



**ESISELVITYS KORKEA-AKTIIVISEN
YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN
MAHDOLLISISTA TULEVAISUUKSISTA
(SAFER2028)**

Ira Ahokas, Hanna Lakkala & Jarmo Vehmas

KIRJOITTAJAT

Ira Ahokas

FM, tutkimuspäällikkö

Hanna Lakkala

FM, kehityspäällikkö

Jarmo Vehmas

HTT, ins., dosentti, aluepäällikkö

Copyright: Kirjoittajat & Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto

Kansikuvassa Onkalon demotunneli, copyright: Posiva Oy

ISBN 978-952-249-626-3 • ISSN 1797-1322



Tulevaisuuden tutkimuskeskus

Turun yliopisto • Turun kauppakorkeakoulu
20014 Turun yliopisto

Rehtorinpellonkatu 3, 20500 TURKU
Korkeavuorenkatu 25 A 2, 00130 HELSINKI
Hämeenkatu 15 B 11, 33200 TAMPERE

tutu-info@utu.fi

utu.fi/tutu

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	4
2. MENETELMÄT	5
3. TULOKSET	7
3.1 Loppusijoitusluolaston moniesteperiaatteeseen liittyviä tekijöitä	8
3.1.1 Passiivinen turvallisuus	8
3.1.2 Ydinjätteen kapselimateriaali ja korroosio	8
3.2 Luolaston turvallisuuteen vaikuttavia riskejä ja shokkeja	10
3.2.1 Geologinen soveltuvuus, peruskallion vakaus ja seisminen aktiivisuus	10
3.2.2 Ihmisen aiheuttamat geologiset muutokset	11
3.2.3 Jääkauden ja ikiroudan vaikutukset loppusijoituslaitoksen syvyyteen	11
3.2.4 Pohjaveden liike	12
3.2.5 Ilmastonmuutos	13
3.2.6 Mikrobiologia	14
3.2.7 Sodat ja terrorismi	14
3.3 Yhteiskunnallinen perspektiivi turvallisuuteen ja oikeudenmukaisuuteen.....	15
3.3.1 Yhteiskunnalliset ja ympäristövaikutukset, mukaan lukien sosiaalinen hyväksyttävyys	15
3.3.2 Viestintä sukupolvien välillä	15
3.3.3 Palautettavuus ja seuranta	16
3.3.4 Rahoitus ja saastuttaja maksaa -periaate	17
3.3.5 Ydinenergialain kokonaisuudistus	17
3.3.6 Sukupolvien välinen oikeudenmukaisuus.....	17
3.4 Tutkimukseen ja arviointiin liittyvät epävarmuudet.....	18
3.4.1 Mallintamiseen liittyvä epävarmuus.....	18
3.4.2 Systeemisyyden puute	18
3.4.3 Ennakointimenetelmien kehittämisen tarve.....	18
4. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	19
4.1 Mitä on aiemmin tutkittu ja mitä ei ole tutkittu	19
4.2 Millaisten epävarmuuksien kanssa ollaan tekemisissä	20
KIRJALLISUUS.....	21

1. JOHDANTO

Suomi on toistaiseksi ainoa maa maailmassa, joka on tehnyt poliittisen päätöksen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta ja edennyt sen toimeenpanossa käytännön toimiin saakka. Ydinvoimayhtiöt Teollisuuden Voima ja Fortum perustivat vuonna 1995 käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten Posiva Oy:n. Eduskunta hyväksyi Eurajoen Olkiluodon kallioperään louhittavaa Posiva Oy:n loppusijoituslaitosta koskevan valtioneuvoston periaatepäätöksen vuonna 2000. Samalla alueella sijaitsevat Teollisuuden Voima Oy:n ydinvoimalaitokset. Ydinenergialain mukainen periaatepäätös tarkoittaa, että valtioneuvosto ja eduskunta arvioivat Posiva Oy:n hankkeen yhteiskunnan kokonaisedun mukaiseksi. Posiva Oy jätti Onkalon käyttölupahakemuksen vuonna 2021. Loppusijoitus aloitetaan käyttöluvan myöntämisen jälkeen ja se tulee jatkumaan nykyisillä suunnitelmilla vaiheittain 2120-luvulle.

Käsillä olevan korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen mahdollisia tulevaisuuksia tarkastelevan esiselvityksen tavoitteena on tuottaa tulevaisuustietoa eri aikaperspektiiveillä korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen liittyen. Selvitys käsittelee Suomessa valittuun loppusijoitusratkaisuun vaikuttavia mahdollisia kehityskulkuja 100 vuoden, 1 000 vuoden ja 1 000 000 vuoden aikaperspektiiveillä huomioiden erilaiset nousevat ilmiöt, shokit, epäjatkuvuudet ja epävarmuudet.

Selvitys vastaa seuraaviin kysymyksiin:

- Millaisten epävarmuuksien kanssa ollaan tekemisissä?
- Mitä asioita on aikaisemmin huomioitu loppusijoituksessa?
- Mitä asioita ei ole huomioitu?
- Mikä on merkityksellistä?

Esiselvitys on kansallisen ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon SAFER2028-tutkimusohjelman johtoryhmän tilaama. Se on toteutettu Turun yliopiston Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa 1.10.2024–31.3.2025 välisenä aikana.

SAFER2028 (National Nuclear Safety and Waste Management Research Programme 2023–2028) on kuu-sivuotinen ydinenergia- ja ydinjätehuoltoalan tutkimusta rahoittava tutkimusohjelma, joka saa rahoituksensa Valtion ydinjätehuoltorahastosta (VYR) sekä ohjelmaan osallistuvilta tutkimusorganisaatioilta. SAFER2028 tukee ydinenergian turvallista käyttöä Suomessa.

2. MENETELMÄT

Työ taustoitettiin kirjallisuuskatsauksella, jonka tarkoituksena oli laatia taustadokumentti haastateltaville asiantuntijoille siitä, millaisia muuttujia ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvässä tutkimuksessa on jo huomioitu. Kirjallisuuskatsauksessa läpi käytyt raportit ja artikkelit on esitetty raportin lopussa kappaleessa *Kirjallisuus*.

Esiselvityksessä haastateltiin eri alojen asiantuntijoita, jotka oman tieteenalansa näkökulmasta tunnistivat mahdollisia riskejä, epäjatkuvuuksia ja shokkeja, joilla voisi olla vaikutusta korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuuteen eri aikaperspektiiveillä. Esiselvityksen tarkoituksena oli laajentaa perspektiiviä ja tunnistaa, mille oletuksille nykyiset laskelmat perustuvat, sekä tunnistaa epävarmuuksia ja löytää mahdollisia uusia muuttujia, joita voidaan hyödyntää määrällisissä malleissa.

Asiantuntijoita pyydettiin haastatteluissa pohtimaan oman tieteenalansa näkökulmasta historiaa ja tulevaisuutta 100, 1000, 100 000 ja miljoonan vuoden aikaperspektiiveillä, ja miettimään millaisia muuttujia voidaan tunnistaa, joilla voisi mahdollisesti olla merkitystä ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvissä ratkaisuihin nyt ja tulevaisuuden yhteiskunnat huomioiden. Eri aikaperspektiiveihin orientoitumisessa hyödynnettiin Drottz-Sjöbergin (2010) laatimaa taulukkoa loppusijoituksen aikajännteistä (ks. Taulukko 1). Sen mukaan lyhyen aikajännteiden tarkastelu ulottuu loppusijoituslaitoksen sulkemisesta seuraavaan tuhanteen vuoteen, jolloin yhteiskunnan voidaan ennakoita olevan jokseenkin saman kaltainen kuin nykyään. Pitkällä aikaperspektiivillä tullaan kokemaan seuraavan 100 000 vuoden aikajännteellä seuraava jääkausi, ja tuon ajan yhteiskunta on tuntematon. Miljoonan vuoden aikajännteellä tullaan kokemaan useita jääkausia, ja ihmislajin olemassaolo on tuntematon. Tausta-aineistona asiantuntijoille lähetettiin kirjallisuuskatsauksen perusteella tehty tiivistelmä siitä, millaisia asioita tähän mennessä on huomioitu loppusijoitukseen liittyvässä tutkimuksessa.

Taulukko 1. Merkittävät ajanjaksot, aikajännteet ja esimerkki viranomaisen turvallisuusperusteiden oletuksista, joilla ydinjätteen loppusijoitusta tarkastellaan. Mukailten artikkelista Drottz-Sjöberg, 2010.

Merkittävä ajanjakso	Aikajänne	Esimerkkejä viranomaisen turvallisuusperusteista
Ennakoitavissa oleva ajanjakso loppusijoituslaitoksen sulkemisen jälkeen	100–1000 vuotta	Oletus, että yhteiskunta toimii jokseenkin kuin nykyään
Pitkät aikaperspektiivit	100 000 vuotta	Jääkauden vaikutukset, yhteiskunta tuntematon
	1 000 000 vuotta	Mahdollisesti useita jääkausia, yhteiskunta tuntematon, ihmislajin olemassaolo tuntematon.

Haastattelut koostuivat 11 puolistrukturoidusta asiantuntijahaastattelusta. Näkökulmina haastatteluissa olivat:

- Geologia
- Energianäkökulma, kansalaisyhteiskunta (yhteiskuntatieteet)
- Historia, yhteiskunnallinen muisti
- Kuparikapselin korroosio (kaksi haastateltavaa)
- Meret ja ilmastomuutos
- Mikrobiologia
- Pohjavedet
- Tieteisfiktio (yhteiskuntatieteellinen näkökulma)
- Viranomaisnäkökulma
- Yritysnäkökulma

Haastateltavien valinnassa pyrittiin siihen, että haastateltavien asiantuntijuus kattaa mahdollisimman laajasti sekä luonnontieteellisiä näkökulmia että yhteiskunta- ja ihmistieteen näkökulmia. Lisäksi huolehdittiin siitä, että haastateltavat edustivat eri intressiryhmiä: tutkimusta, viranomaisnäkökulmaa, yritys­näkökulmaa sekä kansalaisyhteiskuntaa.

Haastattelut toteutettiin haastateltavan toiveen mukaan joko etä- tai lähihaastatteluna. Haastattelut olivat keskimäärin 60 minuutin pituisia.

