhих skladišta te smjestili u spomenute antikorozivne spremnike napravljene od legura nikla, kroma i molibdena (Slika 5-2.). Kako bi se vrijeme potrebno za vađenje i smještanje gorivih elemenata u spremnike za odlaganje skratilo, mogao bi se osmisliti i koncept u kojem se gorivni elementi za vrijeme smještanja u rashladne bazene direktno stavljaju u spremnike namijenjene za odlaganje, te se tako vadili kada počnu operacije odlaganja u bušotine. Nakon smještanja gorivnih elemenata u spremnike, isti se zatvaraju te se prevoze do lokacije za odlaganje u transportnim spremnicima kako bi se zadovoljili svi sigurnosni preduvjeti. Shema transporta gorivnih šipki prikazana je na slici 5-3.

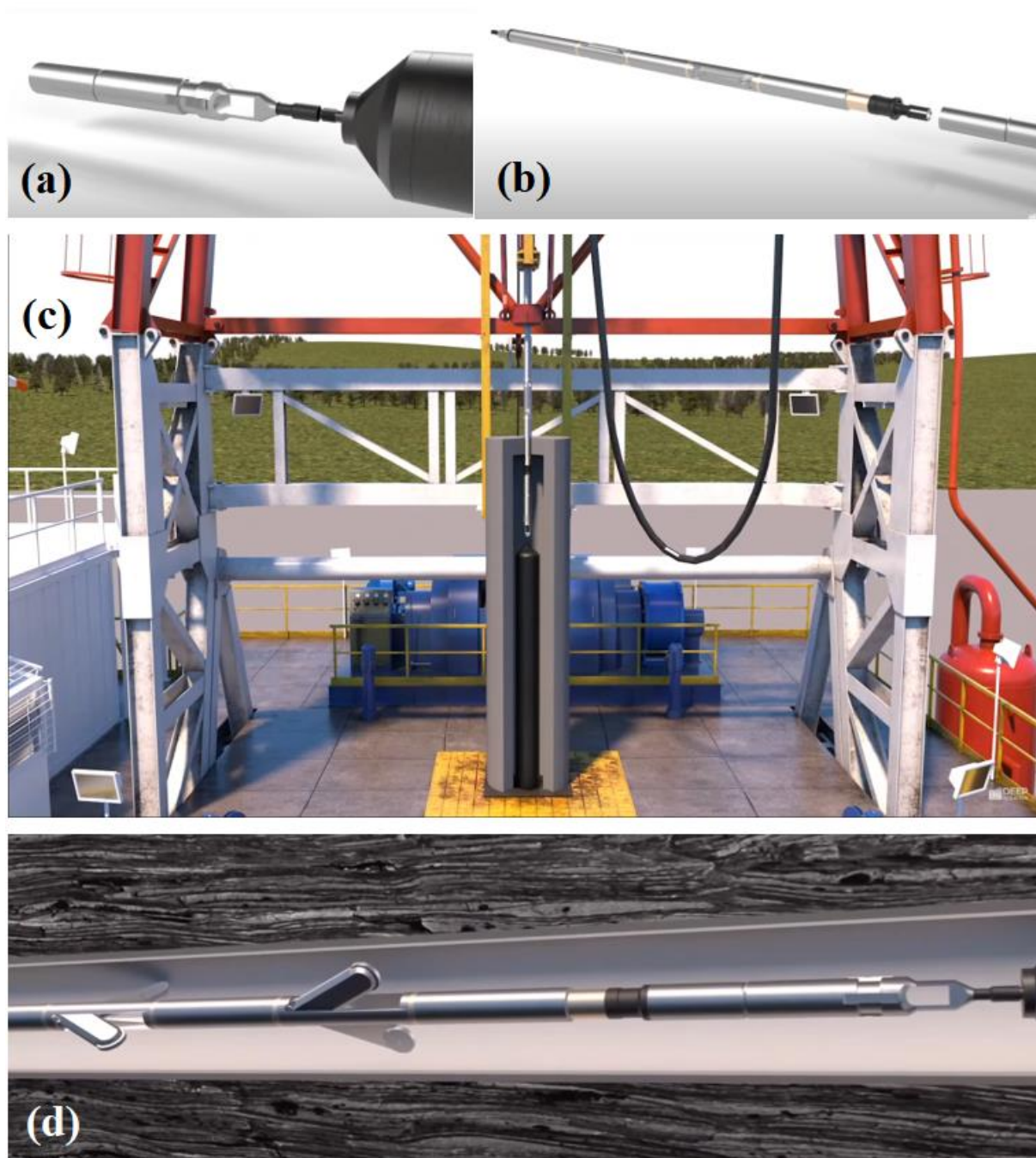


Slika 5-2. Presjek spremnika za odlaganje sa jednim gorivnim elementom (Muller et al., 2019)



