



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Risto-Matti Meriniemi

KÄYTETYN YDINPOLTTOAINEEN
LOPPUSIJOITUSTUNNELIN TÄYTTÖ-
MENETELMÄT

Tekniikka
2019

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Risto-Matti Meriniemi
Opinnäytetyön nimi	Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustunnelin täyttömenetelmät
Vuosi	2019
Kieli	suomi
Sivumäärä	37+1
Ohjaaja	Tom Lipkin

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus pitäisi alkaa 2020-luvulla ja yksi sen menetelmistä on loppusijoitustunnelin täyttö. Aihe valikoitui kun nykyisen lohkotäyttömenetelmän rinnalle kehitetään edullisempaa ja nopeampaa granulitäyttömenetelmää eli vaihtoehtoista täyttömenetelmää. Tässä työssä vertaillaan näitä kahta eri menetelmää ja tutkitaan onko uusi vaihtoehto parempi.

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus perustuu KBS-3V-menetelmään, joka sisältää moniesteperiaatteen. Tämä menetelmä estää positiivisesti varautuneiden ja hidastaa negatiivisesti varautuneiden radionuklidien pääsyn kallioon eri komponenteilla: kuparikapselilla, loppusijoituspuskurilla, loppusijoitustunnelin täytöllä sekä peruskalliolla. Opinnäytetyö keskittyy moniesteperiaatteen loppusijoitustunnelin täyttökomponenttiin sekä sen suunniteltuihin täyttömenetelmiin. Tutkimusaineisto kerättiin FISST-kokeessa (Full Scale In Situ System Test), josta saatiin tuloksia lohkotäyttömenetelmälle.

Aikataulullisista syistä granulitäyttömenetelmän tuloksia ei ehditty saamaan tähän opinnäytetyöhön. Nykyisestä lohkotäyttömenetelmästä kuitenkin saatiin tulokset, jotka varmistivat, että nykyisellä menetelmällä pystytään toteuttamaan vaatimusten mukainen loppusijoitustunnelin täyttö. Suurimmaksi ongelmaksi syntyy asennuslaitteen asennusnopeus, joka ei vastaa vaadittua nopeutta. Tämä johtaa siihen, että tällä hetkellä täyttö hidastaa loppusijoituksen muita osa-alueita.

ABSTRACT

Author	Risto-Matti Meriniemi
Title	The Methods of Backfilling the Spent Nuclear Fuel Final Disposal Tunnel
Year	2019
Language	Finnish
Pages	37+1
Name of Supervisor	Tom Lipkin

The final disposal of spent nuclear fuel should start after about six years and one of its methods is the backfilling of the disposal tunnel. The subject was selected when Posiva Oy started to develop a more economical and faster granular backfilling method alongside a current block-pellet method. This thesis will compare these two different methods and examine whether the new option is better.

The final disposal of spent nuclear fuel is based on the KBS-3V method which includes the multiple barriers principle. This method prevents the access of positively charged radionuclides and slows the access of negatively charged radionuclides to rock by various components: a final disposal canister, a bentonite buffer, a tunnel backfill and bedrock. The thesis focuses on the backfilling component of the final disposal tunnel of the multiple barriers principle and its designed backfilling methods. The research material was collected in the FISST (Full Scale In Situ System Test) which yielded results for the block-pellet method.

For schedule reasons, the results of the granule backfilling method did not come to this thesis. However, concerning the current block-pellet backfilling method, the results were obtained to ensure that the current method is able to meet the backfilling requirements. The biggest problem is the installation speed of the tunnel backfilling device which does not meet the required speed. This leads to the fact that backfilling is currently slowing down the rest of the final disposal divisions.

Keywords	Alternative backfilling method, final disposal, granular backfilling material, spent nuclear fuel
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
2	LOPPUSIJOITUS SUOMESSA	12
2.1	Posiva Oy	12
2.1.1	Teollisuuden Voima Oyj	12
2.1.2	Fortum Oyj	13
2.2	Loppusijoituslaitos	13
2.2.1	ONKALO®	13
2.2.2	Loppusijoitustilat	14
2.2.3	Kapselointilaitos.....	15
2.3	Vapautumisesteet	16
2.3.1	Loppusijoituskapseli	17
2.3.2	Bentoniittipuskuri.....	19
2.3.3	Loppusijoitustunnelin täyttö	20
2.3.4	Tulppa	21
2.3.5	Peruskallio.....	22
3	NYKYINEN TÄYTTÖMENETELMÄ.....	24
3.1	Tausta.....	24
3.2	Täyttömateriaalit	25
3.3	Täyttömateriaalin asennusajoneuvo.....	27
3.4	Lohkokasetti, pellettikasetti ja lastausasema	27
3.5	Ominaispiirteet.....	29
3.5.1	Tuotantokapasiteetti	29
3.5.2	Tuotantovarmuus.....	29
3.5.3	Vaatimusten täytyminen	30
4	VAIHTOEHTOINEN TÄYTTÖMENETELMÄ	31
4.1	Granuli	31
4.2	Granulimateriaalin asennusajoneuvo (BMA)	31

4.3 Käyttöönottokoe.....	32
4.4 Ominaisuudet	32
4.4.1 Tuotantokapasiteetti	32
4.4.2 Toimintavarmuus	32
4.4.3 Vaatimusten täytyminen	32
5 YHTEENVETO	33
5.1 Tulokset.....	33
5.2 Pohdinta	33
LÄHTEET.....	35

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Loppusijoituslaitos. Posiva Oy. /12/	15
Kuva 2. Tämän hetken kapselointilaitoksen suunnitelma. /13/.....	16
Kuva 3. Moniesteperiaate. Posiva Oy. /14/	17
Kuva 4. Kuvassa on loppusijoituskapselin kuparinen ulkokuori sekä pallografiittivaluraudasta tehty sisäosa. /15/	18
Kuva 5. Loppusijoituskapseli. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.	19
Kuva 6. Bentoniittipuskuri. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.	20
Kuva 7. Loppusijoitustunnelin täyttölohkot. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.....	21
Kuva 8. Vasemmalla kiilatulppa ja oikealla kupolitulppa. /18/	22
Kuva 9. Päätytulppa. /29/	22
Kuva 10. Loppusijoitustunneliin asennettavat täyttölohkot ja -pelletit. /22/.....	26
Kuva 12. Täyttömateriaalin asennusajoneuvo. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.....	27
Kuva 13. Lohkokasetti. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.....	28
Kuva 14. Pellettikasetti. Posiva Oy. Risto-Matti Meriniemi, 2018.....	29

LIITELUETTELO

LIITE 1. Opinnäytetyö, toimeksiantajan versio, salainen.

LYHENTEET JA SANASTO

BMA	Granulimateriaalin asennusajoneuvo
DT1–3	Demonstraatiotunneli 1–3
EBS	Engineered Barrier System, tekniset vapautumisesteet
EPR	European Pressurized Water Reactor, eurooppalainen painevesireaktori.
FISST	Full Scale In Situ System Test, täyden mittakaavan järjestelmäkoe
GraFi	Granular Backfilling
Granuli	Rakeinen bentoniittimurska, raekoko <0.063–6 mm
KBS-3	Kärnbränsleslutsteg, ydinpolttoainekierron lopetusvaihe. Numero 3 on projektinnumero
LO1–2	Loviisa 1–2 voimalaitokset, painevesireaktori
OL1–2	Olkiluoto 1–2 voimalaitokset, kiehutusvesireaktori
OL3	Olkiluoto 3 voimalaitos, painevesireaktori
ONKALO	Maanalainen tutkimustila
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
TMA	Täyttömateriaalin asennusajoneuvo
TVO	Teollisuuden Voima Oyj

1 JOHDANTO

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus pitäisi alkaa 2020-luvulla ja yksi sen menetelmistä on loppusijoitustunnelin täyttö. Aihe valikoitui siten, että Posiva Oy:lla (myöhemmin Posiva) on tällä hetkellä menossa täyden mittakaavan järjestelmäkoe FISST. Siellä käytetään tämän hetkistä referenssitäyttömenetelmää, joka on täyttölohkomenetelmä. Tämän ohella on suunniteltu toista, vaihtoehtoista täyttömenetelmää, joka on niin sanottu granulitäyttömenetelmä. Työn tilaaja on Posiva.

