

Opinnäytetyö AMK

Energia- ja ympäristötekniikka

2021

Miro Gorski

SYVIEN TUTKIMUSREIKIEN SULKEMINEN

Selvitystyö Posiva Oy:lle



Miro Gorski

Syvien tutkimusreikien sulkeminen

Selvitystyö Posiva Oy:lle

Posiva Oy vastaa omistajiensa TVO:n ja Fortumin käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisesta Olkiluodon saarella Eurajoen kunnassa. Turvallista loppusijoittamista varten Olkiluodon kalliooperää on tutkittu vuodesta 1987 alkaen kairaamalla syviä tutkimusreikiä, joita on tähän mennessä tehty 58 kappaletta. Käyttövaiheen lähestyessä seurannan kannalta tarpeettomien tutkimusreikien sulkeminen on tarpeellista, jotta ne eivät aiheuta hydrogeologisia tai hydrogeokemiallisia häiriöitä loppusijoituslaitoksen ympäristössä.

Työn tavoitteena on optimoida syvien tutkimusreikien sulkemiseen tarvittavien materiaalien hankintaa ja sulkemisen valmisteluja. Työn tuloksia tullaan hyödyntämään tulevana keväänä vuonna 2022, jolloin tavoitteena on sulkea kolme syvää tutkimusreikää. Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää myös myöhemmin, kun syviä tutkimusreikiä aletaan sulkea järjestelmällisesti.

Työssä esitellään Posiva Oy, loppusijoituskonsepti sekä kuvataan syvien tutkimusreikien sulkemisen prosessia opinnäytteen tutkimusten esiin nostamien ratkaisujen näkökulmasta. Opinnäytetyö esittelee keväällä 2022 tutkimusreikien sulkemisessa käytettäville materiaaleille tehdyt testit ja niiden tulokset. Syviä tutkimusreikiä on testisuljettu aikaisemmin Posivalla sekä muualla maailmalla, mutta lopullista toimintatapaa ei ole vielä kehitetty.

Käytettävät materiaalit olivat työn käynnistyessä pitkälti määritelty. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on viedä niihin liittyvät valmistelut teolliseen ja kustannusoptimoituun muotoon. Päämateriaalit, joita sulkemisessa käytetään ovat esitiivistetty bentoniittisavi, matalan pH:n betoni ja kupariset välitulpat. Näihin liittyvää optimointia on bentoniittilieriöiden koko, niiden valmistus, asentamisaikainen suojaava pinnoitekerros, bentoniitin käsittely, varastointi ja pakkaus. Välikuparitulppien osalta on optimoitu tulpanmuotoa ja valmistusta. Tavoitteena matalan pH:n betonille on arvioida onko sen hinta edullisempi käytettäessä valmisbetonia vai kuivabetonia ja valita taloudellisin tapa hiilijalanjälki huomioon ottaen. Sulkemista varten tarvittavien komponenttien hankinnalle oli myös tarpeellista luoda laadunvarmistus- ja laadunvalvontalomakkeet.

Asiasanat:

tutkimusreikä, bentoniitti, matalan pH:n betoni, välitulppa, hydrogeologia,
loppusijoitus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and environmental technology

2021 | 44 pages

Miro Gorski

SEALING DEEP DRILLHOLES

Preparatory research for Posiva Oy

Posiva Oy is responsible for final disposal of spent nuclear fuel of its owners TVO and Fortum at Olkiluoto which is located in Eurajoki. For executing final disposal safely in Olkiluoto bedrock Posiva Oy have done site investigations and cored 58 deep drillholes since 1987. While disposal facility operation starts within couple of years, the unnecessary drillholes need to be closed to avoid the disturbances in the hydrogeological or hydrogeochemical conditions in natural host rock.

Objective for this thesis was to optimize acquisition and the preparations of the material needed for closure actions. Final results of the thesis would be utilized in the upcoming spring 2022 when the goal is to close three deep drillholes. Later on, the results will also be useful for closing the rest deep drillholes.

In this thesis Posiva Oy and its research will be introduced shortly to give understanding why sealing of deep drillholes is a necessity to achieve safe final disposal environment. In this thesis sealing process have been illustrated with test results achieved. Deep drillholes have been test sealed before in Posiva and around the world but a ready operational form hasn't been made yet.

For starting point most of the used material for sealing deep drillholes had been given and the goal was to create a ready industrial and cost optimized form for them. Main materials used are bentonite clay, low pH concrete and a copper plug between them. Optimizing included size comparison, manufacturing, protective coating, storing and packing for bentonite. Model and manufacturing for the copper plugs. Objective for concrete was to cost optimize acquisition by using dry concrete or ready-mixed concrete considering the carbon footprint. It was also needed to create combination of quality assurance forms for the acquisition of the components.

Keywords:

drillhole, bentonite, low pH concrete, copper plug, hydrogeology, final disposal

Alkusanat

Opinnäytetyö on tehty selvitystyönä Posiva Oy:lle loka — joulukuun aikana 2021. Opinnäytetyö on rahoitettu Posiva Oy:n toimesta. Opinnäytetyön tarkoituksena oli optimoida valmistelevia töitä syvien tutkimusreikien sulkemista varten. Sen tuloksia voidaan hyödyntää keväällä 2022 käytännön töissä. Tutkimuksen tarkoituksena on viedä jo valmiiksi mietittyjä ratkaisuja käytännön tasolle. Pääohjaajat opinnäytetyölle olivat Johanna Hansen Posiva Oy:lta sekä Tero Tuomarmäki Turun ammattikorkeakoulusta.

Haluaisin kiittää Posivaa opinnäytetyö mahdollisuudesta sekä sen mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitokset ohjaajille Johanna Hansenille, Jyrki Liimataiselle ja Keijo Haapalalle, jotka avustivat opinnäytteeseen liittyvissä kysymyksissä, sitä mukaa kun niitä ilmeni. Erityisesti kiitokset Johanna Hansenille, joka ajoi opinnäytetyön aihetta eteenpäin mahdollistaen sen toteutumisen.

Kiitokset myös Aimo Hiiroselle ja Janne Riihimaalle, joilta sain paljon apua opinnäytteen materiaalien selvityksissä, joka auttoi opinnäytteen etenemiseen huomattavasti.

Sisältö

1 JOHDANTO	11
1.1 Selvitystyön tavoitteet	11
1.2 Tutkimusmenetelmät	12
2 POSIVA OY	14
2.1 Loppusijoitus	15
2.2 ONKALO®	17
3 SYVÄT TUTKIMUSREIÄT	18
3.1 Syvien tutkimusreikien käyttötarkoitus	19
3.2 ONKALO® alueen hydrogeologiset vyöhykkeet	19
3.3 Sulkemiseen tarpeellisuus ja turvallisuusmerkitys	19
4 TUTKIMUSREIKIEN SULKEMISESSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT JA VAATIMUKSET	20
4.1 Bentoniitti	21
4.2 Välikuparitulpat	22
4.3 Matalan pH:n betoni	22
5 TUTKIMUSREIKIEN SULKEMISEEN KÄYTETTÄVIEN MATERIAALIEN SELVITYKSET	24
5.1 Materiaalien laskennalliset määrät kevään 2022 tutkimusreikien sulkemiseen	24
5.2 Selvitykset bentoniitille	26
5.2.1 Poraamalla	26
5.2.2 Puristamalla	28
5.2.3 Bentoniitin pinnoitus	29

5.3 Välikuparitulpat	33
6 TUTKIMUSREIKIEN SULKEMISEN PROSESSIN KUVAUS	34
6.1 Tutkimusreikien sulkemisen tavoitteet	34
6.2 Tutkimusreikien sulkemisen vaiheet	35
7 LOPPUTULOKSET JA POHDINTA	38
7.1 Tulokset	38
7.1.1 Bentoniitti	38
7.1.2 Välikuparitulppa	39
7.1.3 Matalan pH:n betonin hankinta	39
7.2 Pohdinta	40
7.2.1 Ajatuksia tutkimusreikien sulkemisesta	40
7.2.2 Opinnäytetyön onnistuminen	41
LÄHTEET	42

Kuvat

KUVA 1. MONIESTEPERIAATE (POSIVA OY)	16
KUVA 2. HAVAINNEKUVA LOPPUSIJOITUSLAITOKSESTA 4000 VUODEN KULUTTUA (POSIVA OY)	16
KUVA 3. LOPPUSIJOITUSLAITOS ONKALO® (POSIVA OY)	17
KUVA 4. ONKALO JA LOPPUSIJOITUSTUNNELIT (HARTLEY YM. 2012)	17
KUVA 5. SYVIEN TUTKIMUSREIKIEN SIJAINNIT LOPPUSIJOITUSTILOJEN TASOLLA -420 (HARTLEY YM. 2012), (KUVASSA VANHA LS-LAITOKSEN POHJA)	18
KUVA 6. PORATUT TESTILIERIÖT	27
KUVA 7. PURISTETTU BENTONIITTILOHKO TESTILIERIÖIDEN PORAAMISTEN JÄLKEEN	28
KUVA 8. PINNOITETUT BENTONIITIT TESTIPUTKESSA (ALKUTILANNE, 1H, 22H)	30

Taulukot

TAULUKKO 1. BETONIN METRILLISET ASENNUSMÄÄRÄT	25
TAULUKKO 2. BENTONIITTIEEN PINNOITUSTESTIEN TULOKSET (SJÖBLOM YM. 2016)	29
TAULUKKO 3. ALUSTAVAT AJAT PINNOITUSTEN KESTÄVYYDELLE	31
TAULUKKO 4. BENTONIITIN VARASTOINTI	32
TAULUKKO 5. ARVIO PINNOITEMÄÄRÄSTÄ KEVÄÄN 2022 SYVIEN TUTKIMUSREIKIEN SULKEMISISSA	32

