

Päätöksenteko

Turvallisuusperustelu

Turvallisuusanalyysi

Radionuklidien
leviämisen laskenta

Käytetyn polttoaineen huolto

Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä

Kari Rasilainen | Seppo Vuori | Markus Olin |
Lasse Ahonen | Juhani Suksi

Käytetyn polttoaineen huolto

Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä

Kari Rasilainen, Seppo Vuori, Markus Olin
VTT

Lasse Ahonen
Geologian tutkimuskeskus

Juhani Suksi
Helsingin yliopisto



ISBN 978-951-38-7980-8 (nid.)
ISBN 978-951-38-7981-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

VTT Technology 92

ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-1211 (painettu)
ISSN 2242-122X (verkojulkaisu)

Copyright © VTT 2013

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
02044 VTT
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)
FI-02044 VTT
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
FI-02044 VTT, Finland
Tel. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 7001

Käytetyn polttoaineen huolto

Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä

Management of spent nuclear fuel. Safety Case as a tool of research and decision making.
Kari Rasilainen, Seppo Vuori, Markus Olin, Lasse Ahonen & Juhani Suksi. Espoo 2013.
VTT Technology 92. 52 s. + liitt. 2 s.

Tiivistelmä

Julkaisussa on yleiskuvaus turvallisuusperustelun roolista käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa. Turvallisuusperustelu on se dokumentaatio, jolla loppusijoituksen luvanhakija haluaa lupahakemuksessaan osoittaa loppusijoituslaitoksen turvallisuuden. Turvallisuuden todistustaakka on luvanhakijalla. Käytetyn ydinpolttoaineen huollon suunnitelmia Suomessa ja muissa maissa kuvataan lyhyesti. Suomessa käytetyn polttoaineen loppusijoituksen turvallisuusperustelu koskee pitkäaikaisturvallisuutta. Kansainvälisissä asiantuntijajärjestöissä IAEA ja NEA tehtyä turvallisuusperustelutyötä kuvataan, ja tämän työn vaikutus havaitaan myös suomalaisessa turvallisuusajattelussa. Suomessa Posiva Oy on edennyt kolmannen turvallisuusperustelun suunnitelmaansa: suunnitelma on tarkentunut Säteilyturvakeskuksen kanssa käydyn dialogin myötä. Samaan aikaan Säteilyturvakeskus päivittää omaa ohjeistustaan. Havaitaan, että Posivan uusin turvallisuusperustelun suunnitelma on rakenteeltaan varsin lähellä STUKin uusimman ohjeluonnoksen ajattelua. Tieteellisen tutkimuksen rooli on merkittävä turvallisuusperustelulle, sillä sekä turvallisuusperustelu itse että viranomaisohjeistus perustuvat olennaisesti tieteellisesti tutkittuun tietoon, ja kummallekin on olennaista, että yhteys tutkimukseen säilyy.

Asiasanat

nuclear waste management, final disposal, long-term safety, safety case, safety assessment

Management of spent nuclear fuel

Safety Case as a tool of research and decision making

Käytetyn polttoaineen huolto. Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä. **Kari Rasilainen, Seppo Vuori, Markus Olin, Lasse Ahonen & Juhani Suksi**. Espoo 2013. VTT Technology 92. 52 p. + app. 2 p.

Abstract

An overall picture is given about the role of safety case in the final disposal of spent nuclear fuel. Safety case is the documentation with which the applicant of licence for a spent fuel repository wants to prove the safety of the repository. The burden of proof lies with the applicant. Plans of spent fuel management in Finland and other countries are described briefly. In Finland, safety case is about long-term safety of the spent fuel repository. Safety case work done in international expert organisations IAEA and NEA is described briefly, and the effect of this work on Finnish safety thinking is observed. In Finland, the safety case work by Posiva Oy has advanced to the third safety case plan; safety dialogue with the Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland (STUK) has focussed the plan. Currently, STUK is updating its set of regulatory guides. It is noted that the latest safety case plan by Posiva is very close to the safety thinking in STUK's forthcoming guide on nuclear waste disposal. The role of scientific research in safety case is important, as both the safety case and regulatory guides are fundamentally based on scientific knowledge, and for both it is essential that the link to scientific research is maintained.

Keywords

nuclear waste management, final disposal, long-term safety, safety case, safety assessment

Alkusanat

Julkaisu antaa lyhyen yleiskatsauksen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuusperustelusta. Turvallisuusperustelu on osa loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen aineistosta, jonka Posiva Oy jätti Suomen hallitukselle 28.12.2012. Rakentamislupahakemuksessa loppusijoituksen turvallisuuden todistustaakka on luvanhakijalla.

Raportti on lähinnä suunnattu henkilöille, jotka työssään tai luottamustoimessaan ovat tekemisissä Posivan loppusijoitushankkeen kanssa, mutta jotka eivät ole turvallisuusperustelun asiantuntijoita. Raportissa esitetään turvallisuusperustelun kantavat periaatteet tarkasti, mutta yksityiskohdissa tyydytään luettavuuden parantamiseksi pelkistetympään esitykseen. Toisaalta raportti sopii myös asiasta muuten kiinnostuneen luettavaksi siinä mielessä, että ennakkotietoja ei tarvita.

Julkaisussa kuvataan turvallisuusperustelua syksyllä 2012 käytettävissä olleiden tietojen ja suunnitelmien valossa. Tämän ajankohdan jälkeen esim. viranomaisohjeet voivat täsmentyä, jolloin myös luvanhakijan laatima turvallisuusperustelu täsmentyy vastaavasti. Raportin tavoitteena on kuvata mihin asioihin turvallisuusperustelussa kiinnitetään huomiota ja miksi. Toisin sanoen tavoitteena on kuvata yleisellä tasolla turvallisuusperustelun rakennetta ja turvallisuusargumentoinnin jäsentämistä. Turvallisuusperustelun sisältöön julkaisu ei ota kantaa, sillä turvallisuusperustelun laatiminen on luvanhakijan vastuulla ja sen arvioiminen viranomaisten vastuulla.

Työ kuuluu Kansalliseen ydinjätehuollon tutkimusohjelmaan (KYT2014), jonka nyt menossa oleva tutkimusjakso kattaa vuodet 2011–2014. Tutkimusohjelmaa rahoittavat yhdessä Valtion ydinjätehuoltorahasto (VYR) ja mukana olevat tutkimuslaitokset.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto	8
2. Käytetyn polttoaineen huolto Suomessa.....	10
2.1 Tekninen suunnitelma.....	10
2.2 Päätöksenteko.....	11
2.2.1 Lainsäädäntö ja viranomaisohjeet.....	11
2.2.2 Työnjako Suomessa.....	12
2.2.3 Päätöksenteon aikataulu	13
2.2.4 Kustannuksiin varautuminen.....	14
3. Käytetyn polttoaineen huolto muissa maissa	15
3.1 Esitetyt perusvaihtoehdot ja Suomi.....	15
3.2 Käytetyn ydinpolttoaineen huolto muissa maissa	18
4. Turvallisuusperustelun rooli käytetyn ydinpolttoaineen huollossa	22
4.1 Turvallisuusperustelu käytetyn polttoaineen huollon ketjussa	22
4.2 KBS-3-konseptin käsittely turvallisuusperustelussa.....	23
4.3 Kytös päätöksentekoon.....	24
5. Turvallisuusperustelun tekninen sisältö	26
5.1 IAEA:n turvallisuusperustelu	26
5.2 NEA:n turvallisuusperustelu	28
5.3 Turvallisuusperustelun sisällöllinen luuranko.....	30
6. Turvallisuusperustelutyö Suomessa	35
6.1 Posivan turvallisuusperustelutyö	35
6.2 STUKin turvallisuusperustelutyö.....	41

7. Tieteellisen tutkimuksen rooli.....	45
8. Yhteenveto	49
Lähdeluettelo.....	51
Liite A: Keskeisiä käsitteitä ja määritelmiä	

1. Johdanto

Ydinenergian tuotannossa syntyy jätteitä kaikissa polttoainekierron vaiheissa, kuten malmin louhinnassa, rikastuksessa, isotooppiväkevöinnissä, polttoaineen valmistuksessa ja ydinenergian tuotannossa. Ydinenergian tuotannossa ja ydinasetuotannossa syntyviä radioaktiivisia jätteitä kutsutaan ydinjätteiksi, ja niiden turvallista huoltoa on pidetty ydinenergian tuotannon ja erityisesti ydinenergian lisärakentamisen edellytyksenä.