Slika 5-3. Shema transporta gorivnih elemenata od privremenog skladišta nuklearne elektrane ili trajnog skladišta do bušotine za odlaganje (Muller et al., 2019)

Spuštanje spremnika u bušotinu provodilo bi se pomoću bušaćih šipki, savitljivog tubinga ili bušotinskog traktora i opremom na žici, gdje bi se u horizontalnoj dionici kanala spremnici morali gurati. Spuštanje spremnika opremom na žici i bušotinskim traktorom prikazano je slikom 5-4.



Slika 5-4. Spajanje alatke za spuštanje na spremnik za odlaganje (a), spajanje bušotinskog traktora na alatku za spuštanje (b), položaj spremnika u tornju bušaćeg postrojenja spremnog za spuštanje u kanal bušotine (c), bušotinski traktor prilikom odlaganja spremnika u horizontalni dio kanala bušotine (d) (Muller et al., 2019)

5.3.1. Mogući problemi prilikom spuštanja spremnika

Prilikom spuštanja spremnika potencijalni problem predstavlja zaglavlavanje spremnika u kanalu bušotine iznad zone odlaganja kao posljedica deformacije (vijuganje, suženje) zaštitnih cijevi uslijed postavljanja i cementacije, pogotovo u dionici od točke skretanja pa do same horizontalne dionice. Veliki polumjer zakrivljenosti trebao bi ići u prilog kada je u pitanju prolazak spremnika kroz taj zakrivljeni interval kanala bušotine. Kao mjera opreza, u bušotinu se mogu spustiti sonda za provjeru promjera kanala (kaliper) ili prazni spremnik, kako bi se sa sigurnošću moglo potvrditi da integritet bušotine nije narušen.

U slučaju da prilikom spuštanja spremnika u vertikalnoj dionici dođe do otpajanja spremnika s otpadom od alatki za ugradnju moguće je da dođe do mehaničkog oštećenja spremnika. Brzina padanja spremnika ograničena je postojanjem fluida unutar zaštitnih cijevi, no kod težih spremnika može doći do probijanja spremnika i propuštanja radionuklida, posebice ako spremnik udari prethodno postavljeni spremnik. Predloženo rješenje postavljanje je alatke za ublažavanje udaraca ispred samog spremnika koji se spušta (Muller et al., 2019).

5.3.2. Ponovno izvlačenje spremnika

Neke od država koje imaju programe odlaganja nuklearnog otpada u duboke bušotine propisuju i obvezu izvlačenja spremnika u određenom vremenskom periodu, npr. za SAD do 50 godina, ako se u budućnosti osmisli neka nova, bolja metoda odlaganja ili se nuklearni otpad bude mogao iskoristiti u nuklearnim reaktorima neke od novih generacija. Temeljem te odluke moguća je opcija ostavljanja izolacijskog intervala kanala bušotine otvorenim tijekom tog perioda, no opcija je i ponovno otvaranje bušotine bušenjem izolacijskog intervala. Imajući u vidu da takvo ponovno otvaranje bušotine iziskuje veliku preciznost kako se spremnici s otpadom ne bi oštetili, takav način izvlačenja spremnika povlači za sobom previše rizika.

5.4. Usporedba vertikalnih i horizontalnih bušotina za odlaganje radioaktivnog otpada

U različitim konceptima odlaganja otpada u vertikalne bušotine predlaže se izrada bušotine do dubine od oko 5 km, sa zonom za odlaganje na dubini od 3 do 5 km u nepropusnim kristaliničnim stijenama. S druge strane, kod koncepta odlaganja u horizontalne bušotine izrađuje se horizontalna dionica na puno manjoj dubini, koja ujedno predstavlja samu zonu odlaganja. Različita orijentacija zone odlaganja glavna je razlika ova dva koncepta, iz koje proizlaze ostale, u nastavku objašnjene razlike.