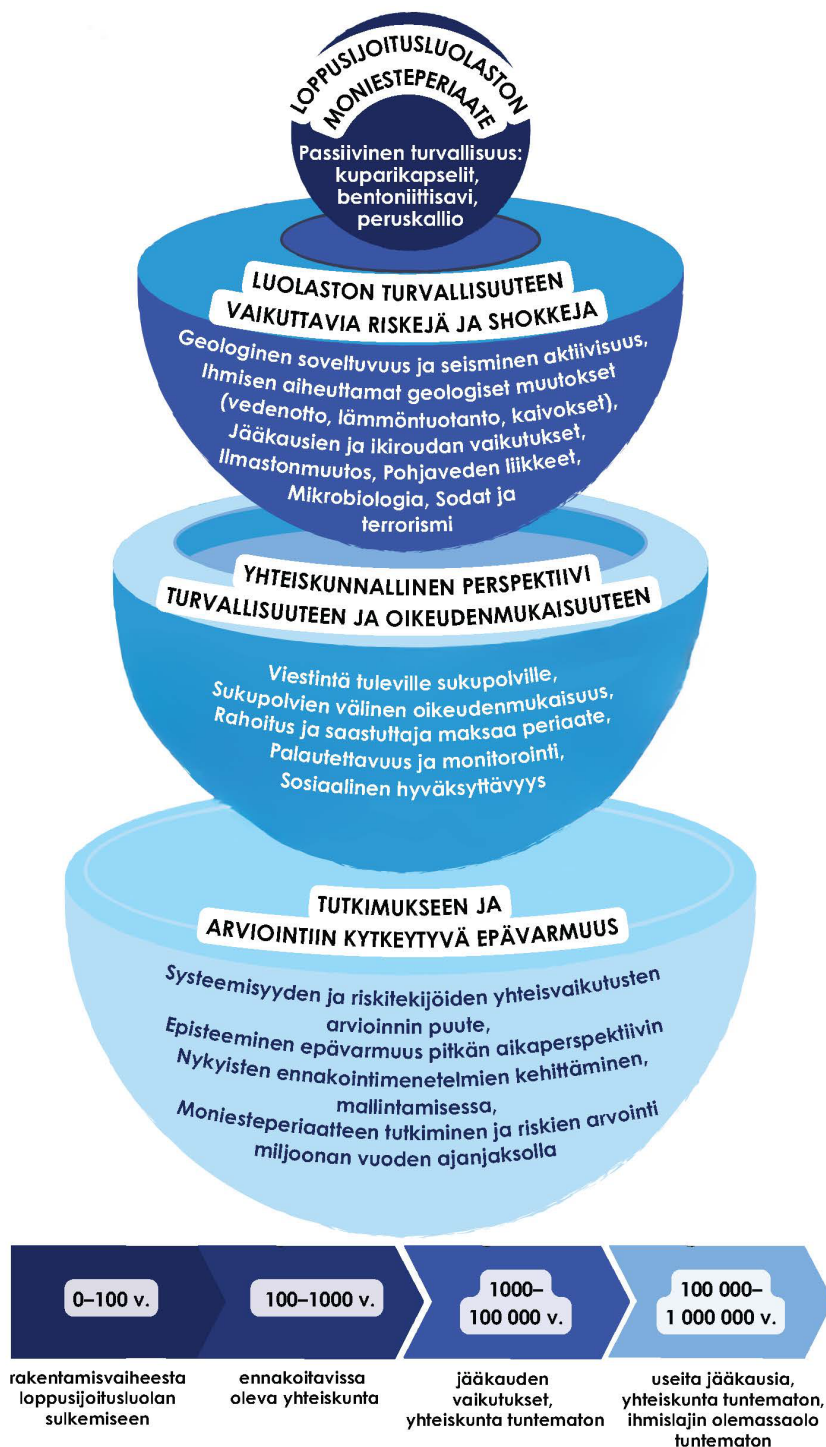
Pääsääntöisesti haastateltavalta kysyttiin alla olevia kysymyksiä:

- Mikä on oma asiantuntijuutesi ja mihin luonnonolosuhteisiin tai yhteiskunnallisiin muutoksiin se linkittyy?
- Millaisia muuttujia, kehityskulkuja tai muita merkityksellisiä näkökulmia voidaan tunnistaa esim. 100, 1000, 100 000 tai miljoonan vuoden aikaperspektiivillä, joilla voi olla merkitystä loppusijoitukseen? Mitä epävarmuuksia, shokkeja ja epäjatkuvuuksia näihin liittyy?
- Millaisten epävarmuuksien kanssa ollaan tekemisissä? Mitä asioita on aikaisemmin huomioitu loppusijoituksessa? Mitä asioita ei ole huomioitu?

Lisäksi haastateltavien kohdalla kysyttiin kohdennettuja kysymyksiä asiantuntijuuden osa-alueeseen liittyen, eri aikaperspektiiveistä tarkasteltuna. Haastatteluissa hyödynnettiin niin sanottua diskursiivista mallia (Trinczek 2009), jossa haastateltavan asiantuntijuutta kunnioittaen haastattelija kuuntelee tarkasti asiantuntijan vastauksia haastattelun aikana, ja siten määrittää tarkemmat lisäkysymykset. Haastattelut käsiteltiin anonyymeinä siten, että mahdollisuus tunnistaa tuloksista haastateltavaa olisi minimaalinen.

3. TULOKSET

Kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijahaastatteluiden perusteella tunnistettiin erilaisia turvallisuusperusteisiin sekä muihin korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen liittyviä näkökulmia, ja niihin liittyviä epävarmuuksia, riskejä ja shokkeja, ks. Kuvio 1. Teknisten ja luonnontieteellisten näkökulmien lisäksi tulokset sisältävät yhteiskunta- ja ihmistieteellisiä perspektiivejä. Tulokset esitetään tarkemmin kappaleissa 3.1–3.4.



Kuvio 1. Esiselvityksen tulokset korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvistä epävarmuuksista, riskeistä ja shokeista.

3.1 Loppusijoitusluolaston moniesteperiaatteeseen liittyviä tekijöitä

3.1.1 Passiivinen turvallisuus

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden on perustuttava toisiaan täydentävien luonnollisten ja teknisten vapautumisesteiden aikaansaamiin pitkäaikaisturvallisuuden turvallisuustoimintoihin siten, että yhden tai useamman pitkäaikaisturvallisuuden turvallisuustoiminnon heikentyminen tai ennakoitavissa oleva kallioperässä tapahtuva tai ilmastollinen muutos ei vaaranna pitkäaikaisturvallisuutta (STUK, 2018).

Asiantuntijahaastattelut:

Suomessa korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitusluolaston teknisessä ratkaisussa sisimpänä suojakerroksena käytettyä ydinpolttoainetta suojaa raudasta tehty kuparivaippainen loppusijoituskapseli. Kapselit eristetään bentoniittisavella, joka muodostaa toisen suojakerroksen. Kolmantena ja uloimpana suojakerroksena toimii peruskallio. Asiantuntijan mukaan loppusijoituksessa turvallisuus perustuu näiden erilaisten vapautumisesteiden toisiaan täydentävyyteen. Vaikka yksittäinen vapautumiseste heikentyisi toimintakyvyltään, järjestelmän muut osat kompensoivat sitä, jolloin turvallisuus säilyy.

3.1.2 Ydinjätteen kapselimateriaali ja korroosio

Kupari on yleisesti valittu kapselimateriaali sen korroosionkestävyyden vuoksi hapettomissa oloissa. KBS-3-loppusijoituskonseptissa käytetään monikerroksista kupari-rauta-kapselia, jota ympäröi bentoniittisavi liäsuoja. Pitkäaikainen kuparin kestävyys on kuitenkin kiistanalainen (Vehmas et al., 2023; Swahn, 2023).

Korroosioon vaikuttaa myös lämmöntuotanto. Kapselien sisältämä käytetty ydinpolttoaine tuottaa radioaktiivisen hajoamisen aiheuttamaa jälkilämpöä. Lämpötila kapseleita ympäröivässä bentoniitissa ja kallioperässä nousee, kun syntyvä jälkilämpö leviää johtumalla ympäröivään kallioon. Kapseli-puskuri-rajapinnan lämpötila on suurimmillaan (noin +95 °C) noin 20 vuotta loppusijoituksen aloittamisen jälkeen. Loppusijoitustilan kallio- ja täyteaineiden maksimilämpötila, noin +65 °C, saavutetaan vajaassa vuosisadassa (Posiva Oy, 2021). Saksassa jätteen luokittelu perustuu ydinjätekapseleiden huomattavaan lämmöntuotantoon radioaktiivisen hajoamisen aikana. Tämä vaikuttaa loppusijoitustilan kokoon, suunnitteluun ja jäähdytysvaatimuksiin (Di Nucci & Brunnengräber, 2023).

Asiantuntijahaastattelut:

Korroosiotutkijat nostivat esille seuraavat kolme keskeistä teemaa:

1. Kuparikorroosioon liittyvät tekijät

Uusilla edistyneillä menetelmillä tehtyjen tutkimusten mukaan kupari korrodoituu lämmön vaikutuksesta erityisen nopeasti pohjaveden päästyä kosketuksiin sen kanssa. Uutta lähestymistavoista tekee osittain uusi teknologia, jota ei ole aiemmin käytetty tässä yhteydessä, ja osittain se, että tutkimukset on tehty synteettisen pohjaveden kanssa sekä huoneenlämmössä että 60 asteen lämpötilassa. Tulokset osoittavat, että huoneenlämmössä (jossa aiempaa tutkimusta on tehty) pohjaveden komponentit, jotka sisältävät happea, rikkiä, vetyä ja muita aineita, eivät tunkeudu kupariin, vaan muodostavat ainoastaan vaarattomia pintareaktioita. Sen sijaan 60 asteen lämpötilassa ne tunkeutuvat jo muutaman kuukauden altistumisen jälkeen merkittävässä määrin kupariin, jopa useiden satojen mikrometrien syvyyteen. Jo muutaman kuukau-

den kuluttua kuparimateriaalissa tapahtuu dramaattisia muutoksia. Mekanismi, joka selittää kuparikorroosion 60 asteen lämpötilassa on, että happi pääsee raerajojen kautta kupariin. Silloin raerajoihin muodostuu pieniä nanometrin kokoisia oksideja, ja tämä murtaa raerajoja hieman, jolloin rikki pääsee sisään (Zhang et al., 2021 ja Yue et al., 2023).

Nämä tutkimukset ovat kestäneet enintään vuoden ajan synteettisessä pohjavedessä, ja silloin korroosio pääsee muutaman sadan mikrometrin syvyyteen. Voidaan kysyä, mitä tapahtuu pidemmän ajan kuluessa? On olemassa tutkimuksia, jotka osoittavat, että jos tutkimusta tehdään 7 vuoden ajan, niin vety on tunkeutunut koko materiaaliin (kupariin) 5 cm matkalta. Voidaan siis sanoa, että ainakin 5 vuodessa vety (liikkuvien alkuaine) on tunkeutunut koko 5 cm kuparikapseliin. Tämä antaa käsityksen siitä, kuinka nopeasti nämä asiat tapahtuvat. Olemme kaukana siitä, että kyseessä olisi vain materiaalin pintaan kohdistuva reaktio. Todisteita on ainakin neljästä kehittyneestä menetelmästä.

Kritiikki, jota tuloksiin on kohdistunut, on liittynyt siihen, että synteettiseen pohjaveteen on lisätty natriumsulfidia. Sulfidia lisätään mikrobitoiminnan vuoksi, sillä loppusijoitusluolastossa esiintyy sulfidia, joten sen lisääminen synteettiseen pohjaveteen on täysin järjestyksensä skenaario. Synteettisen pohjaveden sulfidipitoisuus on ollut luonnollista pohjavettä korkeampi siksi, että prosessia saadaan nopeutettua laboratorioolosuhteissa. Korroosiotutkijan näkökulmasta kritiikki on irrelevantti, sillä korroosion voidaan olettaa tapahtuvan myös luontaisissa olosuhteissa matalamman sulfidipitoisuuden vallitessa.

On myös muita kuparikorroosiotutkimuksia, jotka vahvistavat kuparikorroosion nopeutumisen jo suhteellisen matalissa lämpötiloissa, kuten ns. *ant-nest* korroosio kupariputkissa. Vaikka tässä yhteydessä korroosion syntymekanismi on eri, nopea eteneminen voi myös *ant-nest* -korroosiossa johtua hapen, vedyn ja rikin kulkeutumisesta raerajoja pitkin, samoin kuin kuparikapselin tapauksessa (Cozzarini et al., 2020, Zhou et al., 2018). Voisiko tämä olla relevanttia myös loppusijoituksen yhteydessä?