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

DOPAS	Demonstration Of Plugs And Seals — Tulppien ja tiivisteiden projekti (Euroopan komissio)
Euratom	Euroopan atomienergiajärjestö
EYT	Ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö
OL-KR	Olkiluoto -kairareikä
OL-PP	Matala kairareikä Olkiluodon kallioperässä
OL-PVP	Irtomaapeitteiseen asennettu rei'itetty pohjaveden havaintoputki
POPLU	Posivan loppusijoitustunnelin betonitulpan nimitys
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Ab on ruotsalainen yhtiö, joka vastaa maan ydinjätehuollosta
STUK	Säteilyturvakeskus
T&K	Tutkimus ja kehitys
TEM	Suomen työ- ja elinkeinoministeriö
TLTA	Turvallisuusluokitellut tarveaineet
VAHA	Vaatimustenhallinta järjestelmä
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely
YVL	Ydinturvallisuusohjeet

1 Johdanto

Osana käytetyn ydinpolttoaineen sijoituspaikkatutkimuksia Posiva Oy on kairannut vuodesta 1987 alkaen 58 syvää tutkimusreikää, joiden syvyys vaihtelee 100 metristä yli 1000 metriin halkaisijoiden ollessa 57 — 76 millimetriä. Tutkimusreiät lävistävät Olkiluodon kallioperän vettä johtavia vyöhykkeitä ja reikiä käytetään paikkatutkimuksiin ja loppusijoitusalueen monitorointiin. Posiva on sulkemassa seurannan kannalta tarpeettomia syviä tutkimusreikiä tavoitteena vähentää reikien ylläpitokustannuksia käyttövaiheen aikana ja varmistua siitä, etteivät ne aiheuta hydrogeologisia tai hydrogeokemiallisia häiriöitä loppusijoituslaitoksen ympäristössä. Syvien tutkimusreikien vaikutusta kallioperän vettä johtaviin vyöhykkeisiin hallitaan monitulppalaitteistolla, mutta viimeistään loppusijoituslaitoksen sulkemisen yhteydessä tulee kaikki syvät tutkimusreiät tulpata pitkäaikaisturvallisiksi osoitetulla ja hyväksytyllä sulkemismenetelmällä lukuun ottamatta muutamia ympäristön monitorointiin käytettäviä reikiä.

Syvien tutkimusreikien sulkemismenetelmän jatkokehitys aiempien kokemusten pohjalta sekä siihen liittyvä teollistaminen ja toteutuksen optimointi on tärkeää, koska asennustavalla on merkitystä pitkäaikaisturvallisuuden näkökulmasta. Opinnäytetyön tuloksia hyödynnetään keväällä 2022 kolmen syvän tutkimusreiän sulkemisen toteutuksessa. Syvien tutkimusreikien sulkemisen menettelyjä voidaan soveltaa myös muissa kalliorakentamiseen liittyvissä reikien sulkemisissa.

1.1 Selvitystyön tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on optimoida sulkemiseen tarvittavien materiaalien hankintaa ja valmistusta kohti valmiimpaa teollista ja kustannusoptimoitua menetelmää. Sulkemiseen käytettävät päämateriaalit ovat bentoniittisavi, matalan pH:n betoni sekä välikuparitulpat, joita asennetaan vuorotellen maanpinnalta kairauskoneen avulla syvään tutkimusreikään tulpaksi. Päähuomio

opinnäytetyön selvityksessä ja käytännön tehtävissä kohdistuu bentoniittisavesta valmistettaviin tulppiin, sillä bentoniitista valmistettujen lieriöiden vieminen halutulle reikäsyvyydelle on haasteellista. Lisäksi bentoniittilieriöiden tarvittava reikäkohtainen määrä on kohtalainen, joten materiaalin valmistus, säilytys ja asennus pitää suunnitella toteutettavuuden näkökulmasta. Bentoniittilieriöiden osalta on verrattu kahta valmistusmenetelmää: 1) valmiiksi puristettujen lohkojen poraamista tai 2) puristusta valmiilla muotilla. Valmistustapaan liittyy vahvasti bentoniittilieriön koko ja saavutettava tiheys.

Bentoniittilieriöt tarvitsevat myös väliaikaisesti suojaavan pinnoitteen niiden määräsyyvyyteen asentamisen ajaksi. Ilman suojausta bentoniitille ominaisesti se turpoo joutuessaan kosketuksiin kalliopohjaveden kanssa ja voi paisua kesken asentamisen. Määräsyyvydessä bentoniitti toimii luonnollisena tulppana hydrogeologisten vyöhykkeiden välissä. Mahdollisia pinnoitteita on jo tutkittu, mutta pinnoiteratkaisu on silti vielä avoin. Välikuparitulpille tarvittava optimointi on tulpan muoto ja valmistus.

Sekä bentoniitille että välikuparitulpille on myös tarpeellista päivittää laadunvalvontalomakkeet niiden hankintaa varten. Reikien sulkemisessa käytetylle matalan pH:n betonille on valmis VTT:n Posiva Oy:lle kehittämä resepti, joka on toimitettu valmisbetonina paikalliselta betonitehtaalta (Sjöblom ym. 2016). Opinnäytetyössä tarkastellaan kyseisen erikoisbetonin erilaisia hankintatapoja, koska kerralla käytettävät betonimäärät ovat pieniä.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksen materiaalina toimii suurimmaksi osaksi Posivan sisäiset sähköiset dokumentaation hallintajärjestelmät, tietopankit ja tietokannat, joissa on tallennettuna laajalti kehitystöiden tuloksia, tutkimuksia käytetyistä materiaaleista ja selostuksia aikaisemmista sulkemisista. Opinnäytetyössä hyödynnetään aikaisempia Posivan (Posiva Oy), SKB:n (Svensk Kärnbränslehantering AB), VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) ja RWM:n (Radioactive Waste Management) tutkimuksia.

Materiaalien hankintaan ja käsittelyvaihtoehtoihin liittyen on suoritettu omia testejä Posivan tiloissa kenttälaboratoriossa, Porissa Posivan testitiloissa sekä Lapela Technology Oy:lla, jonka kanssa Posivalla on jo valmiiksi laaja yhteistyö.

Tästä opinnäytetyöstä on tehty julkinen ja salassapidettävä versio.

2 Posiva Oy

Posiva Oy on asiantuntijaorganisaatio, joka vastaa loppusijoituspaikkatutkimuksista ja loppusijoituslaitoksen rakentamisesta, käytöstä ja sulkemisesta käytetylle ydinpolttoaineelle Olkiluodossa Eurajoen kunnassa. Posiva Oy perustettiin vuonna 1995 ja sen omistavat Teollisuuden Voima (TVO) (60 %) sekä Fortum Power & Heat Oy (40 %). Posivan tehtävänä on loppusijoittaa sen omistajien käyttämä ydinpolttoaine turvallisesti maanalaiseen loppusijoituslaitokseen. Olkiluotoon rakenteilla oleva laitos on maailman ensimmäinen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustila. (Posiva 2021a.), (TVO-konserni 2021a.)

Yhtenä osana loppusijoitukseen liittyvää suunnittelua, kehitystä ja tutkimusta Posiva on päivittänyt monitieteellistä paikankuvausta viimeistä lupavaihetta eli käyttöluupahakemusta varten. Paikankuvauksen tarkoituksena on kuvata Olkiluodon kallioperän petrologiset, mineralogiset, kalliomekaaniset, hydrogeologiset, hydrogeokemialliset ja rakennusgeologiset olosuhteet ja niissä pitkällä aikavälillä tapahtuvat muutokset, joita hyödynnetään kalliomallien laadinnassa ja kallion soveltuvuusluokittelun taustalla. Olkiluodon tiiviin kiteisen kallioperän luonnollisten rakojen sekä hauraiden siirrosvyöhykkeiden ominaisuuksien selvitys on osa yllämainittua kokonaisuutta. Paikankuvausaineistoa on saatu ja saadaan 58:sta syvästä kairareiästä, erilaisista geofysikaalisista tutkimuksista, useilta paljastumilta, ONKALON® tutkimustilan kairauksista, kartoituksista ja testeistä, sekä matalien ja syvien kairareikien pohjavesinäytteistä ja paineiden seurannasta. (Hartley ym. 2018.)

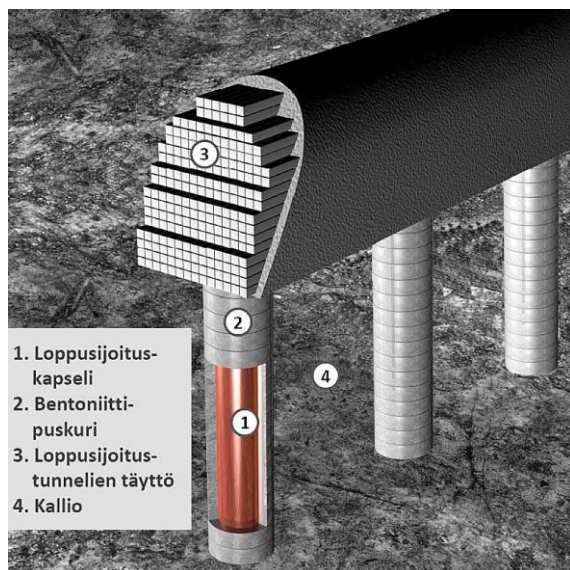
Posivan tietotaidon ja teknologian myynnistä vastaa Posivan tytäryhtiö Posiva Solutions Oy (PSOY). Posiva Solutions on onnistuneesti jakanut tietotaitoaan jo yli kahdellekymmenelle yritykselle ympäri Aasiaa, Eurooppaa ja Pohjois-Amerikkaa. (Posiva 2021c).