Fukushiman vuoden 2011 ydinonnettomuuden jälkeen on joissain isoissa ydinenergiamaissa, kuten Saksassa ja Japanissa, alettu tarkastella uudelleen maan koko ydinenergiastrategiaa. Tässä ydinenergian uudelleenarvioinnissa kannattaa pitää mielessä, että vaikka ydinenergian tuotanto lopetetaan, se ei poista ydinjätehuollon tarvetta millään tavalla. Kaikki lopettamishetkeen asti syntyneet ydinjätteet on huollettava turvallisesti joka tapauksessa.

Suomessa tapahtuvassa ydinenergian tuotannossa syntyviä ydinjätteitä ovat ydinreaktorien käytetty ydinpolttoaine, ydinvoimaloiden toiminnasta syntyvä matala- ja keskiaktiivinen voimalaitosjäte sekä ydinvoimaloiden käytöstä poistosta syntyvä käytöstäpoistojäte (toiselta nimeltään purkujäte). Suomalainen ydinjätehuollon ohjelma on varautunut kaikkien kolmen jätetyypin turvalliseen huoltoon ja huollon rahoittamiseen.

Korkea-aktiivinen ja pitkäikäisiä radionuklideja sisältävä käytetty ydinpolttoaine on ydinjätteistä vaarallisimpana pidetty. Siksi sen loppusijoitushankkeet ovat herättäneet runsaasti keskustelua ulkomailla ja Suomessa. Maailmanlaajuisesti käytetyn ydinpolttoaineen huollon valmistelussa pisimmälle ovat edenneet Suomi ja Ruotsi, jotka molemmat suunnittelevat käytetyn polttoaineen loppusijoitusta syvälle omaan kiteiseen kallioperäänsä. Ruotsin ja Suomen lisäksi Ranska on edennyt korkea-aktiivisen ydinjätteensä huollon valmistelussa; erona Suomeen ja Ruotsiin on, että Ranska suurena ydinenergiamaana noudattaa jälleenkäsittelystrategiaa eikä loppusijoita käytettyä polttoainetta suoraan. Ruotsissa SKB jätti loppusijoituksen rakentamislupahakemuksen vuonna 2011, ja Ranskassa on kaavailtu loppusijoituspaikan valintaa ja lupahakemusta vuodeksi 2015.

Suomessa käytetyn ydinpolttoaineen huolto on edennyt aikataulussa, joka asetettiin jo vuonna 1983. Tämä on kansainvälisesti harvinainen saavutus ja viestii vakavaa ja pitkäjänteistä kansallista sitoutumista asian hoitamiseen. Sitoutuminen koskee paitsi ydinvoimayhtiöitä ja viranomaisia myös valtion ja kuntien päätöksentekijöitä. Ydinvoimayhtiöiden, Fortum Power and Heat Oy:n ja Teollisuuden Voima

Oyj:n, yhdessä omistaman Posiva Oy:n tehtävänä on vastata omistajiensa käytetyn polttoaineen huollosta. Posiva jätti 28.12.2012 Eurajoen Olkiluotoon suunnitelmalleen loppusijoituslaitokselle rakentamislupahakemuksen; loppusijoituslaitoksella on jo valtioneuvoston periaatepäätös vuodelta 2000, jonka eduskunta hyväksyi vuonna 2001. Tätä ensimmäistä periaatepäätöstä on sittemmin täydennetty erillisillä periaatepäätöksillä Olkiluoto 3- ja Olkiluoto 4 -reaktoriyksiköiden käytetyn polttoaineen edellyttämän loppusijoituskapasiteetin lisätarpeen perusteella.

Rakentamislupahakemuksen yksi keskeinen osa on turvallisuusperustelu, jossa luvanhakija esittää ne turvallisuusargumentit, joilla se haluaa osoittaa suunnitelmansa loppusijoituslaitoksen turvallisuuden. Turvallisuuden todistamistaakka on luvanhakijalla eli tässä tapauksessa Posivalla. Viranomaisten, erityisesti Säteilyturvakeskuksen, tehtävänä on arvioida, täyttääkö turvallisuusperustelu tavoitteensa.

Turvallisuusperustelusta ei ole saatavilla helppotajuista suomenkielistä aineistoa yksissä kansissa, ja yksi tämän julkaisun kirjoittamisen tavoitteista onkin laatia katsaus, jonka lukeminen ei edellytä ennakkotietoja. Raportin omaksumista toki helpottaa luonnontieteellinen tai teknillismatemaattinen koulutustausta. Kirjoittajat edustavat kansallista ydinjätehuollon tutkimusohjelmaa (KYT), joka on ydinjätehuollon toimijoista riippumaton julkinen kotimainen tutkimusohjelma.

Julkaisun perustavoitteena on kuvata, mihin asioihin turvallisuusperustelussa kiinnitetään huomiota ja miksi. Näin ollen tavoitteena on kuvata yleisellä tasolla turvallisuusperustelun rakennetta ja turvallisuusargumentoinnin jäsentämistä. Turvallisuusperustelun metodiikka on kansainvälisen mielenkiinnon kohteena, ja tämä työ perustuukin osin kansainvälisiin selvityksiin. Myös saatavilla olevaa kotimaista ohjeistus- ja suunnitteluaineistoa hyödynnetään. Turvallisuusperustelun sisältöön raportti ei ota kantaa, sillä turvallisuusperustelun laatiminen on luvanhakijan vastuulla ja sen arvioiminen viranomaisten vastuulla.

Raportin luvuissa 2 ja 3 esitellään lyhyesti käytetyn ydinpolttoaineen huoltoa Suomessa ja muissa maissa. Luvussa 4 kuvataan turvallisuusperustelun rooli käytetyn polttoaineen huollosta. Luvussa 5 käydään läpi turvallisuusperustelun teknistä sisältöä kansainvälisten selvitysten pohjalta. Luvussa 6 tarkastellaan turvallisuusperustelutyötä Suomessa, etupäässä Posivan julkaistuja suunnitelmia ja Säteilyturvakeskuksen ohjeistusta. Luvussa 7 pohditaan tieteellisen tutkimuksen roolia turvallisuusperustelussa. Raportin liitteessä määritellään turvallisuusperusteluun liittyviä keskeisimpiä käsitteitä.