Kod izrade vertikalne bušotine buši se kroz mnoštvo različitih slojeva, dok se ne dođe do pretpostavljenog kristaliničnog sloja velike debljine, najčešće granita. Posljedično tome dolazi do stalne promjene uvjeta bušenja promjenom same litologije stijena. Povećanjem dubine bušenja konstantno dolazi do povećanja gradijenta tlaka, temperaturnog gradijenta te do različitih vrijednosti saliniteta. S druge strane, izrada horizontalne dionice pretpostavlja bušenje kroz jedan sloj veoma sličnih termodinamičkih svojstava. S obzirom na veliku razliku u geotermalnom gradijentu te visoke vrijednosti tlaka kod vertikalnih bušotina, može doći do negativnih utjecaja izvedbe samog odlaganja te kretanja radionuklida uzduž vertikalne dionice. Nadalje, termalni utjecaj spremnika na okolne stijene u vertikalnoj bušotini može stvoriti kanaliće koji mogu služiti kao prostor koji omogućava mobilnost radionuklida, što nikako nije poželjno. Negativna strana izrade horizontalne bušotine veća je vjerojatnost presijecanja rasjeda, koji također može služiti kao put kretanja radionuklida. Kada je u pitanju kretanje radionuklida i orijentacija zone odlaganja, kod horizontalne dionice vrlo je mala vjerojatnost kretanja radionuklida prema vertikalnom dijelu kanala te površini, pogotovo ako se horizontalna dionica izradi tako da je kraj kanala bušotine malo viši od početka horizontalne dionice, gdje je pretpostavka da će se radionuklidi kretati prema slijepom kraju kanala bušotine (Muller et al., 2019).

Kada je u pitanju mehaničko opterećenje spremnika, ono postoji samo kod koncepta odlaganja u vertikalne bušotine, obzirom da se spremnici slažu jedan iznad drugoga. Neke analize naprezanja pokazuju kako su sigurnosti faktori veoma mali, pogotovo za spremnike u najdubljim dijelovima zone odlaganja. Na te sigurnosne faktore utječe i visoki geotermalni gradijent, koji smanjuje mehaničku čvrstoću samih spremnika. Kako bi se ta opterećenja među nizovima spremnika smanjila u bušotinu se postavljaju mosni čepovi koji preuzimaju opterećenje spremnika, no oni se smatraju jednim od najslabijih dijelova u samoj konstrukciji bušotine. S druge strane, kod horizontalnih bušotina ne postoje opterećenja kod slaganja spremnika, što u potpunosti eliminira problem. Na donju stranu spremnika mogu se postaviti već spomenute alatke za ublažavanje udaraca, ukoliko bi došlo do otpajanja spremnika za vrijeme spuštanja u bušotinu. Kako u horizontalnoj dionici zaštitne cijevi i spremnici naliježu na same stijenske kanala moguće je odabrati slabije kvalitete materijala istih obzirom da na njih ne djeluje vertikalno tlačno opterećenje kao kod spremnika postavljenih u vertikalne bušotine za odlaganje radioaktivnog otpada, što doprinosi lakšem rukovanju kod postavljanja i potencijalnog vađenja, te manjoj cijeni odlaganja. Prednost horizontalnih bušotina je i ta što ne

ovise o dubini bušenja, već je današnjom tehnologijom moguća izrada vrlo dugih horizontalnih dionica za postavljanje više spremnika s radioaktivnim otpadom (Muller et al., 2019).