2.1 Loppusijoitus

Suomessa tehtiin vuonna 2001 periaatepäätös käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisesta peruskallioon Eurajoen Olkiluotoon — noin puolen kilometrin syvyyteen. Periaatepäätöksen taustalla oli YVA-menettelyn mukainen YVA-selostus, turvallisuusarviointi TILA-99, Eurajoen kunnan ja säteilyturvakeskuksen -lausunto. Periaatepäätös sinetöi paikanvalinnan ja antoi valtuudet jatkaa sijoituspaikkatutkimuksia. (Valtioneuvosto 2002). Posiva käynnisti lukuisten uusien syvien tutkimusreikien kairauksen ja ONKALOn louhinnan. Kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamisen edellyttävä valtioneuvoston myöntämä rakentamislupa saatiin vuonna 2015 ja rakennustyöt käynnistyivät 2017 maan päällä kapselointilaitoksella ja maan alla ONKALOn vaihtuessa osaksi loppusijoituslaitosta. (TEM 2012). Kapselointilaitoksen ja maanalaisen loppusijoituslaitoksen rakentaminen on edennyt laiteasennusvaiheeseen ja loppusijoitustilojen louhintaan. Posiva jättää TEM:lle käyttölupahakemuksen vuoden 2021 lopussa. (Posiva 2021e). Loppusijoituksen toteutuksen etenemistä valvoo STUK (Säteilyturvakeskus) YVL-ohjeissa kuvattujen menettelyjen mukaan. (STUK 2018)

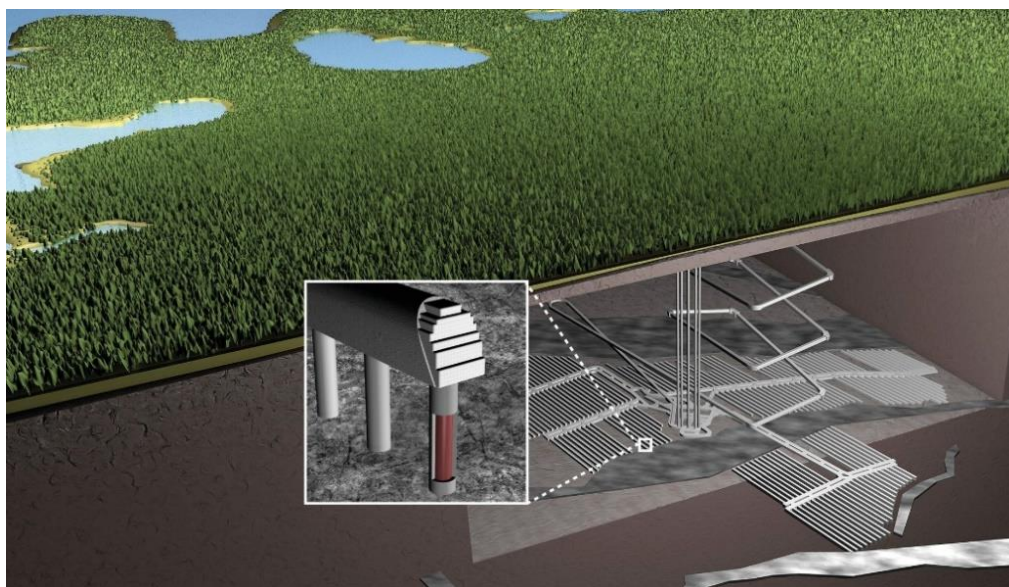
Pitkäaikaisturvallisuus on loppusijoituksen edellytys ja tätä arvioidaan teknistieteellisillä aineistoilla, joita Posivalla on kerätty yli neljä vuosikymmentä. Turvallisuusperusteluissa ollaan otettu huomioon myös luonnossa tapahtuvat muutokset aina vuoteen 1 000 000 asti. Lähtökohtana loppusijoittamiselle on moniesteperiaate siten, että yhden vapautumisesteen pettäminen ei vaaranna eristyksen toimivuutta. Käytettyä ydinpolttoainetta suojaa (Kuva 1):

1. Kuparivaippainen loppusijoituskapseli
2. Puskuribentoniitti
3. Loppusijoitustunnelin täyteaine
4. 400 — 500 metriä peruskalliota (Posiva 2021b.)



Kuva 1. Moniesteperiaate (Posiva Oy)

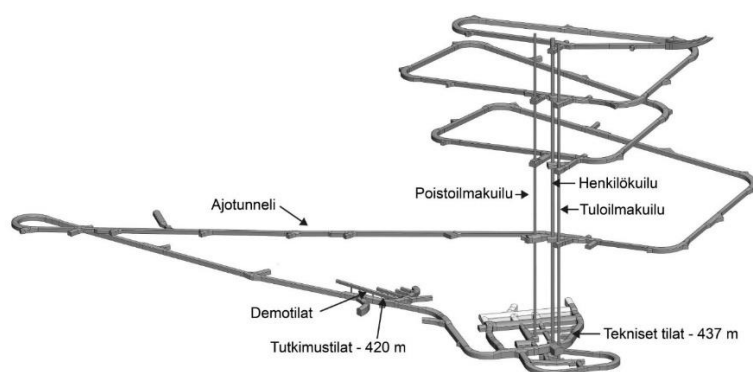
Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuutta arvioidaan käyttövaiheen aikana sekä sen jälkeen. Tarkastelujakso on jaettu eri ajanjaksoille käytön aikaisesta noin sadasta vuodesta, tulevien satojen ja tuhansien vuosien jaksoon aina miljoonaan vuoteen saakka. (Posiva 2021b).



Kuva 2. Havainnekuva loppusijoituslaitoksesta 4000 vuoden kuluttua (Posiva Oy)

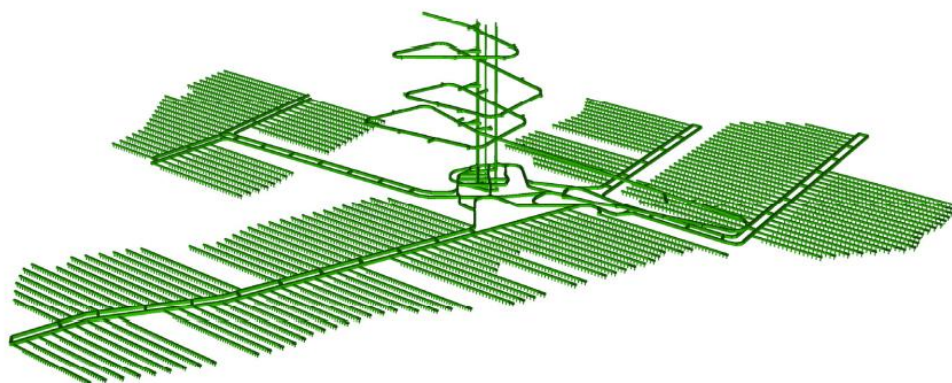
2.2 ONKALO®

ONKALON rakennustyöt aloitettiin kesäkuussa 2004 ja yli 17 vuoden aikana se on vakiinnuttanut käsitteensä Suomessa sekä kansainvälisesti. ONKALO ulottuu syvimmillään 455 metrin syvyyteen ja se käsittää spiraalinmuotoisen ajotunnelin, neljä pystykuilua (henkilökuilu, kapselikuilu, tulo- ja poistoilmakuilu), teknisiä tunneleita ja tiloja. (Kuva 3. Loppusijoituslaitos ONKALO® (Posiva Oy))



Kuva 3. Loppusijoituslaitos ONKALO® (Posiva Oy)

Vuonna 2015 Posiva sai valtioneuvostolta luvan loppusijoituslaitoksen rakentamiseen. Itse loppusijoitustilat rakennetaan noin 400 — 430 metrin syvyyteen. (Posiva 2021d). ONKALON rakentamisen vaikutuksia monitoroidaan lukuisten hydrologiaan, geokemiaan, pintaympäristöön, kalliomekaniikkaan ja vieraisiin aineisiin liittyvien parametrien mittaamisella ja seurannalla.



Kuva 4. ONKALO ja loppusijoitustunnelit (Hartley ym. 2012)

3 Syvät tutkimusreiät

Syvien tutkimusreikien sulkeminen on osa Olkiluodon tutkimusalueen hallintaan liittyviä tehtäviä. Tutkimusreiät on alun perin kairattu kallioperän karakterisointia varten ja niitä hyödynnetään jatkuvasti monitoroinnissa. Suurin osa keskeisellä tutkimusalueella sijaitsevista tutkimusrei'istä on tulpattu monitulppalaitteistolla ja sadan vuoden käyttöaikana joudutaan tulppia uusimaan säännöllisesti. Tulpattujen reikien ylläpito edellyttää jatkuvaa seurantaa, sillä ne voivat toimia häiriön lähteenä alueen hydrogeologialle ja hydrogeokemialle, mikäli tulpat eivät toimi odotetulla tavalla.

Kairareiät ulottuvat syvimmillään noin 1100 metriin. Suurin osa kairarei'istä ulottuu loppusijoitusvyydelle ja niillä voi olla yhteys loppusijoitusalueelle kallioperässä olevien luonnollisten rakoverkoston kautta. Syvien tutkimusreikien sulkeminen on osa loppusijoituslaitoksen sulkemista, jossa avoimet tutkimusreiät, jotka eivät enää ole monitorointikäytössä suljetaan. Posiva on laatinut strategian sekä priorisointitaulukon tutkimusreikien sulkemiselle. (Hansen 2018.)