2. Käytetyn polttoaineen huolto Suomessa

Tässä luvussa kuvataan lyhyesti käytetyn ydinpolttoaineen huollon tekninen suunnitelma Suomessa ja huoltoon liittyvä suomalainen päätöksenteko työnjakoineen. Kiinnostunut lukija löytää yksityiskohtaisemman kuvauksen lähteestä STUK (2011b)¹.

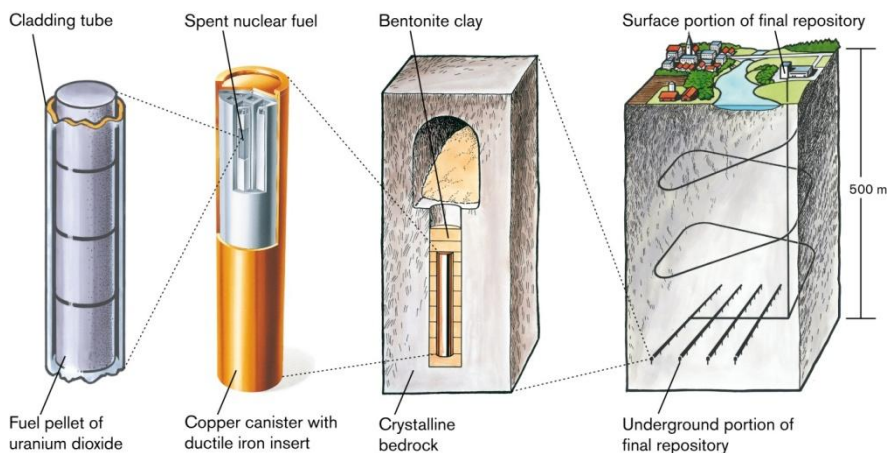
2.1 Tekninen suunnitelma

Käytetyn ydinpolttoaineen huoltosuunnitelma Suomessa perustuu syvälle kiteiseen kallioperään tehtävään loppusijoitukseen. Loppusijoitusta varten kallioperään louhitaan tunnelisto, josta käsin loppusijoitus toteutetaan. Käytetyt polttoaineput sijoitetaan kuparikapseliin, jonka sisällä olevassa valurautasisuksessa on valmiit paikat usealle polttoaineputelle. Kuparikapseli sijoitetaan loppusijoitustunnelin lattiaan kairattuun loppusijoitusreikään (yksi kapseli reikää kohti), jossa kapselin ympärille asetetaan bentoniittisavesta valmistettu bentoniittipuskuri. Lopuksi loppusijoitustunnelit täytetään erityisellä täyteaineella. Tätä loppusijoituskonseptia kutsutaan KBS-3-konseptiksi ja sitä kehitettiin aluksi Ruotsissa SKB-yhtiössä (Svensk Kärnbränslehantering AB), sittemmin konseptia on kehitetty yhteistyönä SKB:n ja Posiva Oy:n kanssa. Kuvassa 2.1 on periaatekuva käytetyn polttoaineen loppusijoitussuunnitelmasta, joka perustuu KBS-3-konseptiin².

¹ Maaraportti kuuluu käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuutta koskevaan IAEA:n (International Atomic Energy Agency) yleissopimukseen (Joint Convention), joka astui Suomessa voimaan 2001

(http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinjatteen/ydinjatteen_maailmalla_fi_FI/ydinjatekonventio/).

² KBS-3-konseptista on oikeastaan kaksi versiota, joita kumpaankin tutkitaan rinnan: KBS-3V (pystyversio, vertical, kuva 2.1) ja KBS-3H (vaakaversio, horizontal). Tässä keskitytään pystyversioon, koska sekä SKB:n että Posivan rakentamislupahakemus perustuu siihen. Toisin sanoen pystyversio on ns. referenssikonsepti.



Kuva 2.1. Periaatekuva käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusuunnitelmasta KBS-3 (<http://www.skb.se>).

KBS-3-konsepti perustuu useiden toisiaan varmentavien teknisten (ihmisen rakentamien) ja luonnollisten vapautumisesteiden käyttöön; kuvassa 2.1 onkin myös kuvaus eri vapautumisesteiden yhdessä muodostaman loppusijoitusjärjestelmän moniesteperiaatteesta. Turvallisuusperustelussa loppusijoitusjärjestelmän keskeisimmille vapautumisesteille ja muille tärkeille komponenteille (esim. sulkurakenteille) määritellään turvallisuustoiminto, ts. se, millä tavalla kyseinen komponentti edistää loppusijoitustilan pitkäaikaisturvallisuutta.

2.2 Päätöksenteko

Käytetyn ydinpolttoaineen huolto on merkittävä suomalainen ympäristönsuojeluhanke, jossa on mukana useita toimijoita ja jota ohjaa lukuisa joukko lakeja, valtioneuvoston asetuksia ja viranomaisohjeita. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi keskeisintä lainsäädäntöä ja viranomaisohjeita, suomalaista päätöksentekoa, suomalaista työnjakoa eri toimijoiden kesken, käytetyn polttoaineen huollon aikataulua ja kustannuksiin varautumista.

2.2.1 Lainsäädäntö ja viranomaisohjeet

Ydinenergialaki (990/1987) sääntelee keskeisesti kaikkea ydinjätehuoltoa Suomessa. Siinä on mm. kuvattu ydinjätehuollon yleiset periaatteet, eri osapuolten velvollisuudet, lupamenettelyt ja periaatepäätös, varautuminen kustannuksiin, sekä valvonta (<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990>). Ydinenergialakia on sittemmin muutettu useaan otteeseen, esim. vuonna 2003 lakia täydennettiin asiantuntemuksen varmistamisen aihepiiristä ja vuonna 2008 se saatettiin

perustuslain mukaiseksi. Ydinenergia-asetuksessa (161/1988) tarkennettiin osaltaan ydinenergiain määrittelyjä.

Käytetyn ydinpolttoaineen huollon turvallisuutta sääntelee erityisesti Säteilyturvakeskuksen YVL-ohjeisto, joka perustuu ydinenergialakiin ja muihin ydinjätehuoltoon vaikuttaviin lakeihin ja asetuksiin. Koko YVL-ohjeisto on parhaillaan uudistuksessa, ja useista ohjeista on jo luonnostekstit käytettävissä. Erityisesti YVL D.5 (STUK 2011a) on olennainen käytetyn polttoaineen huollon valmistelussa. YVL D.5-ohjeessa on mm. määritelty loppusijoituslaitoksen turvallisuuden todentamisperiaatteet ja todetaan turvallisuusperustelun tarkoitus ja vähimmäissisältö:

”704. Pitkäaikaisturvallisuutta koskevien säteilyturvallisuusvaatimusten täyttyminen sekä loppusijoitusmenetelmän ja loppusijoituspaikan soveltuvuus on osoitettava turvallisuusperustelulla, johon on sisällyttävä ainakin

- loppusijoitusjärjestelmän kuvaus sekä vapautumisesteiden ja turvallisuustoimintojen määrittely*
- tavoitteiden määrittäminen turvallisuustoiminnoille*
- loppusijoitusjärjestelmän mahdollista tulevaa käyttäytymistä kuvaavien kehityskulkujen määrittely (skenaarioanalyysi)*
- loppusijoitusjärjestelmän toiminnan kuvaus konseptuaalisten ja matemaattisten mallien avulla ja niissä tarvittavien lähtötietojen määrittäminen*
- loppusijoitettavasta jätteestä vapautumisesteiden läpi elinympäristöön vapautuvien radioaktiivisten aineiden määrien ja niistä aiheutuvien säteilyannosten määrittäminen*
- silloin kun käytännössä mahdollista, pitkäaikaisturvallisuutta heikentävistä epätodennäköisistä tapahtumista aiheutuvien aktiivisuuspäästöjen ja säteilyannosten todennäköisyyksien arviointi*
- epävarmuus- ja herkkyysanalyysit sekä kvalitatiiviset lisätarkastelut*
- analyysien tulosten vertaaminen turvallisuusvaatimuksiin.”*