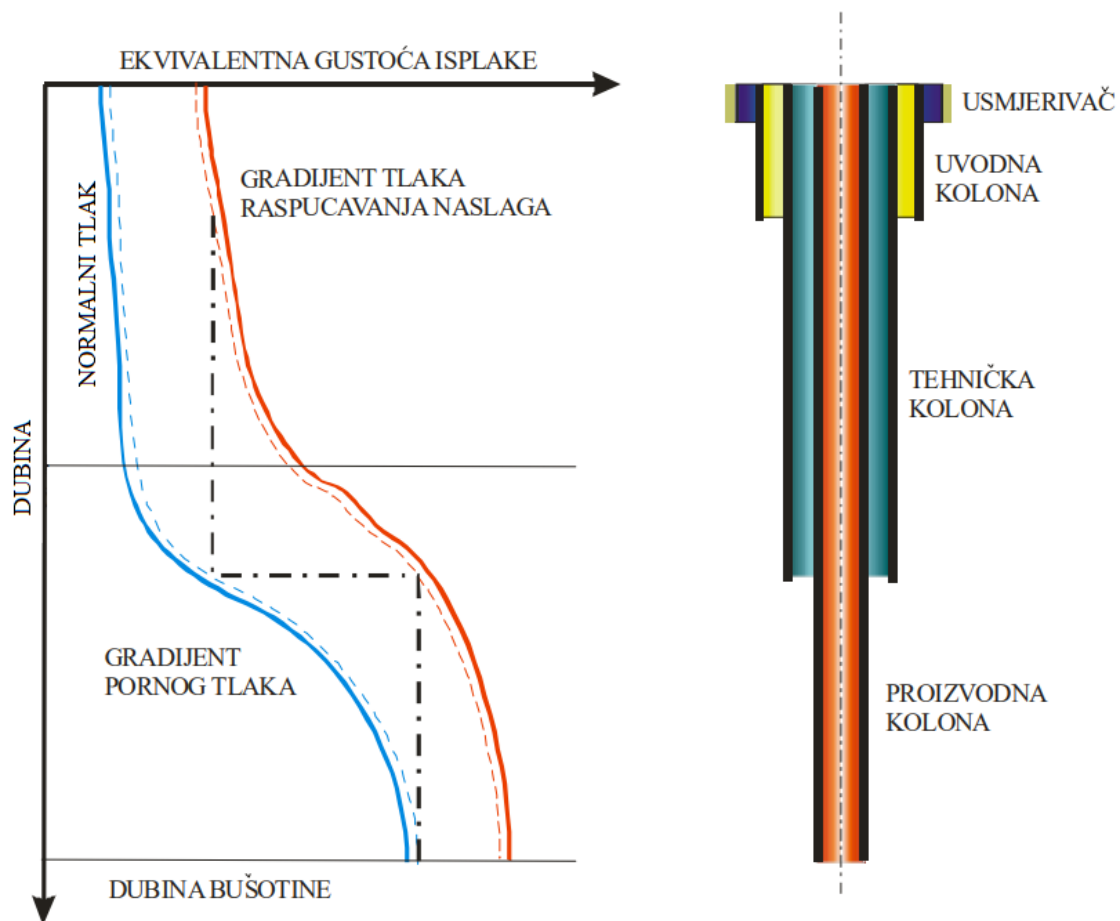
Prednosti i nedostaci vertikalnih i horizontalnih bušotina kada je u pitanju odlaganje nuklearnog otpada prikazani su u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Prednosti i nedostaci horizontalnih i vertikalnih bušotina (Ikonen et al., 2020)

| | Verikalna bušotina | Horizontalna bušotina |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Dubina | 3 do 5 km | >1km |
| Vrsta izolacijske stijene | kristalinična bazna stijena | magmatske, metamorfne, sedimentne |
| Tlak i temperatura | visoki | niži |
| Uvjeti u bušotini | ovisni o dubini | konstantni |
| Sila uzgona | ovisna o dubini | nema (zona odlaganja) |
| Mogućnost zaglave spremnika | mala | velika |
| Dizajn spremnika | robusniji | lakši |
| Postavljanje spremnika | jednostavno | teško |
| Duljina zone odlaganja | ograničena | duga, ovisno o dostupnoj tehnologiji |
| Bušenje | jednostavno | kompleksno |
| Cementacija zaštitnih cijevi | jednostavna | kompleksna |
| Opterećenje na spremnike | veliko | nema |
| Mobilnost radionuklida | velika | vrlo mala |

6. KORIŠTENJE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI U KONSTRUKCIJI BUŠOTINE ZA ODLAGANJE NUKLEARNOG OTPADA

Konstrukcija eksploatacijskih bušotina nafte i plina te geotermalnih bušotina kreće određivanjem dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi koje će prekriti i izolirati nabušene dijelove kanala bušotine, te definiranjem njihovih promjera. Broj potrebnih kolona, dubina ugradnje te njihov promjer ovisit će o očekivanim vrijednostima slojnog tlaka te tlaka frakturiranja, kao i očekivanim problemima tijekom bušenja. Dubina ugradnje zaštitnih cijevi određuje se prikazivanjem razvoja krivulja gradijenta slojnog tlaka i gradijenta frakturiranja, iskazanih kroz ekvivalentnu gustoću isplake koja bi ostvarila određeni tlak na različitim dubinama (Slika 6-1.). Iscrtkane linije spomenutih tlakova predstavljaju vrijednost koja uključuje faktor sigurnosti, jer tijekom procesa izrade kanala bušotine može doći do kolebanja tlakova (Veinović, 2020).