Olkiluodon saarelle on kairattu yhteensä 58 syvää tutkimusreikää ja osan yhteyteen lyhyempi B-reikä. Lyhyellä B-reiällä täydennetään tutkimusreiän poratun teräsputkitetun osuuden kallioperän tiedot. Kallioperään on kairattu myös matalampia OL-PVP ja OL-PP tutkimusreikiä, joilla tarkkaillaan pohjaveden kemiallisia ja hydrologisia ominaisuuksia. (Aaltonen ym. 2016.)



Kuva 5. Syvien tutkimusreikien sijainnit loppusijoitustilojen tasolla -420 (Hartley ym. 2012), (kuvassa vanha ls-laitoksen pohja)

3.1 Syvien tutkimusreikien käyttötarkoitus

Syvilla tutkimusreiillä tutkitaan kallioperän ominaisuuksia, kuten tiheyttä, sähkönjohtavuutta, magneettisuutta ja kallion rakoilua. Rakojen ja rakovyöhykkeiden vesistä tutkitaan virtausmääriä ja pohjaveden kemiallisia ja hydrologisia ominaisuuksia. Lisäksi kairasydämistä saadaan selville kallioperän kivilajit ja kallion rakoilu. (Posiva 2021a.)

3.2 ONKALOn[®] alueen hydrogeologiset vyöhykkeet

ONKALOn ja loppusijoituslaitoksen alueella on tehty laaja-alaisia tutkimuksia ja mallinnuksia rakovyöhykkeistä ja veden virtauksista. Mallinnuksien avulla ollaan selvitetty ONKALOn alueen suurimmat vettä johtavat vyöhykkeet ja kallion ehyet kohdat. (Posiva 2012f). Sulkemisen toteutukseen käytetään apuna luotuja malleja ja niiden perusteella pystytään osoittamaan sulkemisessa käytettävien materiaalien asennuskohdat.

3.3 Sulkemiseen tarpeellisuus ja turvallisuusmerkitys

Ydinlaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet on ryhmiteltävä niiden turvallisuusmerkitysten perusteella turvallisuusluokkiin 1, 2, 3 sekä EYT (ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu). Syvien tutkimusreikien sulkeminen on ydinturvallisuusluokaltaan EYT ja syvien tutkimusreikien sulkemiseen liittyvää kehitystyötä on testattu sulkemalla kaksi reikää 2016 — 2017. (Hansen ym. 2017). Reikien sulkeminen ennen käyttölupahakemusta toteutettiin tutkimus- ja kehitysprojektina — joskin tavoitteena oli sulkea kyseiset reiät lopullisesti. Merkittävin tekijä sulkemiselle on reikien aiheuttamien pohjavesihäiriöiden pysäyttäminen mahdollisimman nopeasti. (Aro ym. 2020). Arvioiden mukaan tutkimusreikien merkitys pohjaveden kulkeutumisreittinä on vähäinen. (Hartley ym. 2012).

Tutkimusreikien sulkemisessa käytettävät materiaalit ja vaatimukset

Reikien sulkemisessa käytettäville materiaaleille on tehty laajoja tutkimuksia ja niiden käytölle on tieteelliset perusteet (Sjöblom ym. 2016, Jefferies ym. 2016, Sandén ym. 2018). Materiaalien tutkimukset ovat perustuneet vedenjohtavuuteen, pitkäikäisyyteen, mekaaniseen kestävyys ja kemialliseen kanssakäyntiin muiden sulkemisessä käytettävien materiaalien kanssa. Sulkemisessa käytettävien materiaalien täytyy pysyä muuttumattomana pitkiäkin aikoja ja niiden erodoitumisen tulisi olla hidasta ja ennustettavissa, jotta niiden toimintakyky säilyy loppusijoituslaitoksen sulkemisen jälkeisissä olosuhteissa. Aikaisemmissa tutkimuksissa todettiin pitkäikäisyyden täytyvän parhaiten luonnollisten materiaalien kanssa, sillä tuhansien vuosien kestoa ei voida osoittaa materiaalitein, mutta luonnollisten materiaalien voidaan osoittaa pysyneen muuttumattomina vuosituhansia sopivissa olosuhteissa. Tutkimuksissa todetaan myös mekaanisen kestävyuden olevan hyvä esimerkiksi sementillä, bentoniitilla ja murskatulla kivellä (Jefferies ym. 2016.)

Tarkempia vaatimuksia syvien tutkimusreikien sulkemisen materiaaleille ovat (Posiva 2021g):

- Tutkimusreikien tulpissa on oltava materiaaleja, jotka eivät rapaudu helposti ja siten täyttävät avoinna olevat tilavuudet tutkimusreiästä.
- Tutkimusreikien tulppien paisuvan saven vedenjohtavuus saa olla korkeintaan 10^{-6} m/s.
- Tutkimusreikien tulppien paisuvan saven on rajoitettava häiriöiden muodostumista pohjavesiolosuhteisiin.
- Sulkemisen on oltava kemiallisesti yhteensopiva muiden EBS-komponenttien ja loppusijoitustiloja ympäröivän kallion kanssa.
- 300 metrin alapuolella on käytettävä matalan pH:n materiaalia.
- Materiaalien täytyy olla TLTA luvitettuja. (Turvallisuusluokiteltu tarveaine)
- Materiaaleille täytyy suorittaa laadunvalvonta.

- Kaikki syvän tutkimusreiän sulkemiseen käytettävät materiaalit on dokumentoitava.

4.1 Bentoniitti

Bentoniitti on yleisnimitys saville, jotka koostuvat smektiittimineraaleista, joista yleisin on montmorilloniitti. Yleisimmin ne ovat muodostuneet vulkaanisesta tuhkasta pitkän ajan muutoksen tuloksena. Bentoniitille ominaista on sen paisumiskyky sen ollessa kosketuksissa veden kanssa, jolloin se toimii tiivisteenä. Perustuen sen kestävyuteen ja toimintakykyyn se on erinomainen materiaali käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisen turvaamiseen. (GTK)

Sulkemisessa käytettävälle bentoniitille vaatimuksena on vähimmäiskuivatiheys $1,4 \text{ [kg/dm}^3\text{]}$, joka on johdettu tavoiteltavasta vedenjohtavuudesta. Sulkemiseen käytetään MX-80 bentoniittia, jonka vedenjohtavuus on testattu esimerkiksi aikaisemmin suljetusta OL-KR5 näytteestä 237 metrin syvyydestä. Tuloksena bentoniitin vedenjohtavuudelle saatiin $4,74 \cdot 10^{-13} \text{ [m/s]}$, joka täyttää vaatimuksen. (Kumpulainen ym. 2017.)

Tarvittavat liitteet hankinnalle:

- Laatuvaraus, josta ilmenee mistä materiaalista bentoniitit on porattu, niiden koko ja määrä
- Kuormakirja jokaisesta bentoniittilähetyksestä lohkotunnistein

Tarvittavat laadunvalvonnat ja dokumentoinnit ennen asentamista:

- Bentoniitti -kappaleiden dimensiot ja tiheydet lasketaan
- Jokaisesta lähetyksestä valitaan yksi kappale vesipitoisuuden ja puristuslujuuden määrittämistä varten.

4.2 Välikuparitulpat

Välikuparitulpat toimivat sulkemisessa asentamisen apuvälineenä ja niiden tarkoitus on estää betonin ja bentoniitin sekoittuminen. Puhtaan kuparin käyttö loppusijoituksessa on yleistä, sillä se kestää hyvin korroosiota hapettomissa oloissa ja se on helposti työstettävä materiaali.

Tarvittavat liitteet hankinnalle:

- Laatuvaruutusprotokollakirja juotokuparille
- Laatuvaruutus kuparitangolle, josta tulpat sorvattu
- Käyttöturvatieote

4.3 Matalan pH:n betoni

Sulkemisen vaatimuksena 300 metrin alapuolella on matalan pH:n materiaalien käyttö, jotta materiaalin vaikutus olisi mahdollisimman vähäinen sulkemisessa käytettäviin muihin materiaaleihin, mineraaleihin ja halkeamiin. Normaalin betonin pH arvo on noin 13-14, josta syystä tutkimuksia matalan pH:n betonin reseptille on teetetty Posiva Oy:n sekä muiden tahojen toimesta. (Karvonen 2012).

Lähtökohtaisesti betonin tulee sisältää runsaasti kiviainesta täyttämään reikä myös tilanteissa, joissa sementti on rapautunut. Ajan myötä vettä johtavien vyöhykkeiden kohdalla sementti tulee erosoitumaan pois, mutta vyöhyke tulee olemaan enintään kymmeniä metrejä ja valtaosa matalan pH:n betonista on erittäin tiivistä pitkällä aikavälillä. Betonille on asetettu myös vaatimuksia sen olosuhteenkestävyydelle, kemialliselle kestävyydelle, runkoaineen suurimmalle raekoolle, betonimassan notkeudelle, pumpattavuudelle ja kovettumisnopeudelle. Lopputuloksena Posivan toimesta on kehitetty reikien sulkemiseen oma betoniresepti. (Sjöblom ym. 2016.) Resepti on modifioitu Posivan yhteistyössä VTT:n ja Swecon (entinen AKO) kanssa, osittain Euratomin seitsemännen puiteohjelman DOPAS projektin yhteydessä kehitetystä matalan pH:n massiivivalubetonista, jota käytettiin POPLU-tulpassa (Holt & Koho 2016.)

Laadunvalvonta on ollut aikaisemmin ohjeellinen, koska betoninormit eivät edellytä näin kattavaa laadunvalvontaa näin pienelle määrälle (2m³). Laadunvalvontaa on kuitenkin laajennettu menetelmän kehitystyön kannalta. Betonivalmistaja valmistaa koekappaleet tarvittaessa. Niistä selvitetään betonimassan vesitiiviys, puristuslujuus ja massan pH.