Lisäselvityksiä vaatii myös mikrobitoiminnan ja säteilyn yhteisvaikutukset. Mikrobitoiminta ja säteily auttavat kiihdyttämään toimintaa edelleen, sillä mikrobit, rikkiä pelkistävät bakteerit, kestävät säteilyä ja viihtyvät kuparikapselin pinnalla. Korroosiotutkijan mukaan kupari ei tule kestäämään, jos ja kun se joutuu kosketuksiin pohjaveden kanssa. Todennäköisesti kupari kestää 10–30 vuotta, 100 vuotta ollessa todennäköinen yläraja.

Ongelmasta tulee korroosiotutkijan mukaan vielä huolestuttavampi, kun tarkastellaan kuparikapselia, joka on suuri putki kannella ja pohjalla, jotka hitsataan paikoilleen. Putkessa on viiden senttimetrin hitsausseam sekä ylä- että alaosassa. Pohjavesi ja paisuva savi aiheuttavat suuren paineen kuparikapseliin loppusijoitusluolastossa ja puristavat kapselia keskeltä. Tämä tarkoittaa sitä, että kannessa ja pohjalevyssä on suuria jännityskeskittymiä. Siellä on myös hitsausseama, jossa syntyy muun muassa oksidihiukkasia. Syntyy suuri jännitys ja sulfidien aiheuttama jännityskorroosiohalkeilu. Toisin sanoen kaikki heikoudet voivat keskittyä samaan kohtaan heikentäen kuparikapselia.

2. Moniestejärjestelmän testaaminen yhdessä radioaktiivisen jätteen kanssa

Korroosiotutkijat pitivät merkittävänä riskinä sitä, että moniestejärjestelmää kokonaisuudessaan yhdessä radioaktiivisen jätteen kanssa ei ole koskaan testattu samanaikaisesti. Jos ajatellaan kokonaisuutta bentoniitti, kupari ja kallioperä, ei voida unohtaa neljättä komponenttia eli polttoainesauvoja. Säteily läpäisee kapselit ja imeytyy ympäröivään ympäristöön. Gammasäteily on hyvin voimakasta ja johtaa moniin reaktioihin jo pelkästään siksi, että säteily joutuu kosketuksiin pohjaveden kanssa, ja jopa kuparin kohdalla vaikutuksia tapahtuu materiaalin sisällä (Björkbacka et al., 2013).

Vähimmäisvaatimuksena olisi korroosiotutkijan mielestä testata järjestelmää kokonaisuudessaan 10 vuoden ajan 500 metrin syvyydessä, sen jälkeen jollain tapaa nostaa se ylös ja tutkia, mitä kuparille, bentonitille ja sitä ympäröivälle ympäristölle on tapahtunut. Tämä on vähimmäisvaatimus järjestelmälle, jonka on tarkoitus olla turvallinen 100 000 vuotta.

Polttoainesauvojen sijaan kokeita on tehty lämpösilmukoiden avulla, mutta ne eivät voi korvata gammasäteilyä. Tämä osoittaa tutkijan mukaan, että alan tietämys ei ole ollut kovin hyvä, jos ajatellaan, että gammasäteily ja sen antama lämpö voidaan korvata kuparin ympärillä olevilla lämpösilmukoilla.

3. Vaihtoehtoisten materiaalien kartoittaminen

Korroosiotutkijoiden mukaan keskeinen kysymys on, miksi kuparille ei ole etsitty vaihtoehtoja? Kupariseoksia on tutkittu esimerkiksi kuparin, tinan, sinkin ja alumiinin yhdisteenä, joka on paljon korroosionkestävämpi. Tämä *golden alloy* löytyy esim. eurokolikoista ja sitä on tutkittu merivedessä. Esimerkiksi tällä materiaalilla voitaisiin tehdä kokeita (Chang et al., 2018a ja Chang et al., 2018b).

Itämeren pohjasta löydetyn Vasa-laivan erilaisia materiaaleja kuten seostamatonta kuparia, pronssia, lyijyä ja tinaa on tutkittu. Ympäristö on varsin merkityksellinen, sillä laiva oli 7–8 metrin syvyydessä Itämeren pohjan mudassa, joka on melko samanlainen ympäristö kuin loppusijoitusluolastossa, sillä siellä on mm. rikkiä sisältävää pohjavettä. Kuparikolikoiden muodossa oleva seostamaton kupari oli pahasti syöpynyt yli 300 vuoden altistumisen jälkeen, ja tämä on tapahtunut hyvin alhaisessa lämpötilassa, keskilämpötilan ollessa vain 4 astetta, kun taas loppusijoituksen lämpötila saavuttaa 90 astetta. Mutta jos tarkastellaan ainoastaan historiallisia faktoja, voidaan todeta, että siinä missä kuparikolikot olivat pahasti syöpyneitä, esimerkiksi pronssitykit olivat säilyneet todella hyvin, ja niissä on vain muutama prosentti tinaa. Kyse on siis vanhasta tekniikasta, joka on todella paljon korroosionkestävämpää kuin loppusijoitusjärjestelmän kuparikapseli. Kuparikapselin korroosioon liittyviä epävarmuustekijöitä ja riskejä pohdittaessa voidaan kysyä, mitä edellä mainitut tulokset voisivat tarkoittaa loppusijoituksen yhteydessä?

3.2 Luolaston turvallisuuteen vaikuttavia riskejä ja shokkeja

3.2.1 Geologinen soveltuvuus, peruskallion vakaus ja seisminen aktiivisuus

Eri maat ovat arvioineet geologisia muodostumia, kuten savea, suolaa ja kiteistä kalliota, ja niiden soveltuvuutta ydinjätteiden eristämiseen. Arviointikriteereihin kuuluvat kallioperän vakaus, vedenläpäisevyys ja mahdollinen tektoninen aktiivisuus. Esim. Italia sulkee pois alueet, jotka ovat lähellä tulivuoria tai maanjäristysherkkiä alueita (Di Nucci & Prontera, 2023).

Peruskallion turvallisuustoimintojen tarkoitus on:

1. eristää käytetty ydinpolttoaine maanpinnan ympäristöstä ja ihmisten, kasvien sekä eläinten normaaleista elinalueista, estää ihmisen tunkeutumisen mahdollisuudet sekä eristää loppusijoitus maanpinnan muuttuvista olosuhteista,
2. tarjota suotuisat ja ennustettavat mekaaniset, geokemialliset ja hydrogeologiset olosuhteet teknisille esteille, ja
3. rajoittaa haitallisten aineiden kulkeutumista ja niiden leviämistä loppusijoitustilasta (Vehmas et al., 2023).

STUK (2015) korostaa loppusijoituslaitoksen turvallisuutta koskevassa lausunnossaan, että seismistä dataa on kerättävä lisää sekä rakentamis- että käyttövaiheessa, koska loppusijoituksen turvallisuutta arvioidaan "ajanjaksoilla, jotka ylittävät esitetyn datan kattavuuden". Seismiset riskit on arvioitava tarkemmin, huomioiden Olkiluodon kallioperän rakenteet ja niiden ominaisuudet sekä erilaisten geologisten olosuhteiden vaikutukset maanjäristysten suuruuteen ja esiintymistiheyteen.

Asiantuntijahaastattelut:

Vaikka loppusijoituslaitos sijaitsee nykyisin seismisesti rauhallisella alueella, muodostavat tulevat jääkaudet geologin mukaan suuren riskin uusien ruhjeiden syntymiselle kallioperään jääkausien voimakkaitten

geologisten tapahtumien vaikutuksesta. Jääkausien aiheuttamalla seismisyydellä voisi olla vaikutusta bentoniittisaveen, tai se voisi muuttaa pohjaveden liikkeitä. Lisäksi loppusijoituslaitos sijaitsee ruhjevyyhykkeellä ja ruhjeissa vesi pääsee liikkumaan kallioperässä. Viime jääkauden aikana kallioperä painui Suomessa 800 metriä ja kohosi jälleen saman verran. On epävarmaa, miten loppusijoituslaitos tulee kestämään ruhjevyyhykkeellä, mikäli seuraavilla jääkausilla alueella tapahtuu voimakkaita maanjäristyksiä. Tällainen tapahtuma voisi muuttaa pohjaveden virtauksia sekä pohjavesikemiala ja muuttaa mikrobitoimintaa lisäten kuparikapselien korroosioriskiä.

Tulevien jääkausien aiheuttamaa seismisyyttä on haastava mallintaa, sillä Suomessa on seismisesti rauhallista. Tästä syystä on olemassa vain vähän dataa maanjäristyksistä. Maanjäristysten vaikutusten läskennallinen mallintaminen olisi helpompaa, mikäli olisi olemassa enemmän dataa seismisyydestä. Datan vähäisyyden vuoksi joudutaan tekemään hyvin karkeita projektioita maanjäristysten vaikutuksista.

Tulevien jääkausien aiheuttamaan seismisyyteen ja jääkannen aiheuttamaan kohonneeseen pohjavedenpaineeseen on varauduttu siten, että kapselissa on kaksikerrosrakenne eli kuormaa kantava sisäosa raudasta, jotta kapseli kestäisi paremmin mahdollisen ulkoisen kuormituksen. Ruhjevyyhykkeeseen liittyviä riskejä on pyritty vähentämään etsimällä kairausten avulla kapselleille kalliosta sellaiset paikat, jotka ovat säilyneet mahdollisimman ehjinä.

3.2.2 Ihmisen aiheuttamat geologiset muutokset

Seuraavia ihmisen toiminnasta aiheutuvia riskejä tunnistettiin asiantuntijahaastatteluissa:

Kaivostoiminnan riski ruhjeiden syntymiselle: Todennäköisyys sille on varmasti pieni, mutta voisiko tämä jollain aikaperspektiivillä realisoitua, jos tietoa loppusijoituspaikasta ei ole?

Porakaivojen riski ruhjeiden syntymiseen ja veden virtaamiseen niissä: Mahdollisesti yksittäisen talouden porakaivolla ei ole merkitystä, mutta mikäli isompia määriä vettä porattaisiin, voi se vaikuttaa veden virtauksiin ruhjeissa. Se voi vaikuttaa kilometrienkin päähän porauspaikasta, riippuen kallioperän ruhjeista. Myös kaivon syvyydellä on merkitystä riskinäkökulmaan.

Maalämmön mahdolliset vaikutukset: Riskit riippuvat myös maalämmön tyypistä. Jos rakentaminen ruheuttaa kallioperää, niin sillä voi olla merkitystä. Ihmistoiminnan tahattomat vaikutukset kuten esimerkiksi lämpövoimalaitoksen tai maalämpövoimalan rakentaminen ovat riskejä, joita tulisi kyetä estämään yhteiskunnan toimesta.