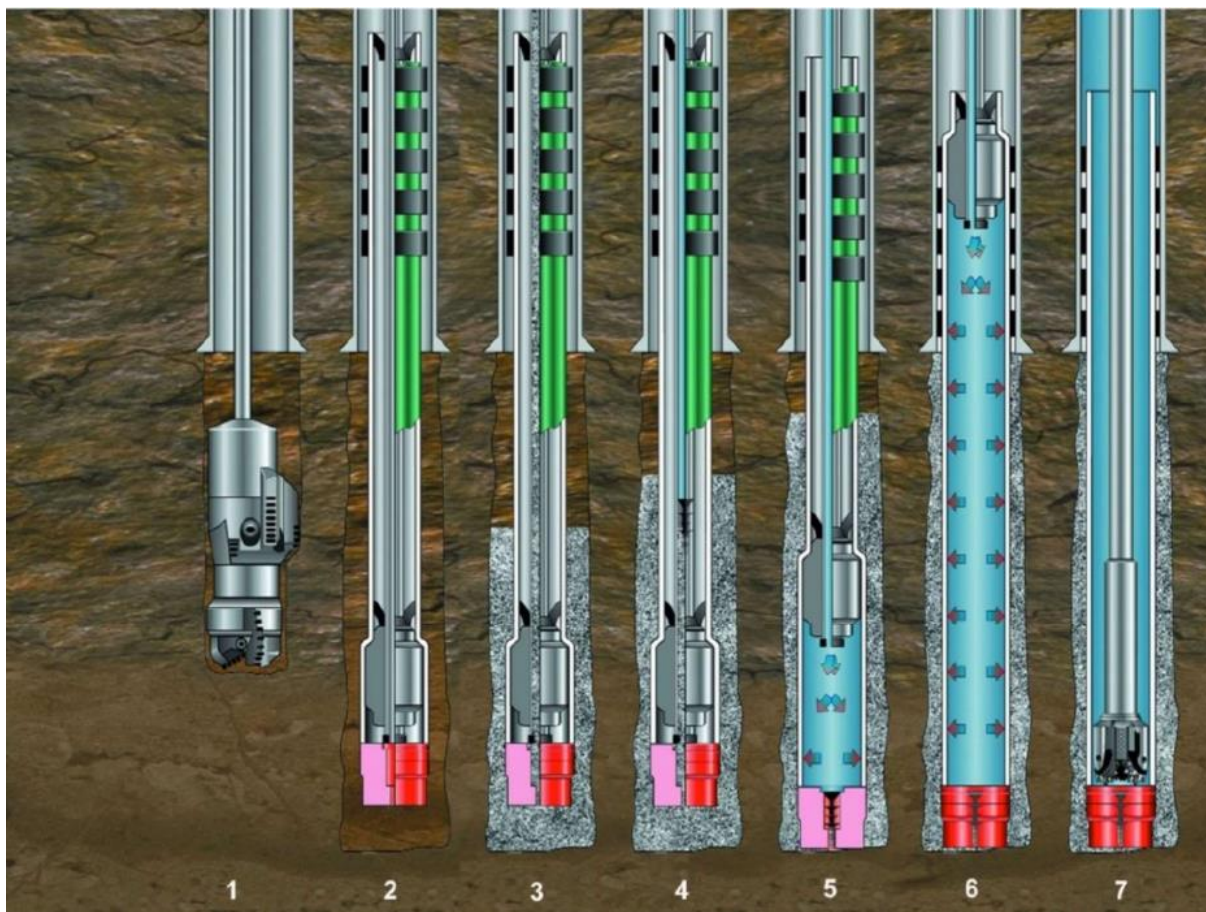


Slika 6-1. Shematski prikaz konstrukcije tipske bušotine i odabira dubine za ugradnju zaštitnih cijevi s obzirom na slojni tlak i tlak frakturiranja (Veinović, 2020)

6.1. Postupak ugradnje proširivih zaštitnih cijevi

S obzirom na teleskopski način ugradnje zaštitnih cijevi u bušotine korištene u naftno-plinskoj industriji, te samim tim suženje promjera dubljih sekcija kolona zaštitnih cijevi, jedan od mogućih načina izrade bušotina za odlaganje korištenje je proširivih zaštitnih cijevi koje bi omogućile dostatan promjer za odlaganje spremnika s istrošenim nuklearnim gorivom ili visoko radioaktivnim otpadom. U tom slučaju konstrukcija se sastoji od bušenja kanala korištenjem dlijeta za povećavanje promjera (poput bicentričnih dlijeta), te ugradnjom lajnera namijenjenih proširivanju. Tehnologijom proširivanja zaštitnih cijevi moguće je za do 25% proširiti zaštitne cijevi promjera od 0,0889 m (3 ½“) do 0,4064 m (16“). U praksi se najčešće koristi sustav odozdo prema gore, koji uključuje stvaranje tlačne komore i primjenu vretena. Tijek operacije proširivanja zaštitnih cijevi sustavom odozdo prema gore, prikazan slikom 6-2., je sljedeći (Veinović, 2020):