Tarvittavat laadunvarmistuksen liitteet ja testit hankinnalle:

- Kiviaineksen vesipitoisuus
- Betonimassan koostumus
- Tuoreen massan ilmamäärä
- Betonimassan vedenerottuminen

Tarvittavat laadunvalvonnat ja dokumentoinnit ennen asentamista:

- Notkeus (leviämä)
- Tuoreen massan lämpötila

5 Tutkimusreikien sulkemiseen käytettävien materiaalien selvitykset

Sulkemiseen käytettävien materiaalien selvityksiin on hyödynnetty aikaisempia aineistoja Posiva Oy:n tutkimus ja kehittämistöistä (T&K), joita on toteutettu OL-KR5 ja OL-KR21 sulkemisen yhteydessä ja teetätetty Posivan toimesta esimerkiksi VTT:llä. Lisäksi on perehdytty mm. SKB:n tekemään T&K-työhön reikien sulkemisen osalta. Aikaisempien T&K-töiden pohjalta on tehty tutkimussuunnitelma ja arvio mahdollisten lisätiestien tarpeelle.

5.1 Materiaalien laskennalliset määrät kevään 2022 tutkimusreikien sulkemiseen

Syvien tutkimusreikien sulkemiseen käytettäville materiaaleille tehtyt selvitykset on tehty huomioiden materiaalien määrät keväällä 2022 suljettaville tutkimusrei'ille. Materiaalien laskennallisille määrille on hyödynnetty alustavia sulkemisen suunnitelmia (Hansen ym. 2021). Suljettavien tutkimusreikien kokonaispituus on noin 1904 metriä.

Bentoniitti

Arvioitu tarvittava lieriöiden määrä alun perin oli 430 kappaletta, mutta tämä on laskettu lieriöiden pituuden ollessa 300 millimetriä. Alustavan suunnitelman mukaan bentoniittitulppia asennetaan yhteensä 13 kappaletta. Kappaleessa 6.2 Tutkimusreikien sulkemisen vaiheet on esitelty bentoniittitulppien asennus ja tällä menetelmällä bentoniittitulpan pituudeksi muodostuu ennen paisumista 8 metriä 75 senttimetriä. Bentoniitti lieriöiden ollessa 350 mm tarvittava bentoniittilieriöiden vähimmäismäärä on 325 lieriötä. Tarvittava lieriöiden määrä väheni lohkojen syvyyden ollessa suurempi kuin alustavien laskelmien sekä asentamisen käytännöllisyyden näkökulmasta.

Välakuparitulpat

Välakuparitulppia asennetaan bentoniittitulpan molemmille puolille (26 kpl). Sen lisäksi bentoniitin asentamisessa käytetään asentamisen apuvälineenä kuparista ylämäntää (13 kpl). Ensimmäisen betonoinnin yhteydessä kuparitulppa on katkaistu ja niitä tarvitaan vähintään 3 kappaletta. Määrällisesti katkaistuja kuparitulppia tarvitaan asentamisen apuvälineinä enemmän, mikäli betonia ei saada asennettua reikään yhdellä kertaa tarvittavaa määrää, jolla saavutettaisiin bentoniitin asennussyvyys.

Matalan pH:n betoni

Laskennallisesti matalan pH:n betonia tarvitaan syvien tutkimusreikien täyttöön noin 8 kuutiometriä. Kappaleessa 7.1.3 (Matalan pH:n betonin hankinta) eritellään betonin hankintaa ja tuotannollisista syistä massaa tilataan 2 kuutiometriä kerrallaan.

asennus	Betonin määrä [m]		
	KR4	KR7	KR32
1	76	72	60
2	95	121	122
3	113	136	
4	101	171	
5	58	154	
6	67		
7	115		
8	83		
9	125		

Taulukko 1. Betonin metrilliset asennusmäärät

Taulukosta yksi saadaan betonin metrilliset asennusmäärät ja asennuskerrat, joita on yhteensä vähintään kuusitoista. Aiemmissa sulkemisissa suurin asennettu betonimäärä on ollut ajoputkissa 159 metriä, jolla on arviolta saatu täytettyä 113,65 metriä reiästä. Määrällisesti betonia on mennyt 511,50 litraa ja sen paino on ollut 1136kg. Tämän määrän putkiston täyttöön on mennyt tunti viisitoista minuuttia. (Hansen ym. 2017).

5.2 Selvitykset bentoniitille

Bentoniitin hankinta voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Se voidaan porata valmiista lohkoista tai puristaa bentoniittijauhosta. Valmiiksi puristettuja suojattuja lohkoja sekä bentoniittijauhoa Posiva Oy:lta löytyy valmiina varastosta. Valmistustavasta riippumatta bentoniitti täytyy suojata kelmulla tai muulla ilmatiiviillä suojalla sen varastoinnin ajaksi, kunnes se on pinnoitettu. Vaihtoehtoisesti bentoniittilieriö voidaan suojata kosteudelta pinnoittamalla se heti valmistuksen jälkeen, mikäli pinnoitteen antama suoja koetaan riittäväksi estämään bentoniitin reagointi ympäristön kosteuden kanssa ennen asennusta. Merkittävimmät tekijät bentoniittilieriöiden hankinnalle on saada arvio parhaasta valmistusmenetelmästä tehokkuuden, kustannuksen ja ajankäytön näkökulmasta.

5.2.1 Poraamalla

Porin Purku ja Saneeraus Oy porasi bentoniittilieriöt testeihin Porissa kolmas marraskuuta 2021 Posivan hallissa. Valmiiksi puristettujen lohkojen syvyys on noin 35 senttimetriä. Poraamalla bentoniittilieriöiden pituus määräytyy porattavien lohkojen syvyydestä, eikä lieriöiden pituuden lisämuokkauksella saavuteta lisäarvoa sulkemisen toteutuksen suhteen.

Bentoniitti lieriöt porattiin yhdestä lohkoista ja niiden vesipitoisuus tarkistettiin Posivan kenttälaboratoriossa punniten ne ennen ja jälkeen uunikuivauksen. Uunin lämpötilan oli 105 astetta ja kuivausaika 24h. (Sivula 2014). Tarkistusten perusteella vuonna 2020 puristetut bentoniittilohkot ovat säilyneet varsin hyvin ja niiden käyttö syvien tutkimusreikien sulkemisen bentoniittilieriöinä on mahdollista keväällä 2022.



Kuva 6. Poratut testilieriöt

Poraaminen onnistuu tällä hetkellä käytössä olevalla menetelmällä, mutta mahdollisuuksia sen optimointiin on. Automatiikan hyödyntäminen poraamisessa on kuitenkin hankalaa, sillä jäähdytyksessä ei voida käyttää vettä vaan vaihtoehtoisesti jäähdytyksen täytyy perustua ilmaan tai muuhun kuivaan menetelmään. Testatulla menetelmällä poraamiseen kuluva aika-arvio on arvioitu valmistelevien töiden, yhden bentoniittilieriön poraus-ajan, poran asemoinnin ja tarvittavien siirtelyjen ja bentoniittilieriöiden pakkaamisen perusteella. Huomioon laskennassa otettiin myös tehokas työaika. Alustavan aika-arvion mukaan bentoniittilieriöiden poraamiseen menee vähintään kuusi päivää.



Kuva 7. Puristettu bentoniittilohko testilieriöiden poraamisen jälkeen

5.2.2 Puristamalla

Aiemmin tehtyjä bentoniitin puristustestejä on suoritettu Posiva Oy:n toimesta. Posiva Oy:lla tutkimusta tehtiin puskurilohkojen valmistuksesta yksiakselisella puristusmenetelmällä, jonka päämääränä oli tuottaa laboratorio-olosuhteissa homogeenisia koekappaleita, joissa on riittävä kiintotiheys ja ne täyttävät puskurilohkoille suunnittelussa esitetyt vaatimukset. Referenssimateriaalina käytettiin MX-80 bentoniittia, jonka kosteuspitoisuus pääsääntöisesti oli 17%. (Holt, 2011.)

Tulosten perusteella bentoniittilieriöiden valmistaminen puristamalla on mahdollista. Tutkimustulosten nojalla huomio kiinnittyy kuitenkin lieriöiden kokoon. Tutkimuksessa käy ilmi, että suurin mahdollinen pituuden suhde halkaisijaan on 2:1, mikä tarkoittaa sulkemiseen tarvittavien bentoniittilieriöiden tapauksessa 120 millimetrin pituisia lieriöitä. Testissä puristukseen käytetty aika oli kaksi minuuttia ja ottaen huomioon jauhon asentamisen ja kappaleen poiston, pitäisi kappaleen kokoa pystyä kasvattamaan, jotta sen valmistaminen olisi tehokkaampaa ja ajankäytöltään hyödyllisempää.

Tulevaisuuden kannalta puristamista kannattaa kehittää, sillä valmiiksi puristettuja lohkoja ei välttämättä ole aina saatavilla. Tulevaisuudessa bentoniitin puristamista on tarkoitus testata sivulta päin, jolloin bentoniitin pituuteen voidaan vaikuttaa enemmän. Posiva Oy:lta löytyy puristamisen testaamiseen käyvää materiaalia, josta on tarpeellista ottaa näyte ja tarkistaa kosteus, sillä materiaali on sekoitettu vuonna 2018.