Posiva on tällä hetkellä maailman ensimmäinen yritys, jolla on rakentamislupa rakentaa ydinjätteen loppusijoituslaitos. Tuotantokäyttöön suunnitelluista menetelmistä on vain vähän käyttökokemuksia esimerkiksi Ruotsista SKB:ltä tai Sveitsistä Nagralta. Siksi Posiva joutuu kehittämään ja testaamaan monia eri menetelmiä, jotta löytyy parhaat vaihtoehdot.

Ydinvoiman tärkeys on myös ollut esillä niin sanotun ilmastotalkoiden osana sillä se on otettu yhdeksi tärkeimmäksi ilmastonmuutoksen estäjäksi uusiutuvien energiamuotojen lisäksi. Helsingin Sanomat kirjoittaa seuraavaa IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) raportista: "Päästöt pitää kääntää jyrkkään laskuun nopeasti, ja vuonna 2050 maailman pitää olla hiilineutraali. Fossiilisia polttoaineita pitää korvata päästöttömillä, joista raportti mainitsee uusiutuvat energialähteet ja ydinvoiman." /1/ Päästöillä tarkoitetaan kasvihuonekaasuja, joista tärkeimpänä hiilidioksidi. Suomessa teknologian tutkimuskeskus VTT vaatii nopeita ilmastoratkaisuja. Tutkimuspäällikkö Antti Arasto listaa: "Suomessa ydinvoima tulee todennäköisesti näyttämään roolia. Kestävällä biomassalla tulee olemaan rooli, tuulivoiman rooli tulee voimistumaan huomattavasti, aurinkoenergiallekin tulee jonkinlainen rooli. Vesivoima pysyy nykyisellään. Lisäksi CCS näkyy yhtenä keinona". /2/ CCS (Carbon Capture and Storage) tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa.

Olkiluoto 3 (OL3) sekä Hanhikiven ydinvoimalat tulevat valmistuessaan lisäämään energiaomavaraisuutta sen aikaa kun myös vanhat voimalat Olkiluoto 1–2 ja Loviisa 1–2 ovat käytössä. OL3:n käytetty ydinpolttoaine tullaan loppusijoittamaan loppusijoituslaitokseen, mutta Hanhikiven käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisesta ei ole tehty mitään sopimuksia.

Ydinvoimaloissa käytetään ydinpolttoaineena uraania, joka on hieman radioaktiivinen alkuaine. Se on luonnossa melko yleinen ja säteilytasoltaan melko alhainen /31/. Syy uraanin käyttöön on, että se on edullinen sekä yksinkertaisimmin käytettävä fissioreaktiossa sekä sillä ole juurikaan muuta hyötykäyttöä, joten näin ei kuluteta muita arvokkaita resursseja /32/. Uraania "ammutaan" ydinvoimalassa neutronilla, joka osuessaan U-235-isotoopin ytimeen halkaisee sen. Halkeamisessa vapautuu lisää neutroneja, jotka jatkavat ketjureaktiota. Tästä halkeamisesta syntyy huomattavan paljon energiaa, jolla tuotetaan vesihöyryä turbiinille ja sähkögeneraattorille. Fissioreaktiossa syntyvät fissiotuotteet ovat radioaktiivisia ja ytimen hajoamisessa ne lähettävät niin sanottua jälkilämpöä. Siksi käytetty ydinpolttoaine jäädytetään reaktorihallin vesialtaissa noin viisi vuotta, jonka jälkeen käytetyn polttoaineen lämpö ja säteily on vähentynyt huomattavasti. Tämän jälkeen käytetty polttoaine siirretään välivarastoon, jossa se on vähintään useita vuosikymmeniä, ennen loppusijoitusta.

Posivan ydinjätteen loppusijoitus on suunniteltu alkavaksi 2020-luvulla. Loppusijoitus perustuu KBS-3V-menetelmään eli loppusijoituskapselit sijoitetaan vertikaalisesti loppusijoitustunneleiden lattialla oleviin loppusijoitusreikiin. Vaihtoehtoinen menetelmä on KBS-3H, jossa loppusijoituskapseli asetetaan horisontaalisesti loppusijoitustunneleita vastaaviin tiloihin. Tätä menetelmää ei kehitetä tällä hetkellä, mutta se on varalla ja kehitysvalmiudessa. /14/ KBS-3-menetelmän lähtökohdista on moniesteperiaate: kuparikapseli, puskuri, loppusijoitustunnelin täyttö ja peruskallio. Tunnelitäyttö on tällä hetkellä loppusijoituksen pullon kaula, koska nykyisellä menetelmällä ei ole päästy vaadittavaan asennusnopeuteen. FISST:in perusteella menetelmälle pystytään laskemaan kustannus-, nopeus- sekä luotettavuusarviot. Arvioiden mukaan menetelmä ei täytä annettuja vaatimuksia ja tämän takia menetelmälle on ohella suunniteltu toista, vaihtoehtoista täyttömenetelmää.

Granulitäytön, eli <0,065–6 mm kokoisien bentoniittijauheen, pitäisi korjata lohko-
täyttömenetelmän ongelmat. Se on arvioiden mukaan kustannuksiltaan halvempi sekä asennusnopeudeltaan huomattavasti nykyistä tehokkaampi. Granulitäytölle tehdään käyttöönottotesti, josta voidaan laskea päästäänkö tällä menetelmällä haluttuihin tavoitteisiin ja vaatimuksiin.

Näitä kahta eri täyttömenetelmää tullaan vertaamaan ja laskemaan, onko vaadittuihin kustannus-, tuotantovarmuus-, vaatimus- ja tuotantokapasiteettiarvioihin päästy täyttömenetelmien suhteen.

Kappaleet 1-2 ovat taustaa miten nykyiseen täyttömenetelmään on päädytty. Kappaleet 3-4 ovat kahdesta eri täyttömenetelmästä ja niissä on tarkempaa laite- sekä materiaalitietoa. Kappaleessa 5 on tulokset sekä pohdinta.

Työn lopputuloksia ja osaa aineistoa ei voida kuitenkaan esittää, koska ne sisältävät Posivan sisäistä materiaalia. Aineistoa on poistettu kappaleista 3, 4 ja 5. Varsinainen työ on toimeksiantajalla eli Posivalla ja työ on liitetty liitteeksi julkaistavaan versioon.