3.2.3 Jääkauden ja ikiroudan vaikutukset loppusijoituslaitoksen syvyyteen

Posivan mallit osoittavat, että ikirouta voi ulottua 60–240 metrin syvyyteen kylminä, kuivina jaksoina. Syvemmälle ulottuva jäätyminen edellyttäisi Posivan mukaan erittäin pitkää kylmää ajanjaksoa (Posiva Oy, 2021). Loppusijoitustilat rakennetaan usein 400–500 metrin syvyyteen. Suomen Olkiluodon tunnelisto ulottuu noin 450 metrin syvyyteen. Tämän syvyyden ajatellaan eristävän jätteet maanpinnan toiminnasta ja suojaamaan ympäristön tapahtumilta, kuten jäätiköitymisiltä ja maanjäristyksiltä. Ikiroudan syvyyteen tulevaisuudessa liittyy kuitenkin epävarmuuksia. Myös tulevat jääkaudet ovat riski, sillä viime jääkaudella jää painoi maankuorta alaspäin arviolta jopa yhden kilometrin verran (Salonen et al., 2006). Loppusijoitus-syvyys on valittava ja loppusijoitustilojen asemointi on tehtävä pitkäaikaisturvallisuuden kannalta edullisesti niin, että otetaan huomioon kallioperän geologiset rakenteet sekä vedenjohtavuus, pohjavesikemia ja kalliion mekaaninen stabiilius (STUK, 2018).

Asiantuntijahaastattelut:

Tuleviin jääkausiin liittyvät epävarmuudet

Haastateltu geologi nosti esiin kysymyksen maan painumisesta. Miten taataan, että erilaiset vapautumisesteet eivät vaurioidu, kun kallioperä vajoaa ja kohoaa syklisesti useita kertoja tulevaisuudessa glasiaali- ja interglasiaalikausilla aiheuttaen seismisyyttä? Esimerkiksi viime jääkaudella vajoamista tapahtui 800 metriä. Jäätikön perädyttyä maan kuori palasi tasapainotilaan suhteellisen nopeasti, jopa 10 metriä 100 vuodessa. Olkiluoto sijaitsee jäätikön reunavyöhykkeellä, jossa tapahtui viime jääkaudella maan vajoamista ja nousua aiheuttaen suuria maanjärityksiä ja lohkoliikuntoja ja siirroksia, jotka ovat riskinä myös tulevana jääkausina.

Toisen haastateltavan mukaan tulevien jääkausien vaikutusten mallintaminen on epävarmaa. Nykyiset laskelmat Olkiluodossa perustuvat kallioperän porauksissa kerättyyn historiadataan jääkauden jäljistä luolaston alueella ja tämän historiadatan perusteella projisoidaan olosuhteita tulevaisuudessa.

Ikiroutan riskit loppusijoitukselle

Geologin mukaan viime jääkauden aikana Olkiluoto oli kymmeniä tuhansia vuosia jäätöntä routa-alueita eikä mannerjäätikön peitossa. Tällöin ikirouta on tunkeutunut mahdollisesti hyvin syvälle ja näin voi tapahtua myös tulevien jääkausien aikana. Ikiroutan on mahdollista ulottua syvemmälle, kuin missä loppusijoituslaitos sijaitsee. Kanadassa vastaavissa geologisissa mallinuksissa ikirouta on ulottunut 750 metriin, joten sama on mahdollista tulevaisuudessa myös Suomessa (Chan et al., 2005). Myös Etelämantereella on tutkittu mannerjäätiköllä Suomen kaltaisissa jääkauteissa oloissa ikiroutaa, joka ulottuu 800 metrin syvyyteen (Ruotoistenmäki & Lehtimäki, 2009). Suomessa voidaan olettaa seuraavan jääkauden keskilämpötilan olevan liki sama kuin Etelämantereella nykyään. On mahdollista, että ikirouta vaikuttaa pohjavesivirtauksiin loppusijoituspaikalla. Lisäksi toinen haastateltava toi esiin, että tunneliston kuilujen täytettävät yläosat ovat lähempänä sellaisia elementtejä, jotka voivat heikentää luolaston eri vapautumisesteiden toimintakykyä. Esimerkiksi juuri ikirouta voisi murentaa niitä kuilujen täytteitä, jotka ovat lähempänä maanpintaa. Voisiko tällainen mahdollinen toimintakyvyn heikkeneminen luoda reitin 450 metrin syvyyteen, jossa ydinjätteet sijaitsevat?

Myös pohjavesitutkija nosti esille vedenpaineen. Millaiset ovat vedenpaineen muutokset, jos päällä on kilometrejä jäätä seuraavan jääkauden aikana? Pääseekö gradienttieroja muodostumaan, joka liikuttaa vettä kallioperän ruhjeissa ja bentoniitissa? Maailmalla löytyy glasiaaligeologian tietämystä Grönlannin ja Antarktiksien tutkimuksesta tähän liittyen.

Tieteisfiktiokirjailija piti myös jääkausien osalta epäjatkuvuuksia mahdollisena. Mikäli ihmiskunta on olemassa vielä seuraavan jääkauden lähestyessä, on sen tuloa mahdollisesti opittu manipuloimaan ilmastomuutokseen liittyvän tietämyksen avulla. Esimerkiksi Pohjois-Euroopalle on suurempi riski se, että suuri osa maa-alasta peittyisi paksun jään alle tai olisi tundra-alueita, kuin että manipulaatiota kokeiltaisiin.

3.2.4 Pohjaveden liike

Pohjaveden virtaus geologisissa muodostumissa voi vaikuttaa loppusijoituksen vakauteen ja turvallisuuteen. Suunnittelussa käytetään usein bentoniittisavea hidastamaan pohjaveden siihen liuenneiden aineiden liikettä kapselien ympärillä (Vehmas et al., 2023).

Asiantuntijahaastattelut:

Keskeistä pohjavesiasiantuntijan mielestä on, millaisia ruhjeita alueen kallioperässä on ja mikä on riski uusien ruhjeiden syntymiseen eri aikaperspektiiveillä, erityisesti tulevat jääkaudet huomioden. Veden liike

ruhjeissa on nopeaa, ns. preferential flow. Asiantuntija korosti mallinnuksen epävarmuuksia ja peräänkuulutti sitä, onko pohdittu, miten vesi liikkuu kallioperässä, jos/kun tulee ruhjeita seuraavien jääkausien vai kutuksista? Näistä riskeistä voidaan puhua useista eri aikaperspektiiveistä.

Jos taas bentoniitti vahingoittuu, vesi voi päästä seuraaviin suojakerroksiin (kupariin). Mielenkiintoinen kysymys pohjavesiasiantuntijan mielestä on, miten on mallinnettu erilaisia tapahtumia, joissa bentoniittisavi vahingoittuu ja se läpäisee vettä.

Pohjavesiasiantuntija nosti myös esille suolaveden intruusion riskin. Miten Itämeren suolapitoisuus nousee, kun merenpinta nousee ilmastomuutoksen myötä Tanskansalmessa ja suolavesipulsseja syntyy yhä enemmän? Pääseekö suolavesi kulkeutumaan ruhjeisiin, ja sitä kautta aiheuttamaan korroosiota kapseleihin, jos bentoniittisavikin on vahingoittunut?

3.2.5 Ilmastomuutos

Ilmastomuutosta on käsitelty alan tutkimuksessa lähinnä seuraavien jääkausien perspektiivistä. Nykyisen lämpenemisen aiheuttamia vaikutuksia esim. Atlantin valtameren virtausjärjestelmän (AMOC) hiipumisen vaikutukset ja golfvirran muutosten, merenpinnan nousemisen ja meriveden suolaisuuden lisääntymisen perspektiivistä ei ole laajasti tutkittu ydinjätteen loppusijoituksen yhteydessä. AMOC:in hiipumisen vaikutuksen myötä Pohjois-Eurooppa kylmenisi 3 asteella per vuosikymmen (Van Westen et al., 2024).

Asiantuntijahaastattelut:

Merenpinnan nousu

Yhtenä ilmastomuutokseen liittyvänä riskinä saarella sijaitsevalle loppusijoituspaikalle ovat jäätiköiden sulamisvesien virtaukset meriin, jonka myötä merenpinta tulee nousemaan myös Itämerellä. Merenpinnan nousu on arviolta kahdesta kolmeen metriä seuraavan 50–100 vuoden aikana. Lisäksi myrskyisyyden lisääntyminen lisää tulvariskiä. Tosin maan kohoaminen kompensoi osittain merenpinnan nousua Suomessa. Olkiluodon luolaston suun ollessa vielä auki, merenpinnan nousu ja kovat tulvat voisivat aiheuttaa riskejä. Merenpinnan korkeus on ylipäättään vaihdellut historiassa kymmeniä metrejä. Se on ollut korkea-ampi lämpiminä kausina ja matalampi jäätiköitymisen aikana. Mikäli kaikki jää sulaisi, voisi merenpinta nousta potentiaalisesti 60 metriä. Haastateltava ei kuitenkaan pitänyt tätä mahdollisena seuraavan miljoonan vuoden ajanjaksolla. Myös ahtojäät voivat aiheuttaa riskejä luolaston ollessa vielä auki.

Atlantin kiertoliikkeen pysähtyminen

Ilmaston lämpeneminen ja jäätiköiden sulaminen vaikuttaa Atlantin meridionaalisen kiertoliikkeen (AMOC) vakauteen. Kiertoliike voi mahdollisesti heiketä koko ajan, mutta tästä ei ole samanlaista yksimielisyyttä, kuin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaman ilmaston lämpenemisen osalta. Haastateltavan mukaan ilmaston neljän asteen lämpenemistä pidetään niin sanottuna keikahduspisteenä, jolloin kiertoliike pysähtyisi. Puolet malleista projisoi kiertoliikkeen pysähtyvän neljässä asteessa. Tämä voisi olla mahdollista seuraavan 300 vuoden aikana. Mallinnusten mukaan pohjoisella pallonpuoliskolla tapahtuisi kiertoliikkeen pysähdyttyä voimakas kylmeneminen ja merijää tulisi peittämään laajoja alueita Pohjois-Atlantilta Brittein-saarille asti. Talvet kylmenisivät tällöin Suomessa 10–20 astetta muistuttaen Siperian talvea. Kesälämpötilat laskisivat muutamalla asteella. Sateisuutta on haastavaa ennustaa, mutta yleensä viileneminen vähentää sateisuutta. Sään voimakas viileneminen Suomessa vuoteen 2300 mennessä synnyttää epävarmuuden siitä, olisiko myös Suomeen mahdollista muodostua ikiroutaa samaan tapaan kuin Siperiassa. Lisäksi haastateltava toi esiin, että Grönlannissa tehdyt kairaukset viittaavat siihen, että Atlantin kiertoliikkeen pysähtymistä on tapahtunut myös syklisesti luonnollisena vaihteluna ilman ihmisen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä.

3.2.6 Mikrobiologia

Suomessa on tehty viime vuosikymmeninä Olkiluodon pohjavesiin liittyvää tutkimusta, jotta ymmärrettäisiin paremmin mikrobiologisten prosessien vaikutusta pohjavesikoostumukseen sekä moniestejärjestelmän toimintaan. Esimerkiksi Tuomi ym. (2020) ovat raportissaan tuoneet esiin mikrobien pelkistävän sulfaattia sulfidiksi paikallisesti Olkiluodon pohjavesissä, jolloin mikrobien vaikutus synnyttää korroosioriskin. Pelkistyminen voimistuu entisestään pohjavesivirtausten muutosten myötä. Mikrobiologiaan liittyvien tutkimusten on todettu olevan luonteeltaan vaativia, ja testejä on ollut vaikea toistaa. Näin ollen tuloksia on ollut haastava soveltaa loppusijoituksen turvallisuusarvioinnissa (KYT2022 Steering Group, 2023).