5.2.3 Bentoniitin pinnoitus

Pinnoituksen tarkoituksena on suojata bentoniittia asennusvaiheen ajan, jotta se saadaan vietyä määräsyyvyteen. Bentoniitti paisuu tultuaan kosketuksiin veden kanssa ja aikaisempien kokemusten perusteella bentoniitin asennus määräsyyvyteen voi kestää noin 1,5 tuntia. Selvitys on tehty myös pinnoitteen suojaamisen kestosta varastoinnin ajan, jolloin bentoniittia ei tarvitsisi erikseen suojata pinnoituksen jälkeen. Teknologian tutkimuskeskus (VTT) on tehnyt testejä Posivan toimeksiannosta mahdollisilla eri pinnoitteilla. VTT suoritti testit avoimissa dekantterilaseissa hanaveden ja suolaisen pohjaveden kanssa, johon pinnoitetut bentoniitit upotettiin ja niiden reaktioaikaa seurattiin. (Sjöblom ym. 2016.)

Pinnoite	Hanavesi, reaktion alkamisaika	Suolainen pohjavesi, reaktion alkamisaika
1. Näyte	Välitön	Välitön
2. Näyte	1 h	40 min
3. Näyte	1.5 h	1 h
4. Näyte	10 min	10 min
5. Näyte	20 min	20 min
6. Näyte	5 min	5 min
7. Näyte	Välitön	Välitön

Taulukko 2. Bentoniittien pinnoitustestien tulokset (Sjöblom ym. 2016)

Pinnoitteille suoritettiin vielä itse käytännön testejä ja myös mahdollisia muita pinnoitteita testattiin. Muiden mahdollisten pinnoitteiden tulokset eivät kuitenkaan yltäneet haluttuun lopputulokseen. Pääsyyinä tähän oli pinnoitteen kuivumisen

aikana bentoniitin hengittäminen ja kutistuminen, jolloin pinnoite pääsi halkeilemaan ja rakoilemaan. Käytännön sulkemiseen sillä ei pitäisi olla vaikutusta, mutta mikäli pinnoite ei ole yhtenäinen, ei se tuo haluttua suojaa bentoniitin pinnalle.

Aikaisempiin kokemuksiin perustuen suunniteltiin tarvittavat lisätetit sopivan pinnoitteen valitsemiseksi. Käytännön pinnoitetetit pyrittiin suorittamaan mahdollisimman yksinkertaisesti. Testaamiseen käytettiin Plexiglas XT 80/74 -akryyliputkea, johon teetettiin yksinkertainen tulppa. Testivetenä käytettiin oikeaa kalliopohjavettä suljettavien reikien keskellä olevasta OL-KR30 80-84 metrin syvyydestä pumpattua — pohjavettä. Testikappaleet sahattiin lyhyemmiksi (noin 71 mm), jotta saatiin useampia testattavia kappaleita. Pääosin pinnoittaminen tapahtui siveltimellä, mutta myös upotusta testattiin. Näyte kuusi, jota myös aikaisemmissa sulkemisissa ollaan käytetty, ruiskutettiin näytteen pinnalle.



Kuva 8. Pinnoitetut bentoniitit testiputkessa (alkutilanne, 1h, 22h)

Testikappaleiden järjestys alhaalta ylös:

1. Vertailukappale (pinnoittamaton)

2. Näyte 6 (spray)
3. Näyte 3 (upotettu)
4. Näyte 8 (sivellin)
5. Näyte 3 (sivellin)
6. Näyte 2 (upotettu)
7. Näyte 2 + Näyte 3 (sivellin)
8. Näyte 3 (sivellin)

Pinnoitustesti myötäili VTT:n saamia tuloksia ja parhaat tulokset saatiin näyte kahdella, kolmella sekä näiden yhdistelmällä. Lopullinen päätös pinnoitteesta tullaan tekemään halutun lopputuloksen perusteella. Huomioon otettavat asiat ovat asennuksen kesto, muodon säilyminen murtosokan murtamista varten sekä pinnoitteen "pettäminen" asennuksien jälkeen, jotta bentoniitti pääsee turpoamaan ja tulppaamaan reiän. Alla on esitetty alustavat ajat bentoniitin muodon säilymiselle (Taulukko 3):

Bentoniitin pinnoite	Pientä läpipääsyä	läpipääsy	muoto säilynyt
Näyte 2	50 minuuttia	2h	5h
Näyte 3	1,5h	3h	<20h
Näyte 2 + Näyte 3	5h	20h	<48h

Taulukko 3. Alustavat ajat pinnoitusten kestävyydelle

Kun pinnoitemateriaali päätetään, kaippa se vielä lisätestejä tarkemmasta reaktioajasta ilman, että muiden pinnoitteiden läpipääsy edistävät tutkittavan pinnoitteen pettämistä. Muodon säilyminen pinnoitteilla kaksi, kolme ja niiden yhdistelmällä on hyvä sekä niiden elastisuus edesauttaa muodon säilymistä pidempään.

Pinnoitteen elastisuus auttaa myös varastoinnissa, jolloin bentoniittia ei välttämättä tarvitse erikseen suojata pinnoittamisen jälkeen. Varastointitesti suoritettiin Posiva Oy:n kenttälaboratoriossa pinnoittamalla testilieriöt ja seuraamalla niiden dimensioita sekä painoa. Työvälineinä toimivat silmämääräinen tarkistus, työntömitta sekä puntari. Varastointitestissä Näytteiden kaksi, kolme ja niiden yhdistelmällä bentoniitin muodonmuutos

kuukaudessa oli vähäinen ja pinnoitteen pinta pysyi eheänä (Taulukko 4. Bentoniitin varastointi), mikä viittaa näiden pinnoitteiden myös poistavan tarpeen bentoniitin lisäsuojaukselle varastoinnin aikana huomioiden että varastointi ja käsittely tapahtuu lämpimässä ja kuivassa tilassa.

Aika [d]:	25
Alkuperäinen tiheys [kg/dm ³]:	2,02

Pinnoite	Pituuden muutos [mm]	Halkaisijan muutos [mm]	Tiheyden muutos [kg/dm ³]
Vertaus	-1,52	-1,02	-0,02
Näyte 2	-0,28	-0,51	0,03
2 + 3	-0,13	-0,43	0,01
3	-0,49	-0,78	0,02

Taulukko 4. Bentoniitin varastointi

Reikien sulkemiseen käytettävänä materiaalina pinnoitemäärä ja sen turvallisuusmerkitys on vähäinen. Näyte kolme on myös TVO:lla TLTA-luvitettu. Alla (Taulukko 5) on esitetty arvio pinnoitemäärästä kevään 2022 kolmen syvän tutkimusreiän sulkemisessa. Kerrospaksuuksien esityksessä on hyödynnetty aikaisempia VTT:n tutkimuksia. (Sjöblom ym. 2016).

Tutkimusreikä	Bentoniitin Halkaisija (m)	Pituus (m)	A (m ²)	Kerrospaksuus (m)	V (m ³)	yksikkö
OL-KR4	0,06	70	14,32566	0,00008	0,0011460	
OL-KR7	0,06	35	7,16283	0,00008	0,0005730	
OL-KR32	0,06	8,75	1,79070	0,00008	0,0001432	
				summa	0,0018623	m ³
Tarvittava pinnoitemäärä kevään 2022 tutkimusreikien sulkemiseen					1,8623361	litraa

Taulukko 5. Arvio pinnoitemäärästä kevään 2022 syvien tutkimusreikien sulkemisissa

Mahdollisia pinnoitepaikkoja on selvitetty ja keskustelua on käyty Maalausliike Heino Oy:n kanssa. Maalausliike Heino Oy urakoi maalauksia ja on hyväksytty toimija Olkiluodossa. Mahdollisuutta pinnoituksen nopeuttamiseen ja helpottamiseen esimerkiksi korkeapaineruiskua käyttämällä on mietitty, mutta ajallisesti tällä ei saavutettaisi suurta hyötyä. Ruiskun käyttäminen vaatisi maalin ohentamista, sekoittamista, ruiskuun laittamista ja ruiskun pesua. (Heino 2021.)

5.3 Välikuparitulpat

Välikuparitulpan mallintamiseen käytettiin SolidWorksia ja AutoCadia. Mallintamiseen käytettiin apuna Posivan testaamaa (Hansen ym. 2017) ja SKB:n kuvaamaa välikuparitulppaa (Sänden ym. 2018) ja sen toimintaperiaatetta sekä Posiva Oy:n henkilöstön tietotaitoa. (Hiironen 2021). Hankinnalle luotiin myös laadunvarmistuksen tarkastuskortti.

6 Tutkimusreikien sulkemisen prosessin kuvaus

Syvien tutkimusreikien sulkemisessa käytettävien materiaalien asentaminen toteutetaan kairakoneen avulla hyödyntäen kairakoneen ajoputkia. Suurin osa tutkimusrei'istä on reikähalkaisijaltaan 76 millimetriä ja tarkoituksena on avartaa myös reikien loppuosuudet reikähalkaisijaltaan 56 millimetristä — 76 millimetriin. Tarkat mitat sulkemisessa käytettäville materiaaleille riippuvat kairausurakoitsijan käytössä olevista ajoputkista. Alustavat mitat käytettäville ajoputkille ovat pituudeltaan kolmelle metrille ja sisähalkaisijaltaan 60,3 millimetrille.

Sulkemisen prosessin kuvantamiseen on hyödynnetty Posivan ja SKB:n aikaisempia kokemuksia sulkemisista, sekä alustavia sulkemisen suunnitelmia keväällä 2022 suljettavista syvistä tutkimusrei'istä. Tutkimusreiän aiheuttama mahdollinen häiriö riippuu reiän sijainnista loppusijoitusalueella, yhteydestä toisiin reikiin ja Olkiluodon tutkimusalueen rakenteisiin. Käytännössä tämä edellyttää jokaiselle tutkimusreiälle oman sulkemissuunnitelman, jossa määritellään täyttömenetelmät ja materiaalien sijaintipaikat. Itse sulkemisen prosessi on kuitenkin yhtäläinen reikien osalta. (Hansen ym. 2017.)