2 LOPPUSIJOITUS SUOMESSA

2.1 Posiva Oy

"Posiva Oy on vuonna 1995 perustettu asiantuntijaorganisaatio, joka vastaa omistajiensa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta, loppusijoitukseen liittyvistä tutkimuksista ja muista toimialaansa kuuluvista asiantuntijatehtävistä." Posivan omistajat ovat Teollisuuden Voima Oyj (60 %) sekä Fortum Power & Heat Oy (40 %). /3/

Aluksi ydinjäte suunniteltiin sijoitettavaksi ulkomaille. TVO kuitenkin aloitti loppusijoituksen tutkimukset, jotta pystyttiin varautumaan siihen, että tulevaisuudessa pitäisi ydinjäte loppusijoittaa Suomeen. Silloinen Imatran Voima, nykyinen Fortum, palautti kaiken ydinjätteen Neuvostoliittoon ja Venäjälle. Vuonna 1994 tuli voimaan ydinvoimalaki. Se määräsi, että kaikki ydinjäte piti käsitellä, varastoida ja loppusijoittaa Suomen maaperällä sekä ulkomailta ei saanut tuoda ydinjätettä Suomeen. Imatran Voima ja TVO perustivat tämän jälkeen Posivan, jonka tehtäväksi tuli hoitaa loppusijoituksen tutkimukset ja toteutus. /4/

Loppusijoituksen suunnittelu alkoi jo 1980-luvulla kun valtioneuvoston päätöksellä alettiin suunnitella loppusijoituksen aikataulua. Sen mukaan sijoituspaikka piti olla valittuna vuoden 2000 loppuun mennessä, loppusijoituslaitoksen rakentaminen aloittaa 2010-luvulla ja loppusijoituksen pitäisi alkaa noin 2020-luvulla. Lopulta vuonna 2001 loppusijoituspaikaksi valittiin Eurajoen Olkiluoto ja rakentamislupa saatiin vuonna 2015. /5/

2.1.1 Teollisuuden Voima Oyj

Teollisuuden Voima Oyj (myöhemmin TVO) on suomalainen energiayhtiö, joka tuottaa omistajilleen sähköä Mankala-periaatteella eli yhtiön omistajat saavat sähköä omakustannushintaan. Yhtiön suurin omistaja on Pohjolan Voima Oy, joka omistaa TVO:sta 58,5 %. /6/

TVO:lla on kaksi käyvää ydinvoimalaitosta, Olkiluoto 1 ja 2, joiden kummankin nimellinen nettosähköteho on tällä hetkellä noin 880 MW. Voimalaitokset otettiin käyttöön vuosina 1978 ja 1980. OL1–2 voimalaitokset ovat tyypiltään kiehutusvesireaktoreita. Olkiluoto 1 ja 2 tuottavat sähköä noin 16 % Suomen sähköntuotannosta. /7/

Tällä hetkellä on rakenteilla myös kolmas ydinvoimalaitos Olkiluoto 3 (OL3). Sen piti valmistua vuonna 2009, mutta tämän hetkisen aikataulun mukaan vuonna 2019 syksyllä. OL3 on tyypiltään painevesireaktori (EPR), joka tulee tuottamaan valmistuessaan noin 1600 MW. /8/

2.1.2 Fortum Oyj

Fortum Power and Heat Oy on suomalaisen energiayhtiön Fortum Oyj:n tytäryhtiö, joka vastaa lämmön ja sähkön tuotannosta. Fortum on valtionyhtiö ja Suomen valtio omistaa siitä 50,76 %. /9/

Fortumilla on kaksi käyvää ydinvoimalaitosta Loviisa 1 ja 2, jotka ovat neuvostoliittolais-venäläisiä painevesireaktoreita (VVER). Näiden voimaloiden nettosähköteho on 507 MW (LO1) ja 502 MW (LO2). Voimalaitokset otettiin käyttöön vuosina 1977 ja 1980. Loviisa 1 ja 2 tuottavat noin 10 % Suomen sähköntuotannosta. /10/

2.2 Loppusijoituslaitos

2.2.1 ONKALO®

ONKALO® (ONKALO® on Posiva Oy:n rekisteröity tavaramerkki) on Posivan maanalainen tutkimustila, joka on liitetty osaksi maanalaisia loppusijoitustiloja. Sen rakentaminen aloitettiin vuonna 2004. Siellä suoritetaan erilaisia paikkatutkimuksia, kuten tutkitaan kallioperää esimerkiksi geologian, hydrologian, kalliomekaanikan, geofysiikan sekä geokemian tutkimusmenetelmillä. Tällä hetkellä

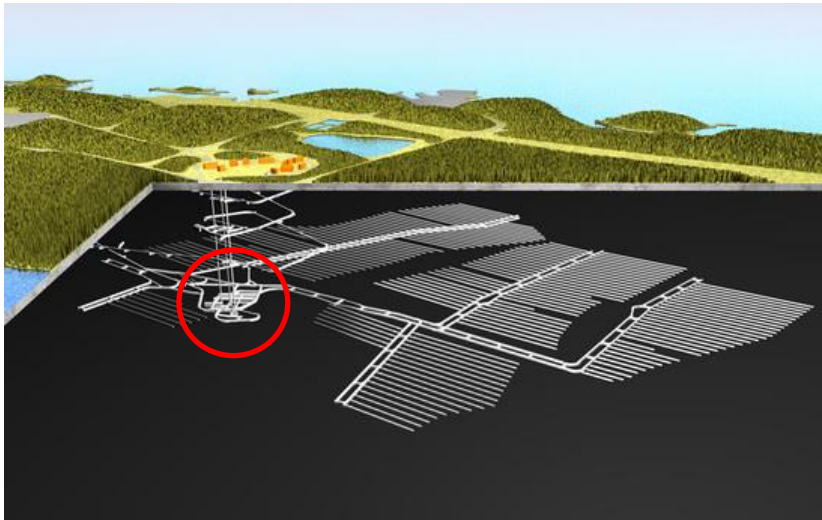
ONKALO on syvyydeltään noin 450 metriä. Tutkimustila antaa aidot olosuhteet testaamiseen kalliorakentamis- sekä loppusijoitustekniikoissa. /11/

2.2.2 Loppusijoitustilat

Loppusijoitustilat sijaitsevat noin 420 metriä maanpinnan alapuolella. Tilat koostuvat kolmesta erilaisesta tyypistä: loppusijoitustunnelit, keskustunnelit ja tekniset aputilat. Loppusijoitustunneleita tulee tämän hetkisen tiedon mukaan yhteensä 137 ja keskustunneleiden yhteispituus on noin 42 kilometriä. Tekniset tilat on ympyröity punaisella kuvassa 1. Maan alle tulee pinnalta loppusijoitustiloihin ajotunneli sekä neljä pystykuilua. Kuilut ovat henkilö- ja kapselikuilu sekä kaksi ilmanvaihtokuilua. /12/

Loppusijoitustunneleiden lattioihin tehdään 6–8 metriä syviä loppusijoitusreikiä, joihin kapselit (ks. luku 2.3) asennetaan ja jotka täytetään bentoniitilla. Bentoniitti on savilaji, jonka ominaisuuksiin kuuluu, että kun se on vaikutuksissa veden kanssa, se paisuu moninkertaiseksi. Tämä johtuu siitä, että bentoniitti sisältää hydrofiilistä eli veteen liukenevaa montmorilloniittisavea, joka on varaukseltaan negatiivinen. Kun savi on kosketuksissa veden kanssa, se sitoo itseensä heikolla fysikaalisella sidoksella vesimolekyylin vetyatomit. Seurauksena montmorilloniitin huokostilat täyttyvät vedellä ja savi alkaa paisua.

Käytön aikana tarkoituksena on, että tunneleita täytetään samaan tahtiin kuin loppusijoituskapseleita asennetaan. Näin loppusijoitusreiät olisivat mahdollisimman nopeasti suojattuna. Loppusijoitustunneleita ei tehdä kaikkia heti valmiiksi vaan niitä rakennetaan koko ajan käytön eli loppusijoituksen aikana. Tällä tavalla välletään tarpeettoman aikaisin tehdyt investoinnit sekä saadaan ilmanvaihto että vuoto-vedet minimoitua pitkällä aikavälillä. Samalla rakentaessa saadaan myös koko ajan lisätietoja ympäröivästä kalliosta ja muusta tekniikasta, joten suunnitelmia ja päätöksiä voidaan tehdä uusimman tiedon mukaan. /12/



Kuva 1. Loppusijoituslaitos. (Kuva: Posiva Oy.)