2.2.2 Työnjako Suomessa

Ydinjätehuollon työnjako on Suomessa varsin selkeä johtuen osaltaan selkeästä lainsäädännöstä. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) on koko ydinenergia-alan ylin viranomainen. Ministeriö vastaa ydinenergiaan liittyvästä lainsäädännöstä sekä kansainvälisistä sopimuksista Suomen osalta. Lainsäädännön (ydinenergialaki ja -asetus sekä Valtioneuvoston asetukset (733, 734, 735 ja 736/2008)) muutosten valmisteluun osallistuu aktiivisesti myös Säteilyturvakeskus. Kansainvälisessä työssä erityisen tärkeitä ovat EU-lainsäädäntö, Euratom-lainsäädäntö sekä kansainväliset sopimukset esim. IAEA:n (International Atomic Energy Agency) ja OECD/NEA:n (Nuclear Energy Agency) kanssa. TEM valvoo osaltaan ydinjätehuollon suunnittelua ja toteutusta sekä hallinnoi Valtion ydinjätehuoltorahaston (VYR) toimintaa. Ministeriö pyytää tärkeimmissä valmistelutehtävissään lausuntoja useilta eri tahoilta.

Säteilyturvakeskus (STUK) on Suomen säteilyturvallisuusviranomainen ja vastaa säteilyn käytön ja ydinturvallisuuden valvonnasta. Yksi STUKin työn tärkeä

lähtökohta on yksityiskohtaisen säännöstön valmistelu, esim. edellä mainitut YVL-ohjeet. Säännöstössä muotoillaan suomalaiset turvallisuuskriteerit, joihin vertaamalla suomalaiset luvanhakijat pyrkivät osoittamaan ydinlaitoksensa turvallisuuden. STUKin turvallisuusvalvonta kattaa esim. suunnitelmien tarkastukset ja luvanhaltijaan kohdistuvat tarkastukset. STUK valvoo myös luvanhakijan ja -haltijan johtamisjärjestelmää. Käytetyn polttoaineen huollon tapauksessa STUKin tehtäviin kuuluu erityisesti Posivan rakentamislupahakemuksen tueksi liitetyn turvallisuusperustelun tarkastaminen. Toinen STUKin keskeinen tehtävä on ONKALON valvonta. ONKALO on Posivan maanalainen kallioperän tutkimustila, jolla tutkitaan kaavaillun loppusijoituspaikan, Eurajoen Olkiluodon, soveltuvuutta loppusijoitukseen.

Ydinjätteen tuottajat ovat ydinenergialain mukaisesti velvollisia huolehtimaan tuottamiensa jätteiden huollosta. Käytetyn ydinpolttoaineen tapauksessa lain edessä jätehuoltovelvollisia ovat siis jätteitä tuottaneet voimayhtiöt, Teollisuuden Voima Oyj ja Fortum Power and Heat Oy. Työn toteutus on delegoitu näiden yhtiöiden yhdessä omistamalle Posiva Oy:lle. Jätehuoltovelvollisten on yksikäsitteisesti huolehdittava jätehuollon suunnittelusta, toteuttamisesta ja kustannuksista.

2.2.3 Päätöksenteon aikataulu

Merkittäviin ydinlaitoksiin, kuten käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitokseen, liittyvä päätöksenteko on Suomessa porrastettu. Tästä seuraa esim. se, että tutkimustiedolle asetettavat vaatimukset kasvavat siirryttäessä seuraavalle päätöksenteon portaalle. Kullakin portaalla päätöksenteon pohjana on tietenkin käytettävä olemassa olevaa parasta tutkimustietoa.

Posiva Oy:n käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksen päätöksenteon ensimmäinen vaihe oli hallituksen vuonna 2000 tekemä ja eduskunnan vuonna 2001 hyväksymä periaatepäätös (PAP). Tämä periaatepäätös koski toiminnassa olevien ydinvoimaloiden käytettyä polttoainetta, ja vuonna 2002 eduskunta hyväksyi tarkennetun periaatepäätöksen, että myös Suomen 5. ydinvoimalan (Olkiluoto 3) käytetty polttoaine voidaan loppusijoittaa Olkiluodon kallioperään. Seuraavaksi Valtioneuvosto teki Posiva Oy:n hakemuksesta periaatepäätöksen 6.5.2010 ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen laajentamiseksi Olkiluoto 4 -yksikköä varten ja eduskunta vahvisti periaatepäätöksen 1.7.2010. Seuraava päätöksenteon etappi on loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemus, jonka Posiva jätti valtioneuvostolle 28.12.2012. Sitä seuraava lupavaihe on käyttölupahakemus, jonka Posiva on suunnitellut jättävänsä valtioneuvostolle vuonna 2020 nykyisen aikataulun mukaan, jolloin kaavailujen mukaan käytetyn polttoaineen loppusijoitus alkaisi noin vuonna 2022³. Loppusijoituslaitos olisi nykyisen aikataulun mukaan käytössä noin

³http://www.posiva.fi/ajankohtaista/muita_ajankohtaisia_asioita/tyot_olkiluodossa_kaantuvat_kohti_loppusijoituksen_toteutusta.html

100 vuotta, joten Posiva olisi jättämässä loppusijoituslaitoksen sulkemislupahakemuksen valtioneuvostolle noin vuonna 2120. Sen jälkeen kun loppusijoituslaitos on asianmukaisesti, viranomaisten hyväksymällä tavalla suljettu, se siirtyy valtion vastuulle.

2.2.4 Kustannuksiin varautuminen

Edellä mainittiin, että ydinjätehuoltovelvollisten on katettava jätehuollon kaikki kulut. Sen varmistamiseksi, että jätehuolto voidaan rahoituksen puolesta toteuttaa kaikissa oloissa, Suomeen on perustettu Valtion ydinjätehuoltorahasto (VYR), joka toimii työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa. Jätehuoltovelvollinen maksaa vuosittain Valtion ydinjätehuoltorahastoon omaa vastuumääräänsä vastaavan summan rahaa (osa vastuumäärästä voidaan kattaa myös vakuuksilla). Jätehuoltovelvollisen vastuumäärä kattaa sen tarkasteluhetkeen asti tuottamien jätteiden huollosta tulevaisuudessa syntyvät kustannukset. Jätehuoltovelvollisen vastuumäärä muuttuu sen tehdessä jätehuollon toimenpiteitä sekä sen jätemäärän kasvaessa. Virallisesti vastuumäärien päivitykset perustellaan laajemmin kolmen vuoden välein VYR:ssä, mutta vuosittain täsmennetään kustannusarvioita muun muassa jätemäärien kasvun perusteella.