Asiantuntijahaastattelut:

Olkiluodossa on tutkittu mikrobiologisia vaikutuksia loppusijoitukseen liittyen ja erityisesti vapautumisehtisiin, mutta tätä on haastateltavan mukaan tutkittu vain staattisessa tilassa. Mikrobiologiaan kytkeytyy monia epävarmuuksia, joita ei ole juurikaan tutkittu. Vaikka nykyolosuhteissa loppusijoituslaitoksessa on nykyisin melko viileää ja mikrobit toimivat hitaasti, mutta ydinpolttoaine nostaa lämpötilaa kapseleita ympäröivässä bentoniitissa ja kallioperässä, jolloin mikrobit aktivoituvat lämmön noustessa. Esimerkiksi mikrobeihin liittyvä bentoniittisavitutkimus on tehty normaalissa ilmanpaineessa. Emme siis tiedä, miten mikrobit käyttäytyvät syvässä biosfäärissä. Myös mahdollisen säteilyn aiheuttama mikrobien evoluutio loppusijoituslaitoksessa on tutkimaton alue. Myöskään virusten vaikutusta loppusijoituslaitoksen kallioperän mikrobistoon ei ole paljoa tutkittu.

Suuri riski piilee siinä, että Olkiluodon yläosan pohjavesi on sulfaattipitoista, samoin kuin merivesi. Mikäli veden virtaukset syystä tai toisesta muuttuvat, esimerkiksi seismisyyden vuoksi, muodostuu mikrobien aineenvaihduntatuotteina korrodoivaa sulfidia.

On osoitettu, että otollisissa olosuhteissa mikrobit pystyvät aiheuttamaan rapautumista myös bentoniittisavessa. Mikäli bentoniittisavesta tehty eriste ei ole riittävän tiivis, luo tämä otolliset olosuhteet mikrobien kasvulle. Tarvittaisiin bentoniittiasiantuntijaa arvioimaan, minkä suuruisen rapautumisen myötä bentoniitti ei enää toimisi suunniteltuun tapaan eristeenä, jolloin kyseisen vapautumisesteen toimivuus heikkenisi.

Korroosiotutkijan mukaan on hyvä tiedostaa perusajatus, että jos otetaan mineraaleja täysin eri paikasta, jossa on täysin erilainen termodynaaminen ympäristö, ja laitetaan ne suomalaiseen tai ruotsalaiseen kallioperään, jossa on myös epätavallisen korkeat lämpötilat (jopa 90 °C), tapahtuu aina jonkinlaista ei-toivottua hajoamista. Wyomingin bentoniitti on vulkaanista tuhkaa, jolla on tietty kemiallinen tasapaino siinä ympäristössä, jossa se on löydetty. Sama pätee myös metallisen kuparin kohdalla. Se esiintyy tietyissä termodynaamisissa ympäristöissä. Täällä eri materiaalit ovat yhteen pakattuna täysin erilaisessa ympäristössä, aluksi korkeissa lämpötiloissa, sitten pohjavedessä, jossa on rikkiä ja rikkiä pelkistäviä bakteereja. Mikrobiologinen toiminta ei ole sopeutunut tähän järjestelmään. Sekä saven että kuparin hajoaminen lisääntyy lämpötilan ja mikrobiaktiivisuuden myötä.

3.2.7 Sodat ja terrorismi

Useat haastatellut asiantuntijat pitivät sotia, terrorismia ja diktatuuria loppusijoitukseen liittyvinä todennäköisinä riskeinä nykyisyydessä ja lähitulevaisuudessa. Sotia ja diktatuuria on ollut paljon historiassa, joten tämä on mahdollista myös tulevaisuudessa. Loppusijoitushanketta on saatu tehdä Suomessa 50 vuotta rauhan ajalla. Viimeaikaiset tapahtumat ovat kuitenkin nostaneet sodat ja terrorismin jopa hyvin todennäköisiksi uhkiksi. Todennäköisyydestä huolimatta Suomessa ei ole käyty keskustelua sotien vaikutuksesta loppusijoitukseen tai loppusijoitetun ydinjätteen joutumisesta ydinaseiden valmistukseen. Tai ainakin tutkijoiden on ollut vaikea löytää näistä avoimia lähteitä.

Sotien ja terrorismin osalta suurin riski kytkeytyy asiantuntija-arvioiden mukaan ydinjätteen välivarastointiin jäähdytysaltaissa. Lähihistoriasta on olemassa esimerkkejä, jotka liittyvät tähän riskiin. Esimerkiksi Ukrainassa ydinvoimalat ovat jääneet sodan jalkoihin. Jälkikäteen on myös ilmennyt, että Al Qaidan vuonna 2001 tekemien iskujen kohteeksi oli alun perin suunniteltu yhdysvaltalaisia ydinvoimaloita.

Pitkällä aikaperspektiivillä (yli 100 000 vuoden aikajänne) voi uhkaksi muodostua tieteisfiktiokirjailijan mukaan käytetyn ydinpolttoaineen sisältämän plutoniumin mahdollinen väärinkäyttö ydinase materiaaliksi. Plutonium 239:n puoliintumisaika on hyvin pitkä, 24 000 vuotta, jolloin ydinjätteen radioaktiivisuuden las-
kiessa lähelle luonnollisen uraanin tasoa, nousee mahdollinen ydinasekäyttö riskiksi. Tästä ei ole juurikaan käyty keskustelua. Plutoniumin erottelu uraanista on suhteellisen tunnettu tekniikka. Näiden ydinjätteen loppusijoituspaikkojen plutoniumista tulevat tuntemattomien yhteiskuntien supervallat ja diktaattorit mahdollisesti tulevaisuudessa taistelemaan. Loppusijoituksessa tulisi etsiä ratkaisua, joka varmistaa, että ihmiskunta ei pääse loppusijoitettuun ydinjätteeseen enää käsiksi, jotta ei jätetä ydinsodan uhkaa perinnöksi tuleville sukupolville.

3.3 Yhteiskunnallinen perspektiivi turvallisuuteen ja oikeudenmukaisuuteen

3.3.1 Yhteiskunnalliset ja ympäristövaikutukset, mukaan lukien sosiaalinen hyväksyttävyys

Sosiaalinen hyväksyntä, paikallisyhteisöjen osallistuminen ja ympäristövaikutusten arviointi ovat keskeisiä esim. Sveitsissä, joka panostaa laajoihin julkisiin kuulemisiin (Kupler et al., 2023)

Asiantuntijahaastattelut:

Muutamissa asiantuntijahaastatteluissa keskusteluihin nousi sosiaalinen hyväksyttävyys. Eurajoen osalta kyseessä on suomalaisesta näkökulmasta suhteellisen tiheään asuttu alue Satakunnassa. Esimerkiksi Kanadan Ontarioon suunniteltu loppusijoituslaitos peruskallioon satojen kilometrien päähän tiheästä asutuksesta on kohdannut paljon vastustusta. Kiinnostavaa on, miksi Suomessa kuntalaiset kannattavat korkeaktiivisen ydinjätteen loppusijoituslaitosta, eikä missään muualla maailmassa? Löytyykö selitys suomalaisesta yhteiskunnasta, jossa ihmiset uskovat instituutioihin ja mielipidevaikuttajiin? Tätä kannattaisi asiantuntijan mielestä tutkia lisää yhteiskunta -ja ihmistieteiden näkökulmasta.

Keskeistä sosiaalisen hyväksyttävyyden kontekstissa on myös, miten ydinjätteen loppusijoituskysymys etenee muissa maissa ja miten keskustelut maailmalla tulevat vaikuttamaan yhteiskunnalliseen keskusteluun ja Suomen viranomaisiin? Toisin sanoen, miten pysyvä malli meillä on? Verrattuna 1970- ja 1980-lukuihin malli on perusteellisesti muuttunut jo näinkin lyhyen ajan kuluessa. Asiantuntija ilmaisi, että on haastava ajatella, etteikö mikään muuttuisi tulevana vuosina tai vuosikymmeninä myös Suomessa tämän suhteen.

3.3.2 Viestintä sukupolvien välillä

Pitkäaikaisen dokumentaation ja varoitusmerkkien vaatimukset ovat keskeisiä, jotta tulevat sukupolvet ja yhteiskunnat ymmärtävät sijoituspaikkojen sijainnin ja vaarat, vaikka nykyinen teknologia tai kieli olisi kadonnut ja koko vallitseva kulttuuri olisi muuttunut tai kadonnut. Miten varmistetaan viestintä tulevaisuuden sukupolville niin, että viesti kulkeutuu eteenpäin sukupolvelta toiselle tai toisaalta fyysinen merkintä säilyisi ja olisi tarpeeksi ymmärrettävä? Keskeistä on myös huomioida se, että ydinjäte ei joudu tietoisesti väärin

käsiin tulevaisuudessakaan, mutta toisaalta se, että tulevat sukupolvet osaavat tietoisesti varoa ydinjätettä (Högberg & Holtorf, 2015).

Asiantuntijahaastattelut:

Suomalainen malli on passiiviseen turvallisuuteen selkeästi nojautunut. Mitkä voisivat olla mahdollisia tekijöitä, jotka muuttaisivat nykyistä tulkintaa passiivisesta turvallisuudesta? Asiantuntija korosti viestinnän tuleville sukupolville ydinjätteen loppusijoituspaikoista olevan tärkeää, jotta kyseisillä alueilla ei tulevaisuudessa esimerkiksi vahingossa kaiveta, mikä aiheuttaisi turvallisuusriskin. Nykyiset tietotekniset tallennusvälineet vanhenevat nopeasti, jolloin tarvitaan muita keinoja viestiä loppusijoituspaikoista tuleville yhteiskunnille. Nuclear Energy Agency (NEA) on tehnyt tutkimusta, kuinka tietoja ja muistia käytetyn ydinpolttolaitoksen hautaamisesta tulisi vaalia ja ylläpitää kauas tulevaisuuteen (OECD Nuclear Energy Agency 2019). NEA on luonut strategian tiedon säilyttämisestä ja loppusijoituksen pitkäkestoisesta muistamisesta. Tärkeää strategiassa on runsauden periaate, eli muistamisen ratkaisussa tulee hyödyntää monia keinoja, useita aikajänteitä, monia eri toimijoita sekä monia tiedon sijaintipaikkoja. Keinoina strategiassa tuotiin esiin muun muassa muistamisen instituutiot kuten niin sanotut atomipapistot, aikakapselien käyttö sekä erilaisten merkkien ja taiteen hyödyntäminen. Haastateltava toi esiin, että pitkäaikaista muistamista ei ole kehitetty Suomessa juuri lainkaan, mutta sitä tulisi edistää. Esimerkiksi tekoälyn hyödyntämistä pitkäaikaisessa muistamisessa olisi hyvä tutkia, sillä voiko tekoäly esimerkiksi unohtaa tai muistaa väärin?

Toinen haastateltava piti suurena riskinä sitä, että mikäli pitkällä aikaperspektiivillä tulevilla yhteiskunnilla olisi saatavilla tietoa loppusijoituslaitoksen olemassaolosta, voisi jokin diktaattori hyödyntää tietoa ydinaseiden valmistamiseen. Hän korosti, että kairauksesta ja kaivamisesta aiheutuva mahdollinen alueellinen terveysturvallisuusriski on vaikutukseltaan pienempi kuin mahdollinen globaali ydinsodan uhka. Myös pitkäkestoista muistamista tärkeänä pitänyt asiantuntija korosti, että sotaan ja terrorismiin liittyvät riskit tulee ottaa huomioon muistamisen ratkaisussa. Tästä syystä esimerkiksi suurelle yleisölle tulisi viestiä asiasta rajatunmuin kuin asiantuntijoille. Lisäksi tulisi huolehtia, että ydinjätteen palauttaminen tehdään mahdollisimman vaikeaksi, jottei synny väärinkäytöksiä.