2.2.3 Kapselointilaitos

Toinen osa loppusijoituslaitosta on kapselointilaitos. Sen tarkoituksena on, että maan päällä pystytään siirtämään käytetty ydinpolttoaine kuljetussäiliöstä loppusijoituskapseliin (ks. luku 2.3). Rakennus (kuva 2) on jaettu kuuteen eri osaan ja jokaisella on oma tehtävänsä:

1. Uusien loppusijoituskapselien vastaanotto- ja varastotila
2. Polttoaineen käsittelykammio
3. Kuparikannen hitsauskammio
4. Tarkastuspaikat
5. Kapselin pinnan puhdistuspaikka
6. Kapselihissi kapselien siirtämiseksi loppusijoitustilaan.



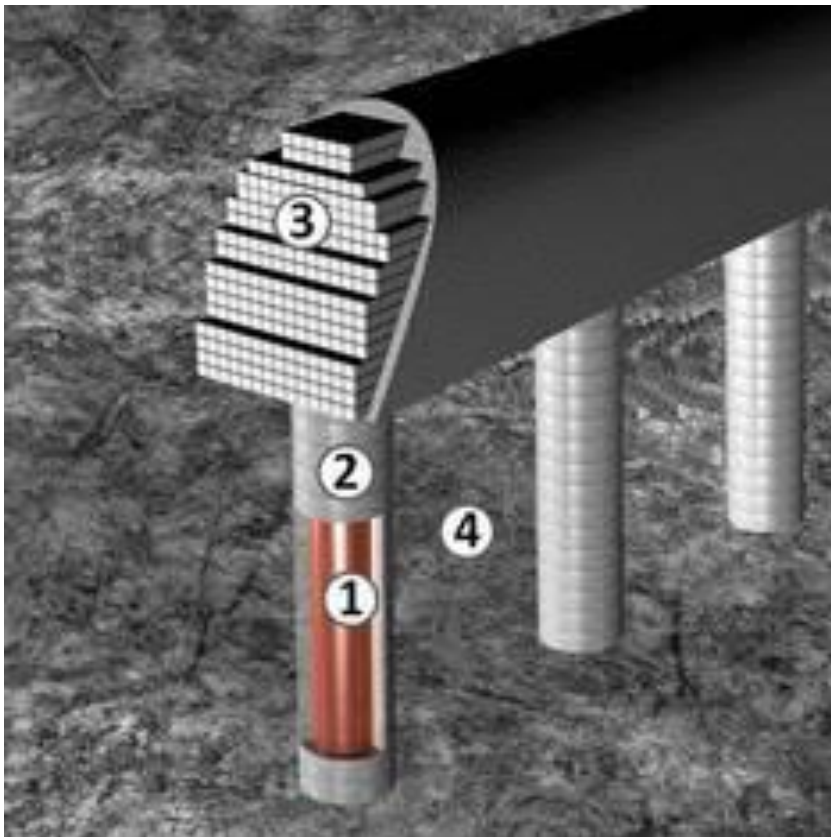
Kuva 2. Tämän hetken kapselointilaitoksen suunnitelma. (Kuva: Posiva Oy.)

Polttoaine tulee ensimmäisenä kuljetussäiliössä vastaanottotilaan. Sieltä se kuljetaan tilojen alapuolella olevan siirtokäytävää pitkin liikkuvalla nostimella seuraavaan huoneeseen. Polttoaineen käsittelykammiossa polttoaine siirretään kuljetussäiliöstä kuparikapseliin. Kapseliin laiton jälkeen polttoainetta sisältävä kapseli viehdään hitsausasemalle, jossa kuparikansi kiinnitetään. Kun kuparikapseli on lopulta yhtenäinen kokonaisuus, hitsauksen eheys tarkistetaan röntgen- ja ultraäänitarkastuksella. Lopulta kapselin pinnat puhdistetaan epäpuhtauksista, jonka jälkeen kapseli siirretään varastoitavaksi. Kun loppusijoitustiloissa ollaan valmiita kapselin vastaanottoon, kuparikapseli siirretään kapselihissiin, josta se siirretään maan alle loppusijoitettavaksi. /13/

2.3 Vapautumisesteet

Vapautumisesteiden tarkoituksena on estää ydinpolttoaineen pääsy ihmisen lähettyville tai elolliseen luontoon vaikka kalliassa tapahtuisi geologisia muutoksia. Loppusijoituksessa käytetyssä moniestejärjestelmässä yksittäiset esteet ovat toisistaan riippumattomia, jolloin yhden varmenteen tai monenkin poistuminen ei siis vaaranna muiden eristysten toimivuutta ja varmuutta (ks. Kuva 3). Nämä esteet ovat; loppusijoituskapseli (1), bentoniittipuskuri (2), loppusijoitustunnelin täyttö

(3) ja peruskallio (4). Esteet jaetaan kahteen eri ryhmään; tekniset vapautumisesteet (EBS, engineered barrier system, esimerkiksi puskuri) ja luonnollisiin vapautumisesteisiin (esimerkiksi kallio). Myös polttoaine toimii esteenä, koska keraamisessa olomuodossa oleva polttoaine ei liukene helposti veteen. Moninkertainen vapautumisperiaate perustuu SKB:n (Svensk Kärnbränslehantering AB) KBS-3-konseptiin. Loppusijoitus tulee tapahtumaan noin 400–450 metrin syvyydessä. /14/



Kuva 3. Moniesteperiaate. (Kuva: Posiva Oy.)

2.3.1 Loppusijoituskapseli

Loppusijoituskapselit (Kuva 5) ovat nimensä mukaisesti kapselin mallisia metallisäiliöitä, jotka ovat valmistettu kuparista ja joiden sisällä on pallografiittivaluraudasta valmistettu sisäosa. Kapselin ulkokerrokseksi on valittu 5 cm kuparia,

koska se suojaa hyvin kapselia syöpymiseltä. Sisäosa on valmistettu pallografiitti-valuraudasta, joka täyttää kapselin ja siihen on tehty polttoainenipuille sopivat paikat (ks. kuva 4). Pallografiittivalurauta on tarpeeksi kestävä ja lujaa, joten se kestää kalliossa tapahtuvat muutokset kuten maanjäristykset tai mannerjään synnyttämät paineet. Materiaalit, rakenteet, valmistustavat ja sulkemistekniikat ovat valittu sillä perusteella, että niiden pitäisi kestää satoja tuhansia vuosia. /15/



Kuva 4. Kuvassa on loppusijoituskapselin kuparinen ulkokuori sekä pallografiitti-valuraudasta tehty sisäosa. (Kuva: Posiva Oy.)