1. Bušenje kanala bušotine većeg promjera od prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi primjenom bicentričnog dlijeta ili konvencionalnog dlijeta i proširivača;
2. Ugradnja lajnera na nizu bušaćih alatki s opremom za cementaciju i proširivanje lajnera;
3. Utiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor kanala bušotine;
4. Nasjedanje cementnog čepa;
5. Stvaranje tlačne komore ispred vretena navrnutog na donji kraj bušaćih alatki koje su se koristile za ugradnju lajnera;
6. Proširivanje lajnera brzinom 2,4 m/min s tlakom u radnoj komori od oko 275 bar;
7. Izvlačenje alatki za proširivanje te spuštanje alatki nastavak bušenja.



Slika 6-2. Postupak proširivanja zaštitnih cijevi sustavom odozdo prema gore (Mesarić, 2020)

6.2. Prednosti

Kada su u pitanju prednosti korištenja ove tehnologije, za izradu kanala bušotine korištenjem proširivih zaštitnih cijevi mogu se koristiti manji bušaći tornjevi te manji preventerski sklop, čiji je dnevni najam puno manji od tornjeva potrebnih za izradu vertikalnih bušotina velikog promjera, koji moraju biti puno veće nosivosti s obzirom na konvencionalni način ugradnje zaštitnih cijevi velikih promjera, te korištenje preventerskog sklopa kojim se mora osigurati kontrola tlaka tijekom bušenja kanala bušotine za ugradnju svake pojedine kolone zaštitnih cijevi ovješene u ušću bušotine. Ponavljanjem postupka proširenja kanala i ugradnje proširivog lajnera, teoretski je moguće izraditi kanal bušotine jednolikog promjera od ušća do konačne dubine bušotine. Drugim riječima moguće je projektirati konstrukciju bušotine koja bi se sastojala od uvodne kolone te nekoliko sekcija proširivih lajnera do konačne dubine bušotine.

7. MOGUĆNOST ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO

Republika Hrvatska, uz Republiku Sloveniju, suvlasnica je 50% nuklearne elektrane Krško te je uz preuzimanje električne energije obvezna i zbrinuti polovicu proizvedenog nuklearnog otpada nakon razgradnje NEK-a predviđene za 2043. godine. Planirani inventar istrošenog nuklearnog goriva NEK-a naveden je u tablici 8-1. Procjena je kako će nakon konačnog gašenja reaktora biti 2282 istrošena gorivna elementa koja će se morati skladištiti te u nekom trenutku trajno zbrinuti.

Tablica 7-1. Procjena inventara istrošenog nuklearnog goriva NEK-a (ARAO, 2020)

| | Godina | Ukupan broj gorivnih elemenata | Broj gorivnih elemenata u bazenu za skladištenje | Broj gorivnih elemenata u suhom skladištu |
|--|--------|--------------------------------|--|---|
| 1. faza | 2020 | 1323 | 731 | 592 |
| 2. faza | 2028 | 1661 | 477 | 1184 |
| Konačno gašenje reaktora | 2043 | 2282 | 1098 | 1184 |
| Petogodišnje hlađenje zadnje serije goriva | 2048 | 2282 | 1098 | 1184 |
| 3. faza | 2048 | 2282 (<2500) | 0 | 2282 (<2500) |

Gorivni elementi korišteni u NEK-u jesu 16x16 VANTAGE, čija duljina iznosi 3658 mm te imaju presjek 197,18 x 197,18 mm. Masa pojedinog gorivnog elementa iznosi oko 406 kg, a masa zajedno sa spremnikom i spojnicom (prema Arnold et al., 2011.) iznosila bi oko 1136 kg. Spremnici bi bili promjera oko 340 mm i duljine 4250 mm (uključujući spojnice). Ukoliko bi se izradila bušotina od 5000 m sa predviđenim intervalom za odlaganje od 3000 m do 5000 m, u jednu bušotinu bi se moglo odložiti oko 470 spremnika, a sa sve gorivne elemente bilo bi potrebno svega 5 do 6 bušotina. Ukoliko bi se razmatrao model gdje bi interval za odlaganje bio na dubini od 4000 m do 5000 m, za sve gorivne elemente bilo bi potrebno 10 do 11 bušotina (Veinović, 2020).