Tutkimusreikien sulkemisen prosessi on ollut tutkimus- ja kehitystoimintaa, mutta jatkossa reiät suljetaan tuotantoprosessina, jolloin prosessin käytännöt saattavat muuttua suunnittelun sekä käytännön sulkemisen aikana.

6.1 Tutkimusreikien sulkemisen tavoitteet

Sulkemisen päätavoitteena on rajoittaa pohjaveden virtausta tutkimusreikien suuntaisesti maanpinnan ja loppusijoitusyvyyden välillä ja edesauttaa stabiilien olosuhteiden muodostumista ja pysymistä pitkällä aikavälillä. Päämenetelmänä tavoitteen saavuttamisessa on erilaisten vettäjohtavien vyöhykkeiden erottaminen toisistaan. Syvien tutkimusreikien sulkemisen vaatimukset on kirjattu Posivan vaatimustenhallintajärjestelmään (VAHA) ja vaatimukset on jaettu toimintakykytavoitteisiin, suunnitteluvaatimuksiin ja spesifikaatioihin.

6.2 Tutkimusreikien sulkemisen vaiheet

- Syvän tutkimusreiän sulkemisen suunnittelu
- Tutkimusreikien sulkemisen materiaalin hankinta ja valmistus
- Tutkimusreikien sulkemisen valmistelevat työt työmaalla
- Mahdolliset täydentävät tutkimukset
- Tutkimusreiän sulkeminen
- Tutkimusreiän sulkemisen vaatimustenmukaisuuden osoittaminen

Syvän tutkimusreiän toteutuksen esivalmistelut:

1. Reiässä mahdollisesti kiinni olevat tutkimuslaitteet poistetaan.
2. Reikä avarretaan tarvittaessa kairakoneella 56 mm → 76 mm halkaisijaan.
3. Reikä mitataan ja kuvataan tarvittaessa.
4. Reikä huuhdellaan ONKALO:ssa yleisesti käytetyllä merkatulla vedellä ennen sulkemisen aloitusta (natriumfluoresiinilla merkattu vesi).
5. Juuttumisriskin aiheuttavat vyöhykkeet stabiloidaan.

Varsinainen reiän sulkeminen sisältää neljä eri osa-alueita. Näihin kuitenkin liittyy myös muita toimenpiteitä kuten työvaiheiden ja materiaalin dokumentoinnit ja varmistukset työmaalla. Alla on eritelty reiän sulkemisen osa-alueet, joiden mukaan työ etenee. Kun etenemisen vaiheesta yksi on siirrytty vaiheeseen neljä aloitetaan työvaiheet alusta, kunnes koko reikä on suljettu.

Sulkemisen osa-alueet:

1. Betonointi
2. Kovettuminen
3. Aukikairaus
4. Betonointi/ bentoniitin asennus

Betonointi

Kun valmistelevat työt on tehty, voidaan betonointi aloittaa. Ensimmäisen ajopotken päähän asennetaan välikuparitulpan mallista katkaistu yläosa murtosokkineen. Betonimassasta työmaalla mitataan lämpötila ($+10^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Bet}} \leq +30^{\circ}\text{C}$), tarkistetaan sen leviämä $>500\text{mm}$ sekä suoritetaan massan silmämääräinen tarkistus.

Tämän jälkeen matalan pH:n betonia pumpataan letkulla ajopotkiin 6 metriä kerrallaan (kaksi ajopotken mittaa). Määrällisesti betonin määrä asennuksessa vaihtelee suljettavan reiän geologiasta. Murtosokkien määrään pystytään vaikuttamaan ja niitä voidaan asettaa kuparitulppaan kahdesta kuuteen kappaletta. Tällä voidaan hallinnoida sokkien kestävyuden kapasiteettia ja asennuksessa kerralla käytettävän betonin määrää. Myös jokaisen betonoinnin määrät dokumentoidaan.

Kun ajopotkiin on pumpattu betonia haluttu määrä, lisätään putken päähän elastomeerinen pesupallo ja putkiletka lasketaan reiän pohjalle. Pohjakosketuksessa murtosokat murretaan ja putkiletka täytetään ONKALON alueella käytetyllä merkityllä vedellä. Veden paineen nostamisella pesupalloa vasten ja putkiletkaa nostamalla varmistutaan betonin jäämisestä reikään asennussyvyYTEEN.

Kovettuminen

Betonin annetaan kovettua vähintään kahden mielellään 4 vuorokauden ajan. Asennetun betonin pinnalla massan lujuudenkehitys voi häiriintyä veden sekoituessa betonimassaan.

Aukikairaus

Aukikairaus on osittain laadunvalvontatoimenpide ja osittain sulkemisen todentamista. Asennettu betoni aukikairataan 6 metrin matkalta tai kunnes vastassa on koko näytteen halkaisijalta lujittunut betoni. Elastomeerinen pesupallo poistuu reiästä aukikairaamisen yhteydessä eikä se jää reikään. Kuvat

aukikairatusta betonista dokumentoidaan, todennetaan asennussyvyudet sekä betonin laatu.

Betonointi/ Bentoniitin asennus

Kairakoneen ajoputkilla varmistetaan kovettuneen betonin syvyydestä. Rakennepiirustuksien mukaan jatketaan reiän sulkemista joko betonoinnilla tai bentoniitin asentamisella.

Bentoniitin asentamiseen käytetään kolmea ajoputkea, joiden yhteismitta on yhdeksän metriä. Ajoputkeen asennetaan välikuparitulppa ja valmiiksi dokumentoidut ja pinnoitetut bentoniittilieriöt.

Tällä menetelmällä bentoniittilieriöiden ollessa pituudeltaan noin 35 senttimetriä mahtuu niitä asennuksessa käytettävään ajoputkeen 25 kappaletta. Näin bentoniittitulpan pituudeksi tulee kahdeksan metriä ja 75 senttiä.

7 Lopputulokset ja pohdinta

Posiva Oy tutkii ja kehittää toimintaansa jatkuvasti ja opinnäytteen tutkimusosion päätavoitteena oli viedä syvien tutkimusreikien prosessia ja siihen liittyviä valmisteluita kohti valmiimpaa toimintamallia selvittäen sulkemiseen käytettävien materiaalien hankintaa.

7.1 Tulokset

Sulkemisen vaatimukset ja siihen liittyvän selvitystyön määrä selvisi työn aikana. Kuitenkin aikaisemmin tehdyt laadukkaat tutkimukset antoivat hyvät eväät uusien toimintamallien luomiselle. Opinnäytetyössä selkiytetään sulkemisen prosessia sekä luotiin valmiita toimintamalleja kevään 2022 syvien tutkimusreikien sulkemisiin. Opinnäytteen, aikaisempien tutkimusten ja luotujen alustavien sulkemissuunnitelmien perusteella kolmen syvän tutkimusreiän sulkemisen onnistuminen on todennäköistä.

Selvitystyön ohella ilmeni lisätutkimusaiheita, joiden selvitys on tarpeellista ennen kevään sulkemisia sekä tarve toimintaa kehittäville tutkimuksille.

7.1.1 Bentoniitti

Paras hankintatapa bentoniitille kevään sulkemisiin on bentoniitin poraaminen valmiiksi puristetuista lohkoista. Poraamiseen tarvitaan kaksi henkilöä, työtila, työvälineet ja vähintään 8 lohkoa. Bentoniittilohkojen syvyyden ollessa 35 senttimetriä tarvittavien lieriöiden määrä on 325 kappaletta. Tähän määrään on hyvä lisätä myös muutamat varakappaleet, sekä lieriöt vesipitoisuuden ja puristuslujuuden määrittämistä varten. Arviolta bentoniittilieriöiden valmistamiseen kuluu noin kuusi työvuoroa. Poraamisen jälkeen bentoniittikappaleet pakataan, suojataan ja toimitetaan varastoon odottamaan sulkemista.

Jokaisesta bentoniittikappaleesta on tarpeellista mitata dimensiot, paino ja laskea niiden tiheys. Lieriöiden valmistamista voidaan tehostaa 1) Mittaamalla dimensiot

ja paino poraamisen yhteydessä. 2) Pinnoittamalla bentoniitit poraamisen yhteydessä, jolloin niitä ei tarvitse erikseen suojata.

Bentoniittikappaleet pinnoitetaan alustavasti näytteellä kaksi tai kolme. Tutkimusten perusteella niiden suojaamiskyky on osoittautunut parhaaksi ja yhden kerran pinnoitetut kappaleet kestivät veden vaikutusta ja varastointia hyvin. Pinnoitus voidaan suorittaa Rauman hallilla. Pinnoitus tapahtuu siveltimellä, jotta voidaan varmistua ehyestä pinnasta.

Alustavien tulosten perusteella pinnoitteet luovat bentoniitille tarpeeksi hengittämättömän suojan, eikä sitä tarvitse erikseen suojata pinnoituksen jälkeen. Huomioon on kuitenkin otettava, että bentoniittikappaleet täytyy säilyttää kuivassa ja lämpimässä varastossa. Tämän jälkeen bentoniittikappaleet jäävät odottamaan syvien tutkimusreikien sulkemisten aloittamista.

Bentoniitti lieriöille luotiin myös laadunvarmistuksen tarkastuskortti hankinnalle sekä ohjeet poraamiselle valmiiksi puristetuista lohkoista.

7.1.2 Välikuparitulppa

Välikuparitulpille luotiin malli alustavien tietojen ja aikaisempien mallien perusteella. Kevään 2022 tutkimusreikien sulkemiseen tarvitaan:

- 26 kappaletta välikuparitulppia
- 13 kappaletta kuparisia ylämäntiä
- vähintään 3 kappaletta katkaistuja kuparitulppia betonointiin

Kuparitulpat sorvataan ja hankinnalle on valmisteltu laadunvarmistuslomake. Välikuparitulpille kuvattiin myös niiden toimintaperiaate.