Suomen ydinvoimaloissa käytetään kolmea erilaista polttoainenippua: LO1–2, OL1–2 ja OL3. Jokaiselle on tehty nippuihin sopivat kapselit. Kaikkiin tällä hetkellä käyvässä oleviin ja viidenteen rakennettavaan ydinvoimalaan tarvitaan yhteensä noin 2800 loppusijoituskapselia. /15/



Kuva 5. Loppusijoituskapseli. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

2.3.2 Bentoniittipuskuri

Loppusijoituskapseli suojataan loppusijoitusreiässä bentoniittipuskurilla (Kuva 6), joka suojaa kapselia mekaaniselta rasitukselta sekä kallion liikkeiltä. Puskurin tarkoituksena on kirjaimellisesti puskuroida kaikki ulkoiset vaikutteet ja vaikutukset kapseliin ja päinvastoin. Bentoniitin ominaisuuksien takia (katso 2.2.2), jos savella ei ole tilaa paisua niin paisunnan seurauksena syntyy painetta. Tämän takia bentoniitti on erittäin hyvä vapautumiseste, koska se estää veden liikkeitä kalliosta kapseliin ja toisin päin. Jos vaikka tapahtuisi että loppusijoituskapseli saisi vaurion, bentoniitti estäisi positiivisesti varautuneiden ja hidastaisi negatiivisesti varautuneiden radionuklidien pääsyn kallioon. Bentoniittipuskuri koostuu tiiviiksi puristetuista bentoniittilohkoista, jotka suojaavat kapselia joka puolelta. Bentoniittilohkoja ei saada aivan kallioon ja kapseliin kiinni asennusvälyksistä johtuen, joten nämä tyhjät välit täytetään lopulta bentoniittipelletillä. /16/



Kuva 6. Bentoniittipuskuri. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

2.3.3 Loppusijoitustunnelin täyttö

Kun loppusijoituskapselit on asennettu loppusijoitusreikiin, alkaa tunnelitäyttö. Täytössä käytetään täyttömateriaalina bentoniittia, mutta montmorilliniittipitoisuus on pienempi kuin puskurissa. Täyttömateriaali on puristettuna lohkoihin, jotka kasataan rintamaksi loppusijoitustunneliin ja reunojen asennusvälykset täytetään bentoniittipelletillä (Kuva 7). Bentoniittia käytetään samasta syystä täytössä kuin puskurissa. Tunneliin ei siis pääse syntymään virtauskanavia sekä se on kemiallisesti sekä mekaanisesti vakaa. Täyttöaine tulee myös pitämään bentoniittipuskurin paikallaan, ettei se ala turpoa yli loppusijoitusreiästä. Myös ajotunnelit, kuilut sekä tekniset tilat tullaan lopulta täyttämään, mutta niissä tullaan hyödyntämään myös soraa. Tavoitteena on päästä kallion olosuhteissa niin lähelle alkuperäistä tilaa ennen louhimista kuin mahdollista. /17/

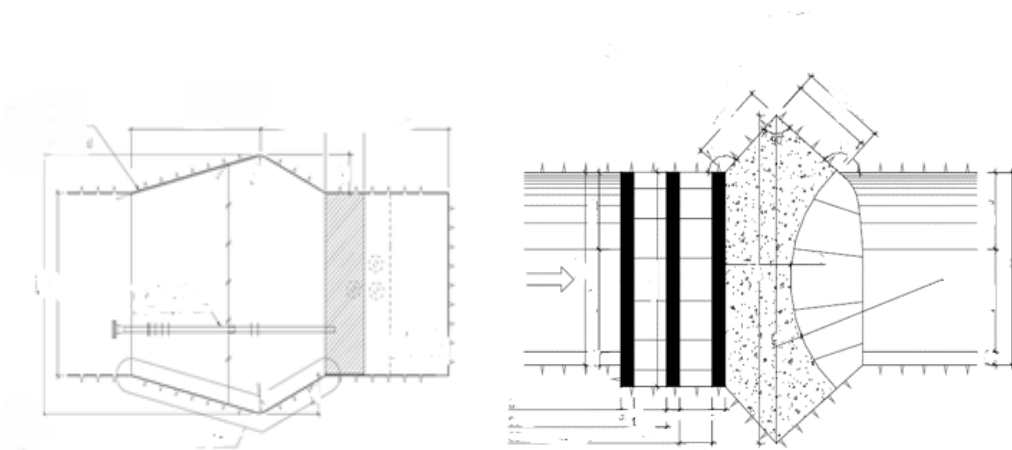


Kuva 7. Loppusijoitustunnelin täyttölohkot. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

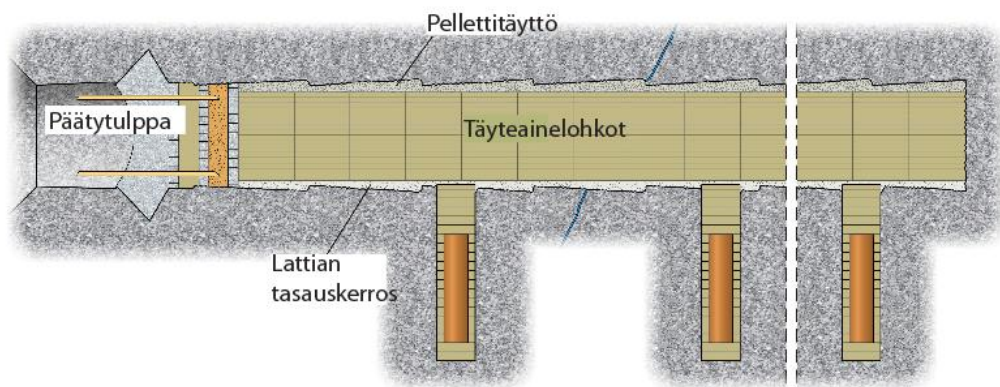
2.3.4 Tulppa

Täytön jälkeen loppusijoitustunnelin suuhun tehdään tulppa. Tulpan tarkoituksena on pitää täyttömateriaali paikallaan sen ajan kun loppusijoitusta tehdään eli noin 100 vuotta. Ennen tulppaa tehdään myös tiivistyskerros, jonka tarkoituksena on estää täyttömateriaalin kulkeutuminen pois loppusijoitustunnelista. Suunniteltuja tulppia on kahdenlaisia: kiila- sekä kupolitulppa (kuva 8). Kupolitulppa on tällä hetkellä Posivan referenssiratkaisu (kuva 8, 9). /18/

Tulpassa, kuten puskurissa ja täytössäkin, pitää ottaa huomioon, että materiaalit eivät saa sisältää liikaa sulfaatteja, sulfideja ja orgaanisia aineita, jolla vältetään korroosiota aiheuttavien aineiden pääsy kapselille. Tulppa sisältää sementtiä, notkistinta, silikaa, lentotuhkaa, kiviainesta, kevytsoraa sekä raudoitteet. /18/



Kuva 8. Vasemmalla kiilatulppa ja oikealla kupolitulppa. (Kuva: Posiva Oy.)



Kuva 9. Päätytulppa. (Kuva: Posiva Oy.)

2.3.5 Peruskallio

Kallioperän tarkoituksena on suojata loppusijoituskapseleita ulkoisilta tekijöiltä. Kallio antaa vakaat ja suotuisat kemialliset olosuhteet vapautumisesteille. Kapselit sijoitetaan 420 metrin syvyyteen vaikka jo 2 metrin kallion paksuus riittää estämään säteilyn. Suomen maaperällä suurten kallioperässä tapahtuvien liikkeiden mahdollisuus on erittäin pieni. Matalammalla loppusijoitussyvyydellä pystytään turvaamaan, etteivät kapselit saa vaurioita ulkoisilta vaikutuksilta sekä ne ovat suojaassa ihmistoiminnalta. Loppusijoitussyvyydestä matalammalle mennessä pohjaveden

suolapitoisuus kasvaa, joka vaikuttaa bentoniitin toimintaan negatiivisesti, koska se vähentää hydrofiilisyyttä. Montmorilloniittisaveen sitoutuu veden sijaan suoloja, jonka seurauksena vedenläpäisevyys nousee, jota juuri ylitetään välttää. Tämän seurauksena bentoniitti ei puskuroi yhtä tehokkaasti. Lähes hapeton pohjavesi liikkuu loppusijoitusreikien syvyydellä todella hitaasti, keskimäärin senttejä vuodessa, joten vesi ei pysty vaikuttamaan kapseluihin paljoa. Kapseleiden ja loppusijoitustunnelin paikat asemoidaan aina niin, että yritetään välttää vettä johtavia rakenteita.