Obzirom da NEK ima relativno mali broj istrošenih gorivnih elemenata, tj. Hrvatska i Slovenija imaju mali program kada je u pitanju nuklearna energija (manje od 10 000 t ING-a), odlaganje u duboke bušotine čini se kao koncept vrijedan razmatranja.

8. ZAKLJUČAK

Radioaktivni otpad predstavlja velik problem kada je u pitanju proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana te se način njegovog trajnog odlaganja razmatra dugi niz godina. Kako se u budućnosti predviđa povećanje nuklearnih elektrana u svrhu proizvodnje električne energije te gašenje starih postrojenja, radioaktivni otpad predstavlja sve veću opasnost za čovjeka i biosferu u cijelosti. Razni programi odlaganja radioaktivnog otpada, u prvom redu visoko radioaktivnog nuklearnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, još uvijek nisu u fazi realizacije obzirom na kompleksne tehničke i sigurnosne zahtjeve koji moraju biti zadovoljeni. Kada je u pitanju odlaganje u duboke geološke formacije (tunele), Finska i Švedska su prethodnice takvoga koncepta odlaganja. Odlagalište Onkalo u Finskoj, koje će biti pušteno za rad već 2023. godine, prvi je realizirani projekt odlaganja nuklearnog otpada.

Koncept odlaganja visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva u duboke bušotine na prvu pomisao predstavlja idealan koncept kojim bi se moglo otpad dugoročno izolirati, pogotovo za države sa malim programima. Međutim, potrebni tehnološki i sigurnosni zahtjevi predstavljaju veliku zapreku, uzevši u obzir kako bušotine velikog promjera do 0,5 m na dubinama do 5000 m ne postoje te bi se postojećom tehnologijom veoma teško izradile. Nadalje, spuštanje i moguća zaglava spremnika, pogotovo u zakrivljenim dionicama horizontalnih bušotina, s takvom vrstom opasnog materijala predstavlja veliki rizik, kao i potencijalna mobilnost radionuklida u slučaju neadekvatnog izoliranja ili degradacije izolacijskih materijala. Razni koncepti, od kojih su neki spomenuti u ovom radu, daju detaljne ekonomske analize i tehničke i sigurnosne zahtjeve koje ovaj način odlaganja vode ka njegovoj mogućoj realizaciji u budućnosti. Spomenute varijacije izrade kanala bušotina za odlaganje, točnije horizontalne bušotine te bušotine s proširivim zaštitnim cijevima, predstavljaju dodatne mogućnosti koje će zasigurno biti razmatrane u budućnosti obzirom na njihove prednosti u odnosu na klasične vertikalne bušotine, no kompleksnost izrade i nedostaci tih bušotina sa sobom povlači upitnu izvedivost te sigurnost u pogledu dugoročne izolacije odloženog otpada.

S obzirom na količinu radioaktivnog otpada te brojne provedene studije i opisane koncepte, vrlo je vjerojatno da će odlaganje u duboke bušotine u budućnosti, uz odlaganje u duboke geološke formacije (tunele), postati jedan od načina kojim će se osigurati trajna izolacija te sigurnost ljudi i biosfere od utjecaja radioaktivnosti. No, realizacija takvih projekata u budućnosti, s obzirom na njihovu kompleksnost i potencijalni rizik zahtijeva još mnoga in situ istraživanja i pilot projekte.

9. LITERATURA

1. ARAO, 2020. Inventory of SF and HLW for possible Deep Borehole Disposal Slovenia. Prepared by ARAO for the purpose of ERDO joint project on deep borehole disposal lead by NND Norway. ARAO 20-08-004-001 / Revision 0
2. 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, 12-35, 37-48. str.
3. BRADY P., ARNOLD B., ALTMAN S., VAUGHN P., 2012. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste Summary. SAND2012-7789, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 18.-23. str.
4. 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, 18-20. str.
5. CHAPMAN, N., 2019. Deep Borehole Disposal. ERDO-WG Meeting, Ljubljana, Slovenia, 1.-2. srpanj, 24. str.
6. CRICHLOW, H., 2018. Ultra-Deep Geologic Repository for High Level Nuclear Waste Disposal. NuclearSAFE Technologies LLC. 7.-8. str.
7. FREEZE, G.A., STEIN E., BRADY, P.V., LOPEZ, C., SASSANI, D., TRAVIS, K., GIBB, F., BESWICK, J., 2019. Deep Borehole Disposal Safety Case. *MDPI Energies*, 13.-18. str.
8. 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.
9. HERRICK, C., ARNOLD, B., HADGU, T., FINLEY, R., VAUGHN, P., BRADY, P., 2011. Deep Borehole Seals. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA.
10. IKONEN, A., ENGELHARDT, J., FISCHER, T., GARDEMEISTER, A., KARVONEN, S., KETO, P., RASILAINEN, K., SAANIO, T., WANNE, T., 2020. Concept Description for Norwegian National Disposal Facility for Radioactive Waste, Espoo, Finland. 88. str.