3.3.3 Palautettavuus ja seuranta

Palautettavuuden periaate tarkoittaa loppusijoituslaitoksen avaamismahdollisuutta tuleville sukupolville. Se mahdollistaa tuleville sukupolville jätteen poistamisen tai loppusijoitusmenetelmien muuttamisen esim. teknologisen kehityksen myötä. Esimerkiksi Ranskassa tämä on keskeinen periaate. Tämä lähestymistapa tukee pitkän aikavälin joustavuutta jätteenhallinnassa. Monissa maissa politiikka sisältää laajennetun seurannan ja mahdollisuuden jätteen takaisinottoon jopa satojen vuosien ajan (Lehtonen, 2023). Ydinjätteen lämpötilan nousu ensimmäisten vuosikymmenten aikana toisaalta vaikeuttaa palauttamisoperaatiota (Posiva Oy, 2021).

Asiantuntijahaastattelut:

Muutama haastateltava toi esiin palautettavuuteen liittyviä riskejä. Palautettavuuteen liittyy esimerkiksi riski korkea-aktiivisen ydinjätteen väärinkäytöstä ydinasemateriaaliksi. Tästä syystä palautettavuus tulisi tehdä mahdollisimman hankalaksi. Loppusijoituspaikan avaaminen loisi riskin myös mikrobiologisesta näkökulmasta, sillä avaamisen myötä tulisi todennäköisesti tapahtumaan mikrobiologista aktivoitumista.

Laajennettuun seurantaan liittyy Suomessa seuraavien jääkausien luoma epävarmuus. Jääkaudella olisi vähintään kymmeniä tuhansia vuosia kestävä ajanjakso, jolloin loppusijoituslaitosta voisi peittää yli 2000 metriä paksu jääkerros tai paksu sulamisvesikerros. Suomessa loppusijoituslaitosta ei tulla kuitenkaan monitoroimaan.

Palautettavuuteen liittyy myös ydinenergi laki ja sen meneillään oleva kokonaisuudistus (ks. luku 3.3.5 Ydinenergi lain kokonaisuudistus jäljempänä).

3.3.4 Rahoitus ja saastuttaja maksaa -periaate

Jätteenhallinnan pitkän aikavälin varmistaminen vaatii rahoituksen vakautta. Rahastoilla on keskeinen asema monissa Euroopan maissa. Tämä perustuu periaatteeseen, jonka mukaan jätteentuottajat rahoittavat turvalliset loppusijoitusratkaisut (Van Est & Arentsen, 2023).

Asiantuntijahaastattelut:

Yhteiskunnallisiin näkökulmiin perehtynyt energia-asiantuntija pohti, onko ydinjätehuollon rahoitukseen varauduttu tarpeeksi pitkällä aikaperspektiivillä?

3.3.5 Ydinenergi lain kokonaisuudistus

Myös meneillään oleva uusi ydinenergi lain kokonaisuudistus nousi eräässä asiantuntijahaastattelussa esille. Haastateltava nosti esiin muun muassa seuraavia kysymyksiä:

- Millaisia muutoksia on odotettavissa suhteessa nykyiseen malliin?
- Väljennetäänkö mallia uudessa laissa, ja mitä uusi laki mahdollistaa?
- Millaista osaamista tullaan tarvitsemaan?
- Miten vastuut ja roolit jakautuvat ydinenergi lain erilaisissa kysymyksissä, mukaan lukien palautettavuus?
- Onko loppusijoituspaikkoja useampi?
- Jos loppusijoitettavan ydinjätteen tuonti olisi sallittua laajemmassa mittakaavassa, ottaisiko laki kantaa siihen millaisia jätteitä tänne voitaisiin tuoda?

Uudella ydinenergi lailla tulee olemaan vaikutusta erilaisiin loppusijoitusratkaisuihin ja niihin liittyviin vastuisiin. Tärkeäksi tekijäksi nousi esiin myös pienreaktorit ja niiden huomioiminen uudessa laissa. Miten pienreaktoreiden ydinjätehuolto huomioidaan uudessa laissa? Vaikka laitoksia ei rakennettaisi, lainsäädäntö tulee ne varmasti huomioimaan. Jos niitä rakennetaan, miten niiden ydinjätehuolto järjestetään? Kuka on vastuussa pienreaktoreiden ydinjätteen loppusijoituksesta? Tämä on merkittävä tekijä, jolla tulee olemaan vaikutusta. Pienydinvoimaloiden mahdolliset omistajat tai operaattorit eivät vielä tiedä, mitä heiltä tullaan vaatimaan. On olemassa noin 100 erilaista teknologiaa, joita tutkitaan, ja jotka kilpailevat tällä hetkellä keskenään. Mikä niistä on voittava teknologia, millaista polttoainetta voittavat teknologiat tulevat tuottamaan, millaista jätettä niistä syntyy, ja mitä ne merkitsevät loppusijoitukselle?

3.3.6 Sukupolvien välinen oikeudenmukaisuus

Nykyisten sukupolvien vastuu siitä, ettei tuleville sukupolville jätetä kohtuutonta taakkaa, on keskeinen esimerkiksi Ranskassa (Van Est & Arentsen, 2023). Sukupolvien väliseen oikeudenmukaisuuteen liittyy esimerkiksi se, että kun loppusijoituslaitos suljetaan, vastuu siirtyy luvanhaltijalta yhteiskunnalle ja näin tuleville sukupolville.

Asiantuntijahaastattelut:

Asiantuntijahaastatteluissa nousi esiin useita oikeudenmukaisuuteen liittyviä teemoja, joita on tuotu esiin luvussa 2.3 Yhteiskunnallinen perspektiivi turvallisuuteen ja oikeudenmukaisuuteen. Sukupolvien välinen

oikeudenmukaisuus liittyy esimerkiksi aiemmin mainittuun palautettavuuteen. Millainen yhteiskunta on olemassa tulevaisuudessa ja mikä sen käsitys on oikeudenmukaisuudesta? Mitä tällaisen taakan siirtämisestä tuleville sukupolville ajatellaan tulevaisuudessa? Millaisia ongelmia jätämme heille? Entä kuinka pitkälle aikaperspektiiville saastuttaja maksaa -periaatteen tulisi ulottua, jotta sitä voidaan pitää oikeudenmukaisena tulevien sukupolvien näkökulmasta? Onko viestinnästä sukupolvien välillä huolehdittu siten, että tulevat sukupolvet saavat tarvittavan tiedon ydinjätteen sijoituspaikoista ja vaaroista? Myös luvussa 2.2.7 Sodat ja terrorismi esitetyt näkökulmat liittyvät sukupolvien väliseen oikeudenmukaisuuteen. Ydinjätteen loppusijoitus vähentää lähitulevaisuuteen liittyvää sotien ja terrorismin aiheuttamaa riskiä yhteiskunnalle lisäten oikeudenmukaisuutta. Toisaalta tulee varmistaa se, että pitkällä aikaperspektiivillä käytetyn ydinpolttoaineen väärinkäyttö ydinasemamateriaaliksi on tehty mahdollisimman hankalaksi, jottei jätetä mahdollista globaalia ydinsodan uhkaa perinnöksi tuleville sukupolville.

3.4 Tutkimukseen ja arviointiin liittyvät epävarmuudet

3.4.1 Mallintamiseen liittyvä epävarmuus

Usea haastateltava korosti epävarmuutta luovan laskennalliset mallit ja niiden rajat. Osa korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen vaikuttavista seikoista voidaan osoittaa laskennallisesti, ja osaa taas ei. Se, mitä ei pystytä osoittamaan laskennalla, täytyy voida johtaa muilla tavoilla. Epävarmuuksia liittyy myös itse laskennallisiin malleihin, eli niihin liittyy pitkän aikaperspektiivin mallintamisen tuomaa episteemistä epävarmuutta. Mallinnuksissa tehdään laskennallisia projisioita, sillä ne eivät ole varsinaisia ennusteita. Kaikki mallit ovat sikäli väärässä, että kukaan ei voi tarkasti ennustaa tulevaisuutta. Joistakin malleista on kuitenkin hyötyä loppusijoituksen riskien arvioinnissa. Avainkysymyksenä laskennallisissa malleissa on löytää sellainen tarkkuus, joka tukee loppusijoitusratkaisuun liittyvää tutkimusta ja turvallisuusarviointia.

3.4.2 Systeemisyyden puute

Eräs haastateltava toi esiin, että teknistieteellisiä tutkimuksia aihepiiristä on tehty paljon, ja uudemmat mallilaskelmat ovat monesti edeltäjiänsä parempia. Vielä tarvittaisiin enemmän holistisuuteen ja systeemisyyteen perustuvaa tutkimusta, jossa otetaan huomioon eri riskitekijöiden ja shokkien yhteisvaikutuksia.

Lähes kaikissa haastatteluissa peräänkuulutettiinkin tarvetta nykyistä systeemisemmälle arvioinnille riskitekijöistä ja shokeista, sekä laajemmalle keskustelulle eri tieteenalojen yhteisöjen välillä. Näin holistinen ja systeeminen ymmärrys epävarmuuksista ja riskitekijöistä kasvaisi, sekä kyettäisiin paremmin ymmärtämään niiden yhteisvaikutuksia.

3.4.3 Ennakointimenetelmien kehittämisen tarve

Eräs asiantuntija nosti esiin keskustelun tarpeen tulevaisuudentutkimuksen ja ydinjätteen loppusijoituksen asiantuntijoiden välillä, sillä miljoonan vuoden aikaperspektiivi on erittäin haastava luoden syvää epävarmuutta. Yhtenä haasteena on kehittää skenaariolähestymistapaa tukemaan loppusijoituksen kokonaisvaltaista arviointia. Kun loppusijoituksesta halutaan laatia miljoonan vuoden skenaarioita, voisivat tulevaisuudentutkimuksen asiantuntijat tuoda skenaarioanalyysiin arvokasta täydentävää näkökulmaa. Olisi tarve yrittää saada esille mahdollisimman laajasti tulevaisuuksien mahdollisuuksien koko kirjo, ja poimia niistä merkityksellisimmät elementit skenaarioihin. Silloin yksittäinen tekijä ei välttämättä näyttäydä enää niin merkityksellisenä riskinä.

4. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Mitä on aiemmin tutkittu ja mitä ei ole tutkittu

Esiselvityksessä tunnistettiin lukuisia korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuuteen liittyviä riskejä, epäjatkuvuuksia ja shokkeja. Tuloksissa nousi esiin itse moniesteperiaatteeseen liittyviä epävarmuuksia, loppusijoituksen turvallisuuteen vaikuttavia riskejä ja shokkeja, yhteiskunnallisia näkökulmia turvallisuuteen ja oikeudenmukaisuuteen sekä loppusijoituksen tutkimukseen ja arviointiin liittyviä epävarmuuksia ja kehittämiskohteita.

Korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen kytkeytyviä merkityksellisiä tekijöitä tunnistettiin esiselvityksessä laajasti kaikista eri toimintaympäristön näkökulmista. Taulukko 2 osoittaa, että erilaisia tekijöitä ja muutoksia tunnistettiin poliittisesta, taloudellisesta, sosiaalisesta, teknisestä, ympäristöllisestä ja kulttuurisesta näkökulmasta.

Taulukko 2. Esiselvityksen asiantuntijahaastatteluissa tunnistetut korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvät epävarmuudet ja riskit.

	Asiantuntijahaastatteluissa esiin nousseet teemat, joihin liittyy epävarmuuksia ja riskejä
Poliittiset	Yhteiskunnalliset vaikutukset, palautettavuus, ydinenergiain uudistus (toimintamallit, vastuut, roolit, rahoitus), sodat, terrorismi, ydinsodan uhka
Ekonomiset	Rahoitus ja saastuttaja maksaa -periaate
Sosiaaliset	Sosiaalinen hyväksyttävyys, systeemisyys, skenaariot ja mallintamisen haasteet
Tekniset	Passiivinen turvallisuus, jätteen kapselimateriaalit, jätteen lämmöntuotanto, mikrobiologian vaikutukset moniestejärjestelmään (kupari, bentoniitti), bentoniitin rapautuminen ja kuparikorroosio, syvyys, pienydinvoimaloiden uudet teknologiat ja niiden ydinjätteiden varastointi
Ympäristöön liittyvät	Geologinen soveltuvuus, jääkausien ja ikeroudan vaikutukset, peruskallion vaaka- ja seisminen aktiivisuus, pohjaveden liike, ilmastonmuutos, ympäristövaikutukset, ihmisen toiminnasta aiheutuvat ruhjeet (porakaivot, kaivokset)
Kulttuuriset	Sukupolvien välinen oikeudenmukaisuus, viestintä tuleville sukupolville

Kirjallisuuskatsaus ja asiantuntijahaastattelut osoittavat, että korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksesta on tehty paljon teknistä ja luonnontieteellistä tutkimusta. Epävarmuutta luo se, että tutkimusta on paljolti tehty pistemäisesti systeemisen tutkimuksen sijaan. Kompleksisuus ja systeemisen tutkimuksen puute nousi esiin suuressa osassa tehtyjä asiantuntijahaastatteluja. Tarvittaisiin enemmän tutkimusta, jossa otetaan huomioon erilaisten riskitekijöiden ja shokkien yhteisvaikutuksia. Tästä syystä olisi tärkeä lisätä vuoropuhelua ja yhteistyötä eri tieteenalojen välillä sekä loppusijoituksen ja tulevaisuudentutkimuksen yhteisöjen välillä. Näin holistinen ja systeeminen ymmärrys epävarmuuksista sekä riskeistä lisääntyisi, ja valitun korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitusratkaisun pitkäaikaisturvallisuutta voitaisiin kehittää.

Lisäksi haastatteluissa nousi esiin hyvin todennäköisesti tapahtuvia ilmiöitä ja shokkeja, joiden vaikutusta loppusijoittamiseen ei ole juurikaan tutkittu, tai ei olla tunnistettu keinoja niiden ehkäisemiseksi. Esimerkiksi ihmistoiminnan aiheuttamien tahattomien vaikutusten, kuten porakaivojen ja kaivosten rakentamisen riskit tunnistetaan, mutta keskustelua yhteiskunnallisista keinoista niiden välttämiseksi ei ole käyty Suomessa.

Esimerkkinä tästä ovat muun muassa pitkäaikaisen muistamisen mahdolliset tavat, joiden kehittämistarpeen haastateltavat tunnistivat. Samoin sotiin ja terrorismiin liittyvien vaikutusten arviointia ei ole vielä juurikaan tehty, tai sitä ei ole tehty avoimesti.

4.2 Millaisten epävarmuuksien kanssa ollaan tekemisissä

Toimeksiannossa pyydettiin selvittämään, millaisia riskejä ja epävarmuustekijöitä teemaan liittyy. Haastatellut korroosioasiantuntijat korostivat, että on vahvaa tutkimusnäyttöä siitä, että kuparikapseli ei ole pitkäkestoinen turvallinen ratkaisu, kun lämpötila nousee 60 asteeseen ja kupari pääsee kosketuksiin pohjaveden kanssa. Korroosionkestävämpiä vaihtoehtoja kuparille on jo tutkittu ja niiden kartoittamista ja testaamista tulisi haastateltujen asiantuntijoiden mielestä jatkaa. Lisäksi historiallisten esineiden kuparimateriaalit, jotka ovat olleet rinnastettavissa olosuhteissa osoittavat, että kuparin suhteellisen nopea korroosio on mahdollinen. Myös ns. ant-nest korroosio antaa aiheutta jatkotutkimuksille, sillä vaikka se eroaa syntymekanismiltaan, näyttäisi se etenevän samalla mekanismilla kuin kuparikorroosio 60 asteen lämpötilassa. Esille nostetut riskit ja epävarmuustekijät eivät ole salaista tietoa, vaan ovat haastateltujen korroosioasiantuntijoiden mukaan aiheita, joista keskustellaan alan tapahtumissa ja konferensseissa maailmalla. Lisäksi toinen korroosiotutkija painotti, että myös bentoniittiin liittyy paljon epävarmuutta, jota tulisi tutkia enemmän.

Epävarmuutta lisää se, että ydinjätteen loppusijoitusta on tutkittu paljon staattisessa tilassa laboratorioolosuhteissa, eikä moniesteperiaatteeseen perustuvaa järjestelmäkokonaisuutta ole testattu todellisen kaltaisissa loppusijoituksen olosuhteissa. On ollut haastavaa tutkia esimerkiksi kuparin tai bentoniittisaven käyttäytymistä hyvin pitkällä aikajänteellä eri lämpötiloissa ja paineessa, gammasäteilyn vaikutuksen alaisena, sekä mikrobien käyttäytymistä ja niiden mahdollisia aineenvaihduntatuotteita jonkin olosuhteen muuttuessa loppusijoituslaitoksessa. On myös vaikea tutkia ja arvioida tulevien jääkausien aiheuttamia vaikutuksia, kuten seismisyyttä, ikeroutaa tai pohjavesivirtausten muutosta. Asiantuntijahaastatteluissa nostettiin esiin tarve tutkia tarkemmin esimerkiksi kuparia, bentoniittisavea ja mikrobeja aidon kaltaisissa loppusijoitusolosuhteissa, sillä niihin kytkeytyy tällä hetkellä paljon epävarmuuksia.

Pitkäaikaisturvallisuuden tarkastelujakso on jaettu Posivan käyttölupahakemuksessa eri ajanjaksoille, käytön aikaisesta noin 100 vuodesta, seuraavien tuhansien tai satojentuhansien vuosien ajanjaksolle aina miljoonaan vuoteen saakka. Posivan turvallisuusperustelun mukaan vakaaseen peruskallioon sijoitetut, bentoniittisavella ympäröidyt, mekaanisesti vahvat ja korroosiota kestävät kapselit tulevat mitä todennäköisimmin pitämään kaikki radionuklidit sisällään vähintään miljoonan vuoden ajan (Posiva Oy, 2021). Suuri osa haastatelluista asiantuntijoista piti kuitenkin epävarmana sitä, että nykyinen ratkaisu olisi turvallinen 100 000 vuotta.

Esiselvityksessä tunnistettiin myös itse pitkään aikaperspektiiviin sekä tutkimus- ja arviointimenetelmiin liittyviä epävarmuuksia. Pitkä aikaperspektiivi itsessään luo syvää epävarmuutta, sillä emme voi etukäteen tunnistaa kaikkia tekijöitä, joilla voisi olla vaikutusta loppusijoittamiseen. Myös laskennallisten mallien rajat johtavat siihen, että malleihin itsessään liittyy episteemistä epävarmuutta. Lisäksi tulevaisuudentutkimuksen menetelmiä, kuten miljoonan vuoden skenaarioita, tulisi jatkokehittää, jotta kyettäisiin tunnistamaan mahdollisimman laajasti mahdollisia tulevaisuuksia, mikä tukisi ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvää arviointia.

KIRJALLISUUS

- Arentsen, M. & Van Est, R. (toim.) (2023) *The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe. Energy Policy and Climate Protection*. Springer VS Wiesbaden. (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3>.
- Auffermann, B. – Suomela, P. – Kaivo-oja, J. – Vehmas, J. & Luukkanen, J. (2015) A final solution for a big challenge: The governance of nuclear waste disposal in Finland. In Brunnengräber, A. – Nucci, M. R. – Isodoro Losada, A. M. – Mez, L. & Schreurs, M. (eds.) *Nuclear waste governance: An international comparison*. Springer VS Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-08962-7_10.
- Björkbacka, Å. – Hosseinpour, S. – Johnson, M. – Leygraf, C. & Jonsson, M. (2013) Radiation induced corrosion of copper for spent nuclear fuel storage. *Radiation Physics and Chemistry*, 92, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.06.033>
- Chan, T. – Christiansson, R. – Boulton, G. S. – Ericsson, L. O. – Hartikainen, J. – Jensen, M. R. & Wallroth, T. (2005) DECOVALEX III BMT3/BENCHPAR WP4: The thermo-hydro-mechanical responses to a glacial cycle and their potential implications for deep geological disposal of nuclear fuel waste in a fractured crystalline rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(5–6), 805–827. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.03.017>.
- Chang, T. – Herting, G. – Jina, Y. – Leygraf, C. & Odnevall Wallinder, I. (2018a) The golden alloy Cu₅Zn₅Al₁Sn: Patina evolution in chloride-containing atmospheres. *Corrosion Science*, 133, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.027>.
- Chang, T. – Odnevall Wallinder, I. – Jina, Y. & Leygraf, C. (2018b) The golden alloy Cu-5Zn-5Al-1Sn: A multi-analytical surface characterization. *Corrosion Science*, 131, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.11.014>
- Cozzarini, L. – Marsich, L. & Schmid, C. (2020) Ant-nest corrosion failure of heat exchangers copper pipes. *Engineering Failure Analysis*. Vol 109(2020), 10438. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104387>
- Di Nucci, M. R. & Brunnengräber, A. (2023) The long road towards the soft nuclear repository state: Nuclear waste governance in Germany. In Arentsen, M. & van Est, R. (eds.) *The future of radioactive waste governance: Lessons from Europe* (p. 113–140). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3_5.
- Di Nucci, M. R. & Prontera, A. (2023) *Nuclear waste governance in Italy: Between participation rhetoric and regionalism*. In Arentsen, M. & van Est, R. (eds.) *The future of radioactive waste governance: Lessons from Europe* (p. 51–83). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3>
- Drott-Sjöberg, B.-M. (2010) Perceptions of Nuclear Wastes across Extreme Time Perspectives. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 1(4), 231–253. <https://doi.org/10.2202/1944-4079.1039>
- Holtorf, C. & Högborg, A. (2015) *Archaeology and the future: Managing nuclear waste as a living heritage (NEA 7259). Radioactive Waste Management and Constructing Memory for Future Generations*. Proceedings of the International Conference and Debate, 15–17 Sept. 2014, Verdun, France Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:47009695
- Kuppler, S. – Eckhardt, A. & Hocke, P. (2023) Who decides what is safe? Experiences from radioactive waste governance in Switzerland. In Arentsen, M. & van Est, R. (eds.) *The future of radioactive waste governance: Lessons from Europe* (p. 169–198). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3_7
- KYT2022 Steering group (2023) *KYT2022 Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management 2019–2022*. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment, Energy, 2023:24. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164868/TEM_2023_24.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lee, C.-J. & Lee, K. J. (2006) Application of Bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(5), 515–532. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.03.011>
- Lehtonen, M. (2023) The governance ecosystem of radioactive waste management in France: Governing of and with mistrust. In Arentsen, M. & van Est, R. (eds.) *The future of radioactive waste governance: Lessons from Europe* (p. 231–258). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3_9