/19/

3 NYKYINEN TÄYTTÖMENETELMÄ

3.1 Tausta

Aluksi täyttö suunniteltiin tehtäväksi in-situ-menetelmällä (paikan päällä tehtävällä), jossa olisi materiaalina käytetty bentoniitin ja murskeen seosta. Se olisi tuotu sekoitusautolla loppusijoitustunneliin ja täyttömateriaali olisi tiivistetty esimerkiksi täryttämällä. Tämä olisi ollut huomattavasti helpompi ja yksinkertaisempi täyttömenetelmä verrattuna lohko- ja pellettitäyttöön. Bentoniitin ja murskeen seoksella ei saatu testeillä tarpeeksi suurta varmuutta, että tällä menetelmällä olisi veden läpäisevyys ollut riittävän pieni. Molemmilla menetelmillä päästiin kyllä vaadittuun tiheyteen, mutta lohkoilla oli suurempi turvallisuusmarginaali. /20/

Toinen syy lohko-pelletti-menetelmän valintaan oli bentoniitin kestävyys suolaisuuteen. Suunnitelmien alkuvaiheessa ei ollut varmuutta mikä pohjaveden suolaisuus todellisuudessa on. Testeissä huomattiin, että täyttömateriaalin puristaminen tarpeeksi tiheäksi oli haastavaa, jotta bentoniitti piti vaadittavat paisunta- ja hydroauliset ominaisuudet. Tutkimuksissa huomattiin, että suolaisuus oli noin 15–25 g/l 500 metrin syvyydessä. Rajaksi sovittiin 35 g/l, koska tämä oli suurin arvo, jonka suolaisuuden ennakoitiin saavuttavan loppusijoituslaitoksessa meren takia. Suolaisuudesta johtuen kehitettiin kestävämpää täyttömenetelmää, jonka seurauksena keksittiin lohkokonsepti. /21/

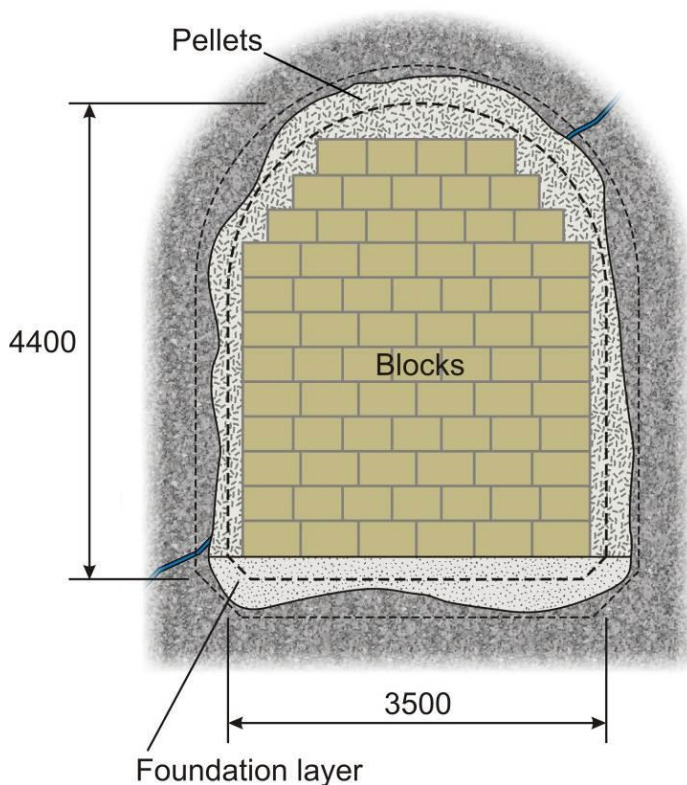
Ennen bentoniittia loppusijoitustunnelien referenssimateriaali oli Friedland-savi. Se on Saksasta Friedlandin kylän lähetyviltä löytyvä savilaatu, joka koostuu myös montmorilloniitistä. Suurin ero näissä savissa on, että bentoniitissä montmorilloniittipitoisuus on yli 65 % kun taas Friedland-savella 30–38 %. Pääsyy muutokseen oli paisuntapaine. Kun bentoniitissä on enemmän montmorilloniittia, bentoniitti myös paisuu enemmän. /22/

3.2 Täyttömateriaalit

Bentoniitti on luonnon vulkaanista savea, jonka tärkeimpänä osana on montmorilliniittisavi. Kuten luvussa 2.3.2 on todettu, montmorilliniitti sitoo itseensä vettä, jonka seurauksena savi paisuu moninkertaiseksi. Tästä syntyy savelle paisuntapaine. Bentoniittisavi johtaa myös todella huonosti vettä ja siksi se on valittu estämään loppusijoitustunneleissa veden virtausreittejä. Bentoniitin yleisimmät käyttötarkoitukset ovat kaatopaikkojen pohjanrakenteet, bentoniittimatot, kissanhiekka sekä käyttö paakkuuntumisenestoaineena E558 /23, 24/. Savilaatuja on kahdenlaisia; natriumbentoniitti sekä kalsiumbentoniitti. Natriumbentoniitti on vulkaanista savea, joka on syntynyt tuhkasta ja merivedestä kun taas kalsiumbentoniitti on syntynyt tuhkasta ja makeasta vedestä. /24/ Näiden laatueroavaisuudet ovat siinä, että natriumbentoniitti imee itseensä nopeammin vettä. Kalsiumbentoniitti hieman hitaammin, mutta sillä on korkeampi maksimipaisumispaine. Loppusijoituksessa savityypin erolla ei ole suurta vaikutusta, koska näin pitkässä projektissa (noin 250 000 vuotta) aineen natrium-kalsium-suhde muuttuu ympäröivän pohjaveden määräämään arvoon.

Täyttömateriaalit koostuvat kolmesta eri komponentista: bentoniittilohkoista, lattian tasauskerroksesta sekä bentoniittipelleteistä. Lattian tasauskerros koostuu bentoniittipelleteistä, jotka levitetään tasaisesti loppusijoitustunnelin lattialle. Kerroksen tarkoituksena on tasata lattia bentoniittilohkoja varten, jotta ne pysyvät muodossa tukevasti. /29/.

Täyttölohkot ovat FISST:issä esipuristettua bentoniittia, joiden paino noin 165 kg /25/. (Kuvat 7, 10).



Kuva 10. Loppusijoitustunneliin asennettavat täyttölohkot ja -pelletit. (Kuva: Possiva Oy.)

Asennus pitää myös toteuttaa siten, että lohkojen välit eivät muodosta välistä toiseen jatkuvia virtausreittejä. Tästä johtuen lohkot asennetaan joka toisella kerroksella toisin päin, jolloin lohkojen välit eivät synnytä yhtä pitkää linjaa lattiasta kattoon (Kuvat 7, 10). /22/

Pelletin tarkoituksena on imeä vettä itseensä, jolloin se estää veden virtausreittien synnyn tai ohjaa niitä pois täytön suunnasta. Täyttöpelletit ovat samoja pellettejä mitä käytetään lattiantasauksessa. Pelletit asennetaan rintamaan ruiskutusmenetelmällä, jossa ne puhalletaan kompressorin tuottamalla ylipaineella rintaman perälle. Pölyäminen pyritään estämään siten, että hienoaines imetään alipaineella pölypusiin. /25/.

3.3 Täyttömateriaalin asennusajoneuvo

Täyttömateriaali asennetaan loppusijoitustunneliin TMA:lla (täyttömateriaalin asennusajoneuvo), joka asentaa täyttölohkot haluttuun täyttömuodostelmaan.