11. JUHLIN, C., SANDSTEDT, H., 1989. Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes. Svensk Karnbranslehantering AB, Sweden, 21.-23. str.
12. MESARIĆ, P., 2020. Cementacija proširivih zaštitnih cijevi, Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet (obranjen: 16.10.2020.) 19.-23. str.
13. 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, 3-5, 6-10, 22-23. str.
14. PATRAKKA, E., 2010. The final disposal of spent nuclear fuel in Finland. Posiva, ITRE Public Hearing, 1. prosinac, Brussels, Belgium, 7.-13. str.
15. 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, 1-2. str.
16. THOMPSON, T.W., COONS, W.E., KRUMHANSL, J.L., HANSEN, F.D., 1996. Inadvertent Intrusion Borehole Permeability. ERMS 241131. Sandia National Laboratories, Carlsbad, NM.
17. VEINOVIĆ, Ž., 2020. Izvješće s pregledom mogućih tehnologija izrade dubokih bušotina i izrada potrebnih materijala i opreme za izradu takvih bušotina te mogućim utjecajima materijala na funkcionalnost bušotina. Drugo izvješće elaborata „Analiza mogućnosti zbrinjavanja istrošenog nuklearnog goriva i/ili visokoradioaktivnog otpada u duboke bušotine“, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
18. VLADA RH, 2018. Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (Program za razdoblje do 2025. godine s pogledom do 2060. godine). Vlada Republike hrvatske. Narodne novine, 100/2018. pp. 69., 8. str.
19. WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS, 1983. Very Deep Hole Systems Engineering Studies. ONWI-226, Columbus, Ohio, USA, 5/42-5/54. str.

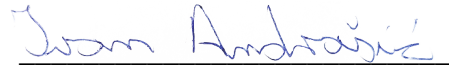
Internetski izvori:

20. RADIOAKTIVNI OTPAD, 2021. Zbrinjavanje RAO-a
URL: https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/zbrinjavanje-rao-a_14/ (03.08.2022.)
21. NEK, 2022. Bazen za istrošeno gorivo
URL: <https://www.nek.si/hr/kako-djeluje-nek/bazen-za-istroseno-gorivo> (06.08.2022.)
22. GNS, 2022. CASTOR® V/19
URL: <https://www.gns.de/language=en/21551/castor-v-19> (07.08.2022.)

23. GNS, 2022. CONSTOR®
URL: <https://www.gns.de/language=en/23336/constor> (07.08.2022.)
24. WIKIPEDIA, 2022. KBS-3
URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/KBS-3> (10.08.2022.)
25. WIKIPEDIA, 2022. Onkalo spent nuclear fuel repository
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Onkalo_spent_nuclear_fuel_repository
(10.08.2022.)
26. TENARIS, 2022. TXP® BTC
URL: <https://www.tenaris.com/en/products-and-services/octg/txp-btc> (15.08.2022.)

IZJAVA

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

A handwritten signature in blue ink, reading "Ivan Andrašić", written over a horizontal line.

Ivan Andrašić



KLASA: 602-01/22-01/171
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 19.09.2022.

Ivan Andrašić, student


RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/171, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 20.07.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

KONSTRUKCIJA BUŠOTINE ZA TRAJNO ZBRINJAVANJE SPREMNIKA S VISOKO RADIOAKTIVNIM OTPADOM I ISTROŠENIM NUKLEARNIM GORIVOM

Za mentora 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.

Mentor:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

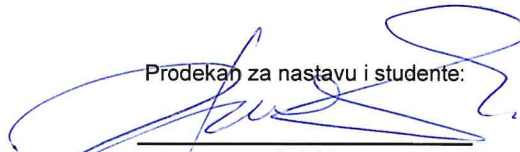


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)