Valtion ydinjätehuoltorahasto on tavallaan ”suunnitelma B”, jonka varoin jätehuolto voidaan toteuttaa, vaikka jätehuoltovelvolliset ajautuisivat konkurssiin. Suunnitelma A on, että jätehuoltovelvolliset kattavat tuottamiensa jätteiden huollon suoraan. Toteutushankkeen vaiheittaisen etenemisen myötä jätehuoltovelvollisen vastuumäärä pienenee, mutta toisaalta käytetyn polttoaineen ja muiden ydinjätteiden määrän kasvamisen myötä sen vastuumäärä kasvaa.

Suomessa ydinjätehuollon kustannuksia tarkastellaan kokonaisuutena, joten Valtion ydinjätehuoltorahastoon kerätään varat kaikkien ydinenergiatuotannon ja VTT:n tutkimusreaktorin tuottamien ydinjätteiden turvalliseen huoltamiseen. Näin ollen rahasto kattaa käytetyn polttoaineen, ydinvoimaloiden käytöstä aiheutuvien voimalaitosjätteiden sekä ydinvoimaloiden ja VTT:n tutkimusreaktorin käytöstäpoistosta aikanaan syntyvien purkujätteiden huollon. Kiinnostunut lukija saa lisätietoja Valtion ydinjätehuoltorahastosta työ- ja elinkeinoministeriön sivuilta, esim. <https://www.tem.fi/index.phtml?s=1550>. Eri maissa voi olla erilaiset kustannuksiin varautumisen suunnitelmat, minkä vuoksi eri maiden kustannusarvioiden vertailu ei aina ole helppoa.

3. Käytetyn polttoaineen huolto muissa maissa

Käytetyn ydinpolttoaineen huollolle on kansainvälisessä ydinjäteyhteisössä esitetty muutama perusvaihtoehto. Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti näitä perusvaihtoehtoja ja sitä, missä vaiheessa käytetyn polttoaineen huolto on muissa maissa.

3.1 Esitetyt perusvaihtoehdot ja Suomi

Käytetyn ydinpolttoaineen huolto voidaan periaatteessa jakaa alkuvaiheen ratkaisujen pohjalta kolmeen perusvaihtoehtoon:

- avoin polttoainekierto, johon liittyy käytetyn polttoaineen suora loppusijoitus
- suljettu polttoainekierto, johon liittyy käytetyn polttoaineen ydinfysikaalisesti halkeavan⁴ aineen kierrätys (ns. jälleenkäsittely)
- hyvin pitkäaikainen välivarastointi.

Avoimessa polttoainekierrrossa käytetty ydinpolttoaine loppusijoitetaan syväälle kallioperään, kuten kiteiseen kallioperään tai savikivi- tai suolakivimuodostumiin. Loppusijoituksen turvallisuus perustuu ehdotetuissa teknisissä ratkaisuissa moninkertaisten vapautumisesteiden käyttämiseen. Näiden esteiden avulla varmistetaan, että ydinjätettä ei pääse haitallisessa määrin elolliseen luontoon tai ihmisten ulottuville.

Suljetussa polttoainekierrrossa käytetty polttoaine jälleenkäsitellään, ja polttoaineksi kelpaavat uraani ja plutonium hyödynnetään edelleen. Käsittelyprosessista jää jäljelle voimakkaasti radioaktiivista jälleenkäsittelyjätettä, joka on loppusijoitettava. Vain osa jälleenkäsittelyssä erotetusta plutoniumista ja uraanista voidaan käytännössä hyödyntää polttoaineen valmistukseen käytettäväksi nykyisen tyyppisissä kevytvesireaktoreissa. Nykytekniikalla kierrätys on mahdollista vain kerran ja

⁴ Määritelmämielessä halkeava aine on termisillä neutroneilla ydinfysikaalisesti halkeava materiaali, ja halkeamiskelpoinen aine on joko termisillä tai nopeilla neutroneilla ydinfysikaalisesti halkeava materiaali.

sen jälkeen muodostuvaa käytettyä polttoainetta ei voida nykytekniikalla jälleenkäsittellä uudestaan. Ei-sotilaalliseen käyttöön suunniteltuja jälleenkäsittelylaitoksia on tällä hetkellä Ranskalla, Isolla-Britannialla, Venäjällä, Japanilla ja Intialla, ja Kiina on rakentamassa jälleenkäsittelylaitosta. Suljettu polttoainekierto onkin suurten ydinenergiamaiden strategia.

Jälleenkäsittelyn lopputuloksena syntyy korkea-aktiivista lasitettua jätettä sekä erilaisia matala- ja keskiaktiivisia jätteitä. Lasitetun jätteen loppusijoitustarve ja loppusijoituksen turvallisuustekninen vaativuus ovat periaatteessa samat kuin avoimessa polttoainekierrossa syntyvän käytetyn ydinpolttoaineenkin. Myös syntyneiden matala- ja keskiaktiivisten jätteiden loppusijoituksesta on luonnollisesti huolehdittava asianmukaisesti.

Jälleenkäsittelystrategiasta on pyritty kehittämään myös tehostettu jälleenkäsittely ja transmutaatio -strategia eli ns. erottelu ja transmutaatio (P&T, partitioning & transmutation). Tässä strategiassa tavoitellaan tekniikkaa, jolla vaarallisimmat radioaktiiviset aineet voitaisiin ydinfysikaalisesti muuntaa vähemmän vaaralliseen muotoon. Tehostetun jälleenkäsittelytekniikan myötä voidaan erotettujen aineiden kierrätystä toistaa useamman kerran. Tämän ns. transmutoinnin tavoitteena on lyhentää sitä aikaväliä, jonka kuluessa kyseiset aineet voivat aiheuttaa vaaraa. Transmutaatiohankkeet ovat vielä verrattain varhaisella kehitysasteella, ja menetelmän todelliset tekniset mahdollisuudet ovat osoittamatta. Periaatteellisena vaihtoehtona transmutaatio ei kuitenkaan ole uusi ajatus, vaan sen ydinfysikaaliset perusteet on esitetty jo kymmeniä vuosia sitten.

Pitkäaikainen välivarastointi voidaan periaatteessa toteuttaa märkänä tai kuivana. Käytettyä polttoainetta säilytetään nykyisin useimmiten vesiallasvarastoissa. Näin tapahtuu mm. Suomen ydinvoimalaitoksilla. Tästä niin sanotusta märkävarastoinnista on käytettävissä kokemuksia jo usealta vuosikymmeneltä.

Samoin kuin vesiallasvarastointi, kuivavarastointikin on mahdollista toteuttaa joko maanalaisena tai maanpäällisenä. Polttoaine-elementtejä on pidettävä ennen varastoon siirtämistä muutaman vuoden ajan reaktoreiden yhteydessä olevissa vesialtaissa tai vesiallasvälivarastoissa. Tämän vesijäähdytysvaiheen jälkeen käytetyssä polttoaineessa syntyvän jälkilämmön poistamiseen riittää kuivavarastoinnissa ilman luonnolliseen kiertoon perustuva jäähdytys.

Pitkäaikaista välivarastointia ei tietenkään voi pitää lopullisena ydinjätehuollon ratkaisuna, vaan sen on käytännössä kytkeydyttävä loppusijoitukseen tähtäävään hankkeeseen. Pitkäaikaisen välivarastoinnin avulla voidaan kuitenkin periaatteessa "voittaa aikaa" loppusijoitushankkeen päätöksenteolle ja tekniselle valmistelulle.

Taulukossa 3.1 on esitetty yhteenveto edellä mainittujen perusvaihtoehtojen eduista ja haitoista sekä niiden soveltumisesta Suomen ydinenergiaohjelmaan.