TMA:n toimintaperiaate on, että edessä olevalla eturobotilla asennetaan täyttölohkot ja takana olevalla robotilla otetaan täyttölohko kyytiin (Kuva 11). Edessä ja takana ovat samanlaiset alipainetarttujarobotit, jotka kuljettajan ohjauksessa ottavat kiinni täyttölohkoista. Ajoneuvon etu- ja takaosaa yhdistää kuljetin, jolla siirretään lohko takarobotilta eturobotille. Robotit osaavat myös itsenäisesti asentaa täyttölohkoja. Ajoneuvo toimii sähköllä, mutta siinä on myös dieselmoottori, joka toimii varavirtalähteenä. /26/



Kuva 11. Täyttömateriaalin asennusajoneuvo. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

3.4 Lohkokasetti, pellettikasetti ja lastausasema

Lohkokasetin tarkoituksena on saada täyttölohkot kuljetettua lohkovarastosta loppusijoitustunneliin (kuva 12).



Kuva 12. Lohkokasetti. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

Lastausasema on lohkokasetin täyttämiseen tarkoitettu laite. Asemalle tuodaan lava täyttölohkoja, josta lohkot nostetaan alipainetarttujan kanssa lastausasemaan. Kun lohkot ovat saatu lastausaseman kyytiin, lohkot voidaan siirtää mekaanisesti lohkokasetin kyytiin. Lohkokasetin sisällä on oma kuljetin, joka kuljettaa lohkot perälle saakka.

Kun lohkokasetti on täytetty, kasetti siirretään terminaalitraktorilla TMA:n perään. Tämän jälkeen TMA ja lohkokasetti yhdistetään toisiinsa kaapelin kanssa, jolloin kasettia voidaan ohjata TMA:lla. Se osaa sen jälkeen itse ottaa takarobotilla täyttölohkon kasetista ja siirtää sen TMA:n kuljettimelle.

TMA:lla ladotaan koko lohkokasetti, jonka jälkeen lohkokasetti viedään takaisin lastausalueelle ja täytetään uudestaan. Tämä toistetaan 5 kertaa kunnes 5 metriä on ladottu. Tämän jälkeen tilalle tuodaan pellettikasetti (kuva 13), jolla saadaan puhallettua kompressorin tuottamalla ilmalla pelletit täyttörintaman reuna-alueille. Pellettikasettiin mahtuu noin 9 kuutiota bentoniittipellettiä. Kasetista vedetään letku

TMA:n eturobotille, jolla pystytään ohjaamaan puhallus haluttuun paikkaan rintamassa. Koska TMA ja pellettikasetti ovat myös yhteydessä toisiinsa, pellettikasetin toimintoja pystytään ohjaamaan TMA:sta.



Kuva 13. Pellettikasetti. Posiva Oy. (Kuva: Risto-Matti Meriniemi, 2018.)

3.5 Ominaispiirteet

3.5.1 Tuotantokapasiteetti

FISST:issä pääsimme noin 5 metriin viidessä päivässä.

3.5.2 Tuotantovarmuus

TMA:lla oli vaikeuksia testien alussa, mutta loppua kohden TMA alkoi toimia hyvin. TMA:lla pystytään toteuttamaan vaatimusten mukainen loppusijoitustunnelin täyttö.

3.5.3 Vaatimusten täytyminen

Lohko- ja pellettitäytöllä päästiin vaatimukseen vaikka TMA:n asennusnopeus ei vaatimuksia täyttänyt. Täyttö on tällä hetkellä loppusijoituksen pullon kaula, koska täyttö hidastaa muita loppusijoituksen osa-alueita.

4 VAIHTOEHTOINEN TÄYTTÖMENETELMÄ

4.1 Granuli

Bentoniitti kaivetaan bentoniittiesiintymästä, jossa sen kosteusprosentti on noin 30 %. Esiintymästä savi kaivetaan kaivinkoneella tai puskutraktorin piikeillä. Kaivuun jälkeen bentoniitti murskataan ja kuivataan auringossa. Monesti bentoniitti aktivoidaan tämän jälkeen. Aktivointi tarkoittaa, että bentoniitin päälle laitetaan lipeää eli natriumhydroksidia. Tämä johtaa siihen, että kalsiumbentoniitti saadaan muutettua natriumbentoniitiksi, joka on suositumpaa ostajien keskuudessa. Prosessissa bentoniittiin sitoutuneet kalsiumionit vaihtavat paikkaa natriumionien kanssa. Materiaali on siis samaa mitä käytettiin täyttölöhkoissa. Suurimmat tuotantomaat ovat Yhdysvallat, Kiina, Kreikka, Intia ja Turkki /28/.

Bentoniitti voidaan toimittaa suoraan kaivoksesta louhittuna, jolloin sen maksimirae on noin 30 mm. Toinen vaihtoehto on, että toimittaja kuivaa ja käsittelee bentoniitin tilaajan mieleiseksi esimerkiksi raekoon tai kosteuden mukaan (normaalisti 5–9 %). Loppusijoitusta varten bentoniitti puristetaan tämän jälkeen pelleteiksi. Pelletöinnin jälkeen pelletit vielä murskataan, jolloin saadaan haluttu raejakauma.

4.2 Granulimateriaalin asennusajoneuvo (BMA)

Granulimateriaalin asennusajoneuvo (BMA, alun perin Bulkkimateriaalin asennusajoneuvo) on täyttölaite, joka tavoitteena on siirtää granulimateriaalia loppusijoitustunneliin ja säilyttää seoksen tiheys nostamatta sitä. Laitteen tarkoituksena on siirtää granuli tiiviisti loppusijoitustunnelin perälle, jonka jälkeen siirtyy pienillä siirroilla taaksepäin.

4.3 Käyttöönottokoe

Käyttöönottokoe piti suorittaa tämän opinnäytetyön aikana, mutta aikatauluviivästyksen takia projekti ei kerennyt tähän työhön. Siksi vertailusta puuttuu lopullisia tuloksia BMA:sta ja granulitäytöstä.

Testi suoritetaan hallissa, johon on rakennettu loppusijoitustunnelia keskeisiltä piirteiltä vastaava testitunneli metallista. Testin tarkoituksena on varmistaa, että BMA toimii sekä testata millaiseen asennusnopeuteen laite pystyy. Samalla myös testataan, saadaanko granuli asennettua niin tiiviisti, että savi täyttää vaatimukset tiheyden osalta.

Testitunneli täytetään granulilla yhteensä kolme kertaa. Tarkoituksena on saada monta täyttökertaa, jolloin saadaan tarkempi tulos laitteen toiminnasta sekä granulin käyttäytymisestä.

4.4 Ominaisuudet

4.4.1 Tuotantokapasiteetti

Tuotantokapasiteetti saadaan myöhemmin käyttöönottokokeen jälkeen.

4.4.2 Toimintavarmuus

Toimintavarmuus pyritään todentamaan myöhemmin käyttöönottokokeessa.

4.4.3 Vaatimusten täytyminen

Vaatimustenmukaisuus pyritään todentamaan myöhemmin käyttöönottokokeessa.

5 YHTEENVETO

5.1 Tulokset

Yhteenvetoa ei pysty kunnolla antamaan, koska granuliprojekti venyi sen verran pitkäksi, ettei tuloksia ehtinyt saamaan tähän opinnäytetyöhön. FISST antoi kuitenkin osviittaa TMA:sta, että se on toimiva täyttömenetelmä sekä sillä pystytään asentamaan vaatimusten mukainen täyttö.