- Litmanen, T. – Kari, M. – Vesalainen, J. & Kojo, M. (2014) *Socio-technical risk governance through dyadic risk dialogue: Copper corrosion as a safety challenge in the geological disposal of spent nuclear fuel (WP 2 – Topic: Demonstrating Safety)*. University of Jyväskylä (JYU) & University of Tampere (UTA) <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-5739-1>
- OECD Nuclear Energy Agency (2019) *Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Final Report of the RK&M Initiative (No. NEA-7421)*. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_40049/a-new-nea-publication-preservation-of-records-knowledge-and-memory-rk-m-across-generations-final-report-of-the-rk-m-initiative
- Paju, P. (2021) Kuinka muistaa loppusijoituslaitos 2200-luvulla? Kansainvälistä tutkimusta tiedon säilyttämisestä. *Tiede ja tekniikka*, 4/2021, s. 37–41.
- Posiva Oy (2021) *Käyttölupahakemus, käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitos*. <https://tem.fi/documents/1410877/176068401/Kayttolupahakemus.pdf>.
- Posiva Oy (2015) *Rakentamislupahakemus Olkiluodon kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamiseksi käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten*. Posiva Oy. https://tem.fi/documents/1410877/2412863/Posivan_rakentamislupahakemus.pdf.
- Rasilainen, K. & Vuori, S. (2013) *Käytetyn ydinpolttoaineen huolto: Suomalaisen suunnitelman pääpiirteet*. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1999/T1953.pdf>
- Rosenström, L. (2023) *Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen ratkaisut*. Energiatekniikan kandidaatin työ. Lappeenrantaan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023041937546>.
- Ruotoistenmäki, T. & Lehtimäki, J. (2009) Geophysical and geodetic studies of bedrock, permafrost and continental ice in Queen Maud Land, Antarctica. *Geophysica*, 45(1–2), 63–76. https://archive.geophysica.fi/pdf/geophysica_2009_45_1-2_063_ruotoistenmaki.pdf.
- Salonen, V.-P. – Eronen, M. & Saarnisto, M. (2006) *Käytännön maaperägeologia*. 2. painos. Kirja-Aurora, Turku.
- STUK (2015) *Lausunto ja turvallisuusarvio Olkiluodon käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamisesta (STUK-B 195)*. Säteilyturvakeskus. <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/127132/stuk-b195.pdf>.
- STUK (2018) *Ydinjätteen loppusijoitus*. Säteilyturvakeskus, ohje YVL D.5, 13.2.2018. <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLD-5>
- Swahn, J. (2023) Radioactive Waste Management in Sweden: Decision-Making in a Context of Scientific Controversy. In Arentsen, M. & Van Est, R. (eds.) *The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe. Energy Policy and Climate Protection*, 239–286. Springer VS. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-40496-3>
- Trinczek, R. (2009) How to interview managers? Methodical and methodological aspects of expert interviews as a qualitative method in empirical social research. In Bogner, A. – Littig, B. & Menz, W. (eds.) *Interviewing Experts* (p. 203–216). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1057/9780230244276_10.
- Tuomi, P. – Lamminmäki, T. – Pedersen, K. – Miettinen, H. – Bomberg, M. – Bell, E. – Bernier-Latmani, R. & Pitkänen, P. (2020) *Conceptual Model of Microbial Effects on Hydrochemical Conditions at the Olkiluoto Site*. Posiva 2020–03.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2015) Valtioneuvoston päätös Posiva Oy:n hakemukseen saada ydinenergia-lain 18 §:ssä tarkoitettu lupa rakentaa kapselointi- ja loppusijoituslaitos Eurajoen Olkiluotoon. Energiaosasto. <https://tem.fi/documents/1410877/2412863/VN+p%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+12.11.2015.pdf>.
- Valtioneuvosto (2000) *M 7/2000 vp: Periaatepäätös 21. joulukuuta 2000 Posiva Oy:n hakemukseen Suomessa tuotetun käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamisesta*. Oy Edita Ab. https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Documents/m_7+2000.pdf.
- Van Est, R. & Arentsen, M. (2023) European Lessons for the Governance of Long-Term Radioactive Waste Management. In Arentsen, M. & Van Est, R. (eds.) *The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe. Energy Policy and Climate Protection*, p. 319–345, Springer VS. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-40496-3>
- Van Westen, R. M. – Kliphuis, M. & Dijkstra, H. A. (2024) Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances* 10(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>

- Vehmas, J. – Rentto, A. – Luukkanen, J. – Auffermann, B., & Kaivo-oja, J. (2023) The Finnish solution to final disposal of spent nuclear fuel. In Arentsen, M. & van Est, R. (eds.) *The future of radioactive waste governance: Lessons from Europe*, p. 287–317, Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40496-3_12
- Zhang, F. – Ornek, C. – Liu, M. – Müller, T. – Lienert, U. – Ratia-Hanby, V. – Carpén, L. – Isotahdon, E. & Pan, J. (2021) Corrosion-induced microstructure degradation of copper in sulfide-containing simulated anoxic groundwater studied by synchrotron high-energy X-ray diffraction and ab-initio density functional theory calculation. *Corrosion Science*, 18, 2021, 109390. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109390>
- Zhoua, J. – Yana, L. – Tang, J. – Suna, Z. & Ma, L. (2018) Interactive effect of ant nest corrosion and stress corrosion on the failure of copper tubes. *Engineering Failure Analysis*, 83 (2018), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.09.013>
- Yue, X. – Malmberg, P. – Isotahdon, E. – Ratia-Hanby, V. – Huttunen-Saarivirta, E. – Leygraf, C. & Pan, J. (2023) Penetration of corrosive species into copper exposed to simulated O₂-free groundwater by time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS). *Corrosion Science*, 210 (2023) 110833. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110833>

VIIMEISIMMÄT TUTU eJULKAISUT

- 2/2025 Kuhmonen, Tuomas & Tembo, Belyta: Savon maatalouden tulevaisuuskuvat: Sidosryhmien näkemykset.
- 1/2025 Heinonen, Sirkka & Viitamäki, Riku: Society, Skills and Spaces – Curated Conversations on Futures of Work with Foresight Experts.
- 7/2024 Karjalainen, Joni – Miettinen, Sari – Haapasaari, Osku & Kaskinen, Juha: Shaping Education and 21st Century Skills with Futures Literacy. The Futures of Teacher Education in Kenya 2050.
- 6/2024 Kirveennummi, Anna & Heikkilä, Katariina: Hoivaa, vaali ja säilytä – Tulevaisuuskeskusteluja rakennusperinnön ja -suojelun puolesta.
- 5/2024 Aalto, Hanna-Kaisa – Birmoser Ferreira-Aulu, Marianna – Halme, Amanda – Heikkilä, Katariina – Heino, Hanna – Keski-Pukkila, Pasi – Parkkinen, Marjukka – Puustinen, Sari – Richards, Martyn – Salminen, Hazel – Shaw, Morgan – Siivonen, Katriina – Tapio, Petri & Arvonen, Anne (editors): Coolest Student Papers at Finland Futures Research Centre 2023–2024. Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen valittuja opiskelijatöitä 2023–2024.
- 4/2024 Heinonen, Sirkka – Ebrahimabadi, Samaneh – Viitamäki, Riku – Taylor, Amos – Pättikangas, Paula – Knudsen, Mikkel & Tähtinen, Lassi: Deconstructing Paradoxes of Work through CLA. Millennium Project Special Session at FFRC Conference ‘Futures of Natural Resources’, 13 June 2024, Turku, Finland.
- 3/2024 Jones-Wilenius, Ana: Futures and Foresight in Participatory Planning: Exploring Images of the Future in Communities of the Transforming New Indonesian Capital City – Nusantara.
- 2/2024 Karayel, Tolga – Kaivo-oja, Jari – Villman, Tero – Pouru-Mikkola, Laura – Lindholm, Michael & Immonen, Eero: Exploring Smart City Digital Twins. From Distinct Concepts Towards Integrated Socio-Technical Applications.
- 1/2024 Heinonen, Sirkka – Sivonen, Risto – Karjalainen, Joni – Taylor, Amos – Toivonen, Saija & Tähtinen, Lassi: Testing Urban Resilience with Immersive CLA and What If? Three Cases: Rovaniemi, Kotka and Tripla.
- 7/2023 Kuhmonen, Tuomas – Penttilä, Atte – Kuhmonen, Irene – Selänniemi, Marjatta – Saarimaa, Riikka – Savikurki, Anni & Karttunen, Kaisa: Suomen ruokajärjestelmän haavoittuvuus: Keskinäisriippuvuuksien verkko toimintakyvyn haasteena.
- 6/2023 Heino, Hanna – Ahvenharju, Sanna – Ahlqvist, Toni – Ferreira-Aulu, Marianna – Lehtiö, Kati – Puustinen, Sari – Pöllänen, Markus, Siivonen, Katriina & Arvonen, Anne (editors): Coolest Student Papers at Finland Futures Research Centre 2022–2023. Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen valittuja opiskelijatöitä 2022–2023.
- 5/2023 Heinonen, Sirkka – Maree, Burgert – Sivonen, Risto – Toivonen, Saija – Viitamäki, Riku & Pättikangas, Paula: Towards Twin Transformations and Spaces – Convolved Conversations on the Green and Digital Futures of Work.
- 4/2023 Heinonen, Sirkka – Maree, Burgert – Karjalainen, Joni – Sivonen, Risto – Taylor, Amos – Viitamäki, Riku & Pättikangas, Paula: Flourishing Urban Futures to Overcome Polycrises – Roadmap for Resilience 2050.
- 3/2023 Heinonen, Sirkka – Viitamäki, Riku – Karjalainen, Joni – Taylor, Amos – Toivonen, Saija & Tähtinen, Lassi: Pitkospuita eteenpäin katsovaan päätöksentekoon – vihreän, osallistavan, digitaalisen ja kriisinkestävän rakennetun ympäristön tiekartta 2050.
- 2/2023 Aalto, Hanna-Kaisa: Ideointia ja uudistumista ennakoiden – Innotutkan vinkkejä pk-yrityksille.
- 1/2023 Heinonen, Sirkka – Karjalainen, Joni – Taylor, Amos – Rashidfarokhi, Anahita – Toivonen, Saija & Tähtinen, Lassi: Constructive Conversations on Resilient Urban Futures.

**Kaikki Tutu eJulkaisut ovat luettavissa
Turun yliopiston julkaisuarkistossa: www.utupub.fi**



ESISELVITYS KORKEA-AKTIIVISEN YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN MAHDOLLISISTA TULEVAISUUKSISTA (SAFER2028)

Ira Ahokas
Hanna Lakkala
Jarmo Vehmas

Tutu eJulkaisuja 3/2025

Tulevaisuuden tutkimuskeskus
Turun yliopisto

ISBN 978-952-249-626-3 • ISSN 1797-1322



**TURUN
YLIOPISTO**



**TULEVAISUUDEN
TUTKIMUSKESKUS**