Taulukko 3.1. Yhteenveto käytetyn ydinpolttoaineen huollon ja loppusijoituksen vaihtoehtoisten ratkaisujen eduista ja haitoista sekä sovellettavuudesta Suomen olosuhteissa (Anttila ym. 1999, Vuori & Rasilainen 2009).

Vaihtoehto	Edut	Haitat	Soveltamismahdollisuudet Suomessa
Suora loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> Käsittelyvaiheita vähän ja käyttöhenkilökunnan säteilyaltistus pieni Perusteknologia olemassa Suuria kertavaikutuksia aiheuttavat tapahtumat erittäin epätodennäköisiä 	<ul style="list-style-type: none"> Kaikki pitkäikäiset radioaktiiviset aineet mukana jätteessä, joten potentiaalinen vaarallisuus kestää pitkään Uraanivarojen käyttötehokkuus huono 	<ul style="list-style-type: none"> Perusratkaisumalli Suomessa Täyttää ydinenergialain vaatimukset käsittelystä ja pysyvästä sijoittamisesta Suomeen; myös palauttamisen mahdollista
Jälleenkäsittely ja loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> Uraanivaroja voidaan käyttää tehokkaammin ja uraanin väkevöintitarve pienempi Uraanin ja plutoniumin määrä jätteessä pienempi ja mahdollinen vaarallisuus pitkällä aikavälillä alhaisempi 	<ul style="list-style-type: none"> Useita käsittelyvaiheita, mikä lisää käyttöhenkilökunnan säteilyannoksia; häiriötilanteissa voi aiheutua päästöjä ympäristöön Kustannukset kasvavat Useita loppusijoitettavia jätetyyppejä; kokonaistilavuus ei olennaisesti pienene Ydinase materiaalien leviämisen riski suurempi 	<ul style="list-style-type: none"> Kustannus- ja muista syistä johtuen olisi epätarkoituksenmukaista rakentaa pelkästään Suomen tarpeisiin jälleenkäsittelylaitosta Nykyisessä muodossaan ydinenergialaki ei salli ulkomaisten jälleenkäsittelypalvelujen käyttöä
Jälleenkäsittely, lisäerottelu, transmutaatio, loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> Pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden määrä jätteessä vähenee Potentiaalisen vaarallisuuden ajanjakso lyhenee Osana kehittyntä ydinenergiajärjestelmää voisi olla edullinen ratkaisu 	<ul style="list-style-type: none"> Tarvittava jälleenkäsittelyteknologia monimutkaista ja kasvattaa edelleen kustannuksia Ydinase materiaalin valmistusteknologian leviämisen riski voi lisääntyä Teknologia ei ole käytettävissä vielä, vaan vaatii huomattavaa lisäkehitystä Toteutettavuus epävarmaa 	<ul style="list-style-type: none"> Suomen ydinvoimaohjelma on liian suppea itsenäiseen soveltamiseen Ottaen huomioon jo perusvaihtoehtoon sisältyvän väli-varastoinnin ja loppusijoituksen palautettavuuden tarvitessa tulevaisuudessa voidaan periaatteessa hyödyntää mahdollisesti kehittyviä kansainvälisiä palveluita
Valvottu pitkäaikainen väli-varastointi	<ul style="list-style-type: none"> Valvonta mahdollista Mahdollistaa vaihtoehtojen uudelleen harkinnan: palautettavuus suhteellisen yksinkertaista Teknologia olemassa 	<ul style="list-style-type: none"> Siirtää vastuuta tuleville polville Turvallisuus vaatii aktiivista valvontaa Vaatii jatkuvaa ydinmateriaalivalvontaa Ei voi olla lopullinen ratkaisu 	<ul style="list-style-type: none"> Nykyisten väli-varastojen käyttöä voidaan jatkaa jopa 100 vuotta Mahdollisen uudentyyppisen väli-varaston rakentamispäätös tarvitaan vasta vuosikymmenien päästä

3.2 Käytetyn ydinpolttoaineen huolto muissa maissa

Käytetyn ydinpolttoaineen huolto on teknisesti haastavaa, koska jätteen ominaisaktiivisuus on suuri⁵ ja koska jäte sisältää erittäin pitkäikäisiä radionuklideja, jolloin jäte säilyy säteilyvaarallisena pitkään. Tässä mielessä ei ole olennaista eroa sillä, huolletaanko käytetty polttoaine suorassa vai suljetussa ydinpolttoainekierrrossa. Samat tekijät ovat mukana myös jälleenkäsittelystä syntyneessä lasitetussa jälleenkäsittelyjätteessä. Siksi jätehuolto-ohjelmat sekä käytetyn polttoaineen että jälleenkäsittelyjätteen osalta ovat kohdanneet monissa maissa pelkoa ja epäluuloa. Monissa maissa jätehuolto-ohjelmat ovat merkittävästi jäljessä Suomen tilanteesta, koska päätöksenteko ei ole edennyt.

Eri ydinenergiamaiden geologiset olosuhteet poikkeavat toisistaan suuresti. Geologisesti Suomi ja Ruotsi ovat maapallon vanhimpiin muodostumiin lukeutuvalle Fennoskandian kilvellä (1 300–3 300 Ma⁶), jossa kivilajit ovat syvällä maan kuoressa kiteytyneitä. Vastaavia syväkiviä tavataan myös nuorempien vuorijonomuodostumien (n. 50–100 Ma), kuten Alppien ja Himalajan, juuriosissa. Näille tässä yhteydessä kiteisiksi kiviksi kutsutuille kiville on luonteenomaista hyvin vähäinen huokoisuus, kovuus ja toisaalta rakoilu. Savikiviä esiintyy laajalti mm. Keski-Euroopassa, ja ne ovat alun perin meren pohjaan kerrostunutta savea. Ajan mittaan tapahtuneesta uudelleenkiteytymisestäään huolimatta ne ovat tyypillisesti selvästi huokoisempaa ja pienikiteisempää ainesta kuin kiteinen kivi, mutta savikivien etuna on vähäisempi taipumus rakoiluun ja jopa tietyn asteisen plastisuuden ansiosta tapahtuva rakojen sulkeutuminen ja tiivistyminen. Kaikkein plastisimmin käyttäytyvä loppusijoitusratkaisuna tutkittu kivilaji on vuorisuolo, jossa ei myöskään juuri ole radionuklidien kulkeutumista edistävää vettä. Edellä mainituista geologisista perusratkaisuista poikkeaa vielä selvästi USA:ssa tutkittu vulkaaninen tuhkakivi.

Edellä mainituista käytetyn ydinpolttoaineen huollon perusvaihtoehdoista on eri maissa useita muunnelmia, vallitsevien geologisten olosuhteiden, maan ydinenergiaohjelman koon tai maan ydinjätehuollon ohjelman aikataulun mukaan. Esimerkiksi kapselointivaihtoehdot ja toteutustekniikka ovat monissa maissa vielä avoimia kysymyksiä, mikä osaltaan vaikuttaa myös kapselin ja kallon väliin suunnitellulta puskurilta vaadittaviin ominaisuuksiin ja puskurin toteutukseen. Seuraavassa esitetään yhteenveto eri maiden suunnitelmista. Tarkastelu perustuu katsaukseen Vuori & Rasilainen (2009), joka on aihepiiristä viimeksi julkaistu suomenkielinen yhteenveto.