BMA tulee olemaan toimiessaan nopeampi täytön asennuksessa sekä halvempi kustannuksiltaan. Sille ei kuitenkaan voi antaa minkäänlaista tuotantovarmuutta ja tuleeko se pääsemään lopulta täytön vaatimuksiin.

5.2 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli vertailla nykyistä täyttölohkomenetelmää uuteen vaihtoehtoiseen granulitäyttömenetelmään. Työssä käytiin läpi nykyisen menetelmän taustoja ja miten päästiin tämän hetkiseen tilanteeseen. Tärkeimmät tavoitteet olivat kustannus-, tuotantovarmuus-, vaatimus- ja tuotantokapasiteettiarvioiden vertaaminen. Tässä työssä ei päästy kaikkiin määriteltyihin tavoitteisiin.

Aikataulullisista syistä tuloksia ei vaihtoehtoisten täyttömenetelmän tuotantovarmuus-, vaatimus- eikä tuotantokapasiteetista ennen työn valmistumista. Tässä työssä on kuitenkin esitetty miten hyvinkin erilaisia menetelmiä voi verrata keskenään ja erityisesti tämä palvelee jatkoa. Teollisille hankkeille on hyvin tyypillistä, että töiden tavoitteet ja ympäröivät olosuhteet muuttuvat työn aikana. Yksi yleinen seuraus näistä on aikataulujen muuttuminen eli tässä tapauksessa venyminen.

On kuitenkin hyvä todeta, että jo arvioiden takia vaihtoehtoisen täyttömenetelmän toteutus ja suunnittelu on kannattavaa. Nykyisellä täyttömenetelmällä pystytään toteuttamaan vaatimusten mukainen loppusijoitustunnelin täyttö lukuun ottamatta asennuslaitteen asennusnopeutta, joka ei vastaa vaadittua. Tämä johtaa siihen, että täyttö on loppusijoitustoiminnan pullon kaula. Uudessa granulitäyttömenetelmässä

arvioidaan olevan potentiaalia nykyistä parempiin tuloksiin asennusnopeuden suhteen. Mikäli uusi täyttömenetelmä saadaan toimimaan vaatimusten mukaisesti, se tulee ratkaisemaan täytön tämän hetkisen ongelmat eikä täyttö tule olemaan enää loppusijoituksen pullon kaula. Työtehtäviin kuului myös dokumentoida FISST:iä ja käyttää siitä saatuja tuloksia tässä opinnäytetyössä.

LÄHTEET

/1/ Mikkonen, M. 2018. Nämä neljä asiaa kannattaa tietää johtavien tutkijoiden ilmastoraportista. Helsingin Sanomat. Viitattu 29.11.2018. <https://www.hs.fi/ulko-maat/art-2000005856907.html>

/2/ Parviala, A. 2018. VTT vaatii Suomelta nopeita ilmastopäätöksiä “jotta teollisuus uskaltaa investoida” – tarvitaan ydinvoimaa, tuulta, aurinkoa, hiilidioksidin talteenottoa. YLE. Viitattu 29.11.2018. <https://yle.fi/uutiset/3-10530051>

/3/ Posiva. Posiva Oy. Viitattu 21.9.2018. <http://www.posiva.fi/posiva>

/4/ Paikanvalinta: Olkiluoto. Posiva Oy. Viitattu 24.9.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/paikanvalinta_olkiluoto

/5/ Käytetyn polttoaineen loppusijoitus Suomessa. 2017. Säteilyturvakeskus. Viitattu 21.9.2018. <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/kaytetyn-polttoaineen-loppusijoitus-suomessa>

/6/ TVO yhtiönä. TVO Oyj. Viitattu 27.9.2018. <https://www.tvo.fi/yhtio>

/7/ OL1 ja OL2. TVO Oyj. Viitattu 28.9.2018. <https://www.tvo.fi/ol1ol2>

/8/ Olkiluoto 3. TVO Oyj. Viitattu 28.9.2018. <https://www.tvo.fi/OL3>

/9/ Suurimmat osakkeenomistajat. Fortum Oyj. Viitattu 1.10.2018. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/sijoittajille/osaketietoa/suurimmat-osakkeenomistajat>

/10/ Loviisan voimalaitos. Fortum Oyj. Viitattu 1.10.2018. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos>

/11/ ONKALO. Posiva Oy. Viitattu 2.10.2018. <http://www.posiva.fi/loppusijoitus/onkalo>

/12/ Loppusijoitustilat. Posiva Oy. Viitattu 21.11.2018. <http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituslaitos/loppusijoitustilat>

/13/ Kapselointilaitos. Posiva Oy. Viitattu 26.11.2018. <http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituslaitos/kapselointilaitos>

/14/ Monet esteet varmistavat, ettei ydinjätettä pääse elolliseen luontoon. Posiva Oy. Viitattu 2.10.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet

- /15/ Loppusijoituskapseli. Posiva Oy. Viitattu 4.10.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/loppusijoituskapseli
- /16/ Bentoniittipuskuri. Posiva Oy. Viitattu 4.10.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/bentoniittipuskuri
- /17/ Tunneleiden täyttö. Posiva Oy. Viitattu 4.10.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/loppusijoitustunneleiden_taytto
- /18/ Päätytulppavertailun yhteenvetomuistio. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /19/ Ympäröivä kallio. Posiva Oy. Viitattu 9.10.2018. http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/kallio
- /20/ Posiva Oy. Projektisuunnitelma: LS-tunnelin täytön kehitys. 2017. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /21/ Börgesson, L., Dixon, D., Gunnarsson, D., Hansen, J., Jonsson, E. & Keto, P. Posiva Oy 2009. Working report 2009–115. Assessment of Backfill Design for KBS-3V Repository.
- /22/ Backfill Design 2016–17. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /23/ Elintarvikkeiden lisäaineet. 2017. Evira. Viitattu 20.11.2018. <https://www.evira.fi/elintarvikkeet/tietoa-elintarvikkeista/koostumus/elintarvikkeparanteet/lisaaineet/e-koodit/>
- /24/ Bentoniitti. 2008. Kaitos Oy. Viitattu 20.11.2018. <https://www.kaitos.fi/tuotesasto/bentoniitti/>
- /25/ P.451 Loppusijoitustilojen täyttömateriaali, järjestelmäkuvaus. 2017. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /26/ Lähtötietoja täytön asennuslaitteen suunnitteluun. 2012. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /27/ Projektisuunnitelma FISST. 2017. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.
- /28/ U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017. Clays. Viitattu 7.12.2018. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwion93YyI3fAhUE2CwKHe6BCagQFjA-BegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fminerals.usgs.gov%2Fminerals%2Fpubs%2Fcommodity%2Fclays%2Fmcs-2017-clays.pdf&usg=AOvVaw1n2t1gDfBeKx5O8E9UAeEJ>
- /29/ Keto, P. (ed.), Hassan, Md. M., Karttunen, P., Kiviranta, P., Kumpulainen,

S., Korkiala-Tanttu, L., Koskinen, V., Jalonen, T., Koho, P. & Sievänen, U., 2012. Backfill Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug. POSIVA 2012-18.

/30/ P.451 Loppusijoitustunnelin täyttömateriaali, vaatimusmäärittely. 2018. Posiva Oy. Sisäinen asiakirja.

/31/ Uraani polttoaineena. TVO Oyj. <https://www.tvo.fi/uraanipolttoaineena>. Viitattu 20.12.2018.

/32/ Teollinen käyttö. TVO Oyj. <https://www.tvo.fi/teollinenkaytto>. Viitattu 20.12.2018.

/33/ Ydinreaktio. TVO Oyj. <https://www.tvo.fi/ydinreaktio>. Viitattu 20.12.2018.