7.1.3 Matalan pH:n betonin hankinta

Matalan pH:n betonille selvitystyö liittyi betonin tilaamiseen kuivana säkkitavarana tai sen valmistukseen muilla menetelmillä kustannustehokkuus ja

hiilijalanjälki huomioon ottaen. Aikaisempia selvityksiä Posivan betonireseptin tilaamisesta kuivatavarana ei olla tehty. Ajallisista syistä selvitystyö jäi suppeaksi, mutta alustavien tietojen mukaan reseptissä oleva silika -materiaali ei sekoitu massaan homogeenisesti pienen määrän sekoittamisessa. (Liimatainen 2021).

Kokemusten perusteella betonia käytetään yhdessä betonoinnissa 100 — 500 litraa, mutta koska hukkabetonia jää letkuihin, on sitä hyvä olla varalla vähintään 1m³. Kevään 2022 tutkimusreikien sulkemisiin olisi järkevä käyttää jo valmiiksi hyväksi todettua menetelmää ja tilata betoni valmiiksi sekoitettuna. Posivan omaa työkuormaa vähentäisi tällöin myös valmiiksi luodut laadunvalvontatellit ja dokumentit, jotka saadaan betonitoimittajalta valmiin tuotteen mukana.

7.2 Pohdinta

7.2.1 Ajatuksia tutkimusreikien sulkemisesta

Syvien tutkimusreikien sulkemisen konsepti on jo melkein valmis ja vaikka optimointia ja toimintatapoja varmasti kehitetään eteenpäin, mikä tulee tapahtumaan vuosien varrella kun tutkimusreikiä suljetaan loppusijoituslaitoksen käyttöönoton ja käytön aikana, tulevat materiaalit ja toimintatavat pysymään saman kaltaisina. Syvien tutkimusreikien rooli osana käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitushanketta on kaksivaiheinen, reikiä tarvitaan paikan karakterisointia varten, ja toisaalta reikien sulkeminen on tärkeää pitkäaikaisturvallisuuden näkökulmasta. Tutkimusreikien sulkemisessa käytetään vastaavia materiaaleja kuin loppusijoitustilojen käytön ja sulkemisen yhteydessä, kuten bentoniittia ja erikoisbetonia. Tästä syystä löytyy myös tutkimusreikien sulkemiseen laajalti aineistoja, tutkimuksia ja selvityksiä, joiden avulla voidaan osoittaa tutkimusreikien sulkemisen olevan pitkäaikaisturvallista. Syvien tutkimusreikien kautta olen päässyt perehtymään Posiva Oy:n toimintatapoihin ja menettelyihin, joiden avulla varmistetaan loppusijoituksen turvallisuutta. Näistä esimerkkinä ovat TLTA-käytännöt (turvallisuusluokiteltujen tarveaineiden käyttö), laadunvarmistukseen

liittyvät menettelyt käytännön töiden eri vaiheissa, loppusijoituspaikan karakterisointi ja monitorointi syvien tutkimusreikien kautta. Lisäksi olen saanut kehittää taitojani tiedonhaussa ja työskennellä kattavasti MS Officeen ohjelmistoilla, yhteisissä sharepoint työtiloissa ja osana projektiryhmää.

7.2.2 Opinnäytetyön onnistuminen

Vaikka opinnäytteen aikataulu oli varsin tiukka ja oman aikansa vei yksittäisten toimenpiteiden ja kokonaisuuden hahmottaminen koen opinnäytteen onnistuneen hyvin. Valmiiksi luotujen toimintamallien ja opinnäytteen pohjalta on hyvät lähtökohdat edetä kohti entistä optimoidumpaa tutkimusreikien sulkemisen mallia.

Lähteet

Aaltonen I., Kosunen, P., Mattila, J., Engström, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Front, K., Gehör, S., Kärki, A. 2016. Geology of Olkiluoto. Posiva-report 2016-16. ISBN 978-951-652-244-2

GTK. Monikäyttöiset bentoniittimateriaalit kiinnostavat tutkijoita. Artikkel. julkaistu 18.10.2021 Viitattu 7.12.2021. Saatavilla:

<https://www.gtk.fi/ajankohtaista/monikayttoiset-bentoniittimateriaalit-kiinnostavat-tutkijoita/>

Hansen, J., Liimatainen, J., Kemppainen, K. 2017 Muistio OL-KR21 ja OL-KR5 reikien sulkemisen toteutus. Sisäinen muistio POS-024379. Posiva, Eurajoki, Finland.

Hansen, J., Savunen, J. 2021. Kolmen syvän tutkimusreiän sulkemissuunnitelma 2021. Muistio. Posiva, Eurajoki, Finland Viitattu 1.12.2021

Hartley, L., Appleyard, P., Baxter, S., Hoek, J., Joyce, S., Mosley, K., Williams, T., Fox, A., Cottrell, M., Pointe, P., Gehör, S., Darcel, C., Goc, R., Aaltonen, I., Vanhanarkaus, O., Löfman, J., Poteri, A. 2018. Discrete Fracture Network Modelling (Version 3) in support of Olkiluoto Site Description 2018. Working Report 2017-32. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D., Simpson, T. Hydrogeological Modelling for Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012. Working report 2012-42. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Heino, J. 2021. Puhelinkeskustelu 1.11.2021., 30.11.2021.

Hiironen, A. 2021. Suullinen tiedonanto. 22.11.2021., 14.12.2021.

Holt, E. & Koho, P. 2016 DOPAS Deliverable #D4.5 POPLU experimental summary report. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Holt, E., Peura, J. 2011. Buffer Component Manufacturing by Uniaxial Compression Method - Small Scale. Working report 2011-42. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Jefferies, N.L., Joyce, S., Tsitsopoulos, V., Alexander, R., Börgesson, L., Karnland, O., Sanden, T., Gaus, I., Vomvoris, S., Metcalfe, R., Groff, F., Marsden, R. 2016. Sealing Site Investigation Boreholes: Phase 2. Annual Report for 2014/2015. RWM/03/046.

Junnila, J. Posiva. Mallinnuksen rakennekuvia hydrogeologisista vyöhykkeistä suhteessa suljettaviin tutkimusreikiin. Jaetut tiedostot. 29.11.2021.

Karvonen, T. 2012 Closure of the Investigation Boreholes. Working Report 2012-63. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Kumpulainen, S., Karttunen, P. 2017. OL-KR5 kairareistä aukikairatun bentoniittitulpan vedenjohtavuuden määrittäminen. Technical Memo. Saanio & Riekkola Oy.

Laakso, J., Junnila, J., Tapiola, I., Vaittinen, T., Hurmerinta, E., Nummela, J., Pentti, E., Tammisto, E., Turku, J., Karvonen, T. 2021 Results of monitoring at Olkiluoto in 2020, hydrology and hydrogeology 2021. Working report 2021-43. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Liimatainen, J. 2021. Suullinen tiedonanto. 14.12.2021.

Posiva 2021. Posiva Oy:n kuvapankki. Saatavilla
<https://www.posiva.fi/media/materiaalipankki.html>

Posiva. (Posiva 2021a). Viitattu 26.11.2021. Saatavilla <http://www.posiva.fi/posiva>

Posiva. (2021b) Viitattu 29.11.2021. Saatavilla
<http://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/pitkaaikaisturvallisuus.html>

Posiva. (2021c) Viitattu 29.11.2021. Saatavilla <http://www.posivasolutions.com>

Posiva. (2021d) Viitattu 3.12.2021. Saatavilla
<https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/tutkimus-jaloppusijoitustilatonkalossa.html>

Posiva. (Posiva 2021e) Safety Case for the Operating Licence Application - Future Human Actions. Working Report 2021-02. Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

Posiva. (Posiva 2012f) Olkiluoto Site Description 2011. Posiva Report 2011-02. Posiva Oy, Eurajoki, Finland. ISBN 978-951-652-179-7.

Posiva. (Posiva 2021g). Posivan vaatimusten hallintajärjestelmä. Viitattu 13.12.2021. POS-014540. Posiva, Eurajoki, Finland.

Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L., Hagman, P., Nilsson, G. Sealing of investigation boreholes. 2018. Technical Report TR-18-18. SKB.

Sivula, V. (2014). Työohjeiden laatiminen geotekniseen laboratorioon. Opinnäytetyö, Vaasan Ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBD:fi:amk-201405158001>

Sjöblom, V., Leivo, M., Holt, E., Iitti, H., Metsäjoki, J., Koukkari, H., Suhonen, T., Mahlberg, R. 2016. Material Options for Borehole Sealing. Customer report. VTT.

Säteilyturvakeskus. (STUK 2018). Ohje yvl d.5. Ohje yvl d.7. Saatavilla:
<https://www.stuklex.fi/ohje/yvld-5>. <https://www.stuklex.fi/ohje/yvld-7>.

Teollisuuden Voima Oyj. (TVO-konserni 2021a). Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/vastuullisuus/ymparistovastuu/ymparistovaikutustenhallinta/ydinjatehuolto.html>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (TEM 2012). Valtioneuvoston päätös Posiva Oy:n hakemukseen saada ydinenergialain 18 §:ssä tarkoitettu lupa rakentaa kapselointi- ja loppusijoituslaitos Eurajoen Olkiluotoon. Saatavilla: <https://tem.fi/haku?q=kapselointi-%20ja%20loppusijoituslaitos>

Valtioneuvosto. 2002. Periaatepäätökset Posiva Oy:n laitoksesta. Saatavilla: <https://tem.fi/posivan-periaatepaatosprosessi>.