⁵ Jätteen tilavuus on pieni, mutta pienessä tilavuudessa on suuri määrä säteilevää materiaalia, jolloin säteilyn annosnopeus käytetyn polttoaineen luonnollisella käsittelyetäisyydellä on myös suuri.

⁶ Maapallon iäksi arvioidaan noin 4,5 miljardia vuotta (4 500 Ma).

Taulukko 3.2. Eri maissa raportoidut käytetyn ydinpolttoaineen huollon perusratkaisut ja geologisessa loppusijoituksessa tutkitut kalliomuodostumat sekä aikataulu. Perustuu lähteeseen Vuori & Rasilainen (2009).

Maa	Perusratkaisu		Loppusijoituspaikka, kivilaji(t)	Aikataulu
	Jälleenkäsittely	Suora loppusijoitus		
Argentiina	valinta avoin			Kuiva väliavarastointi 50–100 vuotta.
Belgia	(X)	X	Savi (Boom Clay) Kalliolaboratorio HADES; Mol (SCK·CEN) Sijoituspaikan valinta v. 2013 valmistuvan turvallisuusanalyysin perusteella.	Perusratkaisu avoin; jälleenkäsittely keskeytetty. Suunnitelma hallituksen periaatepäätöstä varten 2010. Luvitusprosessin käynnistys v. 2025.
Brasilia	X			
Bulgaria	X		Korkea-aktiivisen jätteen loppusijoitus Bulgariassa; konseptista päätös 2012.	Keskitetty välivarasto käytetylle polttoaineelle; myös kuljetuksia Venäjälle jälleenkäsiteltäväksi jatkettu.
Espanja		X	Sijoituspaikan valintaselvitykset on toistaiseksi keskeytetty.	Ohjelma keskeytyksissä ainakin vuoteen 2010 asti; loppusijoitus ehkä 2050.
Etelä-Korea		X	Ei vielä paikkakohtaisia loppusijoituspalveluita.	Keskitetyn väliaikaisvaraston paikanvalinta keskeytetty ja loppusijoitus avoin.
Hollanti		X		Keskitetty väliavarastointi \geq 100 vuotta ennen lopullista päätöstä.
Intia	X		Sijoituspaikan valinnassa keskitytään maan luoteisosaan.	Aikataulutavoitteista ei tietoa.
Iso-Britannia	X	X	Sijoituspaikan valinta kansallisen suunnitelman (2008) mukaisesti.	Loppusijoitustilan käyttöönotolle ei aikataulutavoitetta. Mahdollisten uusien reaktorien osalta ei jälleenkäsittelyä.
Japani	X		Kaksi kalliolaboratoriota (kiteinen kallio ja savi).	Oma jälleenkäsittelylaitos valmistumassa; loppusijoituslaitoksen käyttöönotto tavoite v. 2035.
Kanada		X	Kiteinen kallioperä, vaihteittain etenevä, sopeutettavissa oleva sijoituspaikan valinta.	Loppusijoitustilan käyttöönotto 2030-luvun jälkipuoliskolla.

3. Käytetyn polttoaineen huolto muissa maissa

Maa	Perusratkaisu		Loppusijoituspaikka, kivilaji(t)	Aikataulu
	Jälleenkäsittely	Suora loppusijoitus		
Kiina	X		Kiteinen kallio; sijoituspaikkatutkimuksia Beishan alueella (Gobin automaa).	Keskitetty välivarasto suunnitteilla. Loppusijoituksen aloituksen aikataulutavoite 2050.
Liettua		X		Vähintään 50 vuoden välivarastointi ennen loppusijoitusta.
Meksiko		X		
Pakistan		X		
Ranska	X		Tutkittu Buren aluetta, jossa kalliolaboratorio (savi).	Sijoituspaikan valinta 2015. Loppusijoituksen aloitus 2025.
Romania		X		Keskitetystä välivarastosta toteutettu 3 moduulia; loppusijoituslaitoksen käyttö 2055→.
Ruotsi		X	Östhammar valittu 2009; kiteinen kivi.	Keskitetty käytetyn polttoaineen välivarasto. Loppusijoituksen aloitus 2023.
Saksa		X	Paikkatutkimuksia aiotaan jatkaa Gorlebenissä (suolamuodostuma).	Jälleenkäsittely keskeytetty 2005; loppusijoitustila käyttöön 2035.
Slovakia		X		Paikkatutkimukset keskeytyksissä, välivarastointia 40–50 vuotta.
Slovenia/ Kroatia		X		Loppusijoituksen aloitus 2065.
Suomi		X	Olkiluoto; kiteinen kivi.	Rakentamislupahakemus 2012. Loppusijoituksen aloitus 2020.
Sveitsi	X	X	Savi; kolme aluetta valittu sijoituspaikkatutkimuksiin.	Keskusvälivarasto käytössä; loppusijoituspaikan valintaprosessi kolmivaiheinen, loppusijoituslaitoksen rakentaminen 2040 → ja käyttöönotto aikaisintaan v. 2050 (loppusijoitus valvottu, palautettavissa).
Taiwan	valinta avoin			
Tšekki	(X)	X	Kuusi potentiaalista sijoituspaikkavaihtoehtoa valittu.	Paikanvalinta 2025, kalliolaboratorio 2030; loppusijoituksen aloitus ennen 2065.
Ukraina	X	X		

3. Käytetyn polttoaineen huolto muissa maissa

Maa	Perusratkaisu		Loppusijoituspaikka, kivilaji(t)	Aikataulu
	Jälleenkäsittely	Suora loppusijoitus		
Unkari	(X)	X	Kalliolaboratorio 2012; savimuodostuma (Boda).	Loppusijoituksen aloitus ennen 2050.
Venäjä	X		Sijoituspaikkatutkimuksia mm. Tseljabinskin ja Krasnojarskin alueilla.	Tavoiteaikataulu loppusijoituslaitoksen käyttöönotolle 2025–2030.
Yhdysvallat		X	Tuhkakivi / Yucca Mountain -hankkeen jatko epäselvässä tilanteessa.	Ennen v. 2009 alun uusia linjauksia loppusijoituslaitoksen arvioitu käyttöönotto oli n. 2020. Myös palaamista jälleenkäsittelyvaihtoehtoon on harkittu.

Taulukon 3.2 tiedot perustuvat vuoden 2009 tilanteeseen, minkä jälkeen kuva on voinut jonkin verran tarkentua. Ydinjätehuollon perusratkaisut tosin edellyttävät pitkäaikaista sitoutumista, joten ne eivät ole kovin alttiita nopeille muutoksille. Kiinnostunut lukija voi halutessaan perehtyä eräiden maiden uusimpiin käytetyn polttoaineen huollon suunnitelmiin IAEA:n (International Atomic Energy Agency) Joint Convention -verkkosivuilla (<http://www-ns.iaea.org/conventions/results-meetings.asp?s=6&l=40>). Joint Convention on merkittävä kansainvälinen käytetyn ydinpolttoaineen ja radioaktiivisten jätteiden huollon turvallisuutta koskeva yleissopimus, jossa Suomi on mukana ja johon liittyy esim. maaraporttien laatiminen määräajoin; Suomessa STUK on vastannut maaraporttien laatimisesta. Eri maiden ydinjätehuollon strategioista on myös tuore yhteenveto lähteessä Peachey (2012).

4. Turvallisuusperustelun rooli käytetyn ydinpolttoaineen huollossa

Käytetyn ydinpolttoaineen huolto koostuu useista peräkkäisistä teknisistä vaiheista. Tässä luvussa rajataan tarkastelu niihin vaiheisiin, jotka sisältyvät turvallisuusperusteluun. Sen jälkeen tarkastellaan, miten KBS-3-konsepti käsitellään turvallisuusperustelussa. Lopuksi kuvataan turvallisuusperustelun rooli päätöksenteossa.

4.1 Turvallisuusperustelu käytetyn polttoaineen huollon ketjussa

Käytetyn polttoaineen siirto voimalaitoksen sisällä on huoltoketjun ensimmäinen vaihe, ja siinä polttoaine siirretään reaktorista välivarastoon. Siirrot toteutetaan käyttämällä erityisiä siirtoastioita. Seuraavassa vaiheessa käytetty polttoaine kuljetetaan välivarastosta loppusijoituspaikalle. Kuljetuksissa käytetään erityisiä, tarkoitukseen suunniteltuja ja tarkkaan testattuja kuljetusastioita; siirroissa käytettävät siirtoastiat on tarkoitettu vain laitosalueella tehtäviin siirtoihin. Siirtojen ja kuljetusten turvallisuus arvioidaan erikseen.

Posivan suunnittelema loppusijoituslaitos koostuu maanpäällisestä kapselointilaitoksesta ja syvälle kallioon louhittavasta loppusijoitustilasta (Posiva 2012). Aikataulun mukaan loppusijoituslaitos olisi auki noin 100 vuotta. Sen kuluessa loppusijoitustunneleita louhitaan vaiheistetuksi loppusijoitettavien kapselien saapumisnopeuden mukaisesti: kapseloiden laajaa puskurivarastoa ei suunnitella kapselointilaitokselle. Sitä mukaa kun loppusijoitustunnelien lattiaan kairatut kapseloiden sijoitusreiät täyttyvät (yksi kapseli reikää kohti), tunnelit täytetään. Loppusijoituslaitoksen käytönaikainen turvallisuus arvioidaan erikseen.

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuus arvioidaan turvallisuusperustelun avulla. Suomessa turvallisuusperustelu kattaa nimenomaan pitkäaikaisturvallisuuden (YVL D.5), joissain maissa se sisältää myös esim. käytönaikaisen turvallisuuden.

4.2 KBS-3-konseptin käsittely turvallisuusperustelussa

Turvallisuusperustelussa loppusijoitustila-kallioperä-järjestelmää tarkastellaan sillä tarkkuudella kuin pitkäaikaisturvallisuuden arvioimiseksi on tarpeen. Järjestelmän keskeisimmät tekniset vapautumisesteet ovat kapseli, bentoniittipuskuri ja loppusijoitustunnelien täyteaine, vrt. kuva 2.1. Luonnollinen vapautumiseste on kallioperä. Näille keskeisille loppusijoitustila-kallioperä-järjestelmän vapautumisesteille määritetään valtioneuvoston asetuksen (VNA 736/2008) ja STUKin YVL D.5 -ohjeen mukaisesti turvallisuustoiminnot, toisin sanoen kuvataan, miten kyseinen vapautumiseste edistää loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta. Edellä mainittujen vapautumisesteiden lisäksi keskeisimmille loppusijoitustilan sulkurakenteille määritellään turvallisuustoiminnot.

Turvallisuusperustelu tarkentuu sisällöllisesti siten, että vaatimukset kasvavat edettäessä päätöksentekoportaikossa eteenpäin, ja samalla voidaan myös tarkentaa turvallisuustoimintojen kuvausta. Taulukossa 4.1 on esitetty Posivan YJH-2012 -suunnitelmassa kuvatut turvallisuustoiminnot. Havaitaan, että useimmille kallioperä-loppusijoitusjärjestelmän komponenteille on määritelty lukuisia eri turvallisuustoimintoja. Sen sijaan biosfäärille ei ole määritelty turvallisuustoimintoja.

Taulukko 4.1. Käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksen turvallisuustoiminnot (Posiva 2012, 2009).

Vapautumiseste	Turvallisuustoiminnot (YJH-2012)
Kapseli	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Varmistaa käytetyn polttoaineen pitkäaikainen pysyminen suojarakenteiden sisällä (containment). Tämä turvallisuustoiminto nojaa ennen kaikkea kapselin valurautaisen sisäosan mekaaniseen kestävyys- ja kuparisen ulkokuoren korroosionkestävyyteen.
Puskuri	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Myötävaikuttaa kapselille suotuisten ja ennustettavissa olevien mekaanisten, geokemiallisten ja hydrogeologisten olosuhteiden muodostumiseen. ▪ Suojaa kapseleita ulkoisilta prosesseilta, jotka voisivat vaarantaa käytetyn polttoaineen ja sen sisältämien radionuklidien täydellistä suojaamista (containment). ▪ Rajoittaa ja hidastaa radionuklidien vapautumista kapselin rikkoutuessa. ▪ KBS-3H*(TKS-2009, Posiva 2009): <ul style="list-style-type: none"> ▪ eristää asennuspakkaukset hydraulisesti toisistaan ja estää näin virtaus- ja kulkeutumisreittien muodostuminen puskuri-kallio-rajapinnalla.
Sijoitustunnelin täyttö	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Myötävaikuttaa puskurille ja kapselille suotuisten ja ennustettavissa olevien mekaanisten, geokemiallisten ja hydrogeologisten olosuhteiden muodostumiseen. ▪ Rajoittaa ja hidastaa radionuklidien vapautumista kapselin mahdollisesti rikkoutuessa. ▪ Myötävaikuttaa loppusijoitustunnelien lähikallion mekaaniseen vakauteen.
Sulkeminen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loppusijoitustilan pitkäaikainen eristäminen pintaympäristöstä sekä ihmisten, kasvien ja eläinten normaalista elinympäristöstä. ▪ Myötävaikuttaa muille teknisille vapautumisesteille suotuisten ja ennustettavissa olevien geokemiallisten ja hydrogeologisten olosuhteiden muodostumiseen estämällä merkittävien vettä johtavien virtausreittien muodostumisen tilojen läpi. ▪ Rajoittaa ja hidastaa veden virtausta loppusijoitustilaan ja haitallisten aineiden vapautumista loppusijoitustilasta.

4. Turvallisuusperustelun rooli käytetyn ydinpolttoaineen huollossa

Kallioperä	<ul style="list-style-type: none">▪ Erottaa fyysisesti käytetyn polttoaineen pintaympäristöstä sekä ihmisten, kasvien ja eläinten normaalista elinympäristöstä, rajoittaa ihmisen tunkeutumisen mahdollisuutta sekä eristää polttoaineen maanpinnan muuttuvista olosuhteista.▪ Tarjoaa teknisille vapautumisesteille suotuisat, vakaat ja ennustettavissa olevat mekaaniset, geokemialliset ja hydrogeologiset olosuhteet.▪ Rajoittaa ja hidastaa loppusijoitustilasta mahdollisesti vapautuvien haitallisten aineiden kulkeutumista.
------------	---

*KBS-3 -konseptin vaakasuuntainen vaihtoehto.

Turvallisuustoimintojen määrittelyssä on tapahtunut tiettyä tarkentumista viime vuosina. Verrattuna Posivan TKS-2009-ohjelmaan (Posiva 2009) loppusijoitustunnelin tulpan luokittelu on muuttunut, ja tulppa luetaan nyt YJH-2012-ohjelmassa vapautumisesteeksi yhdessä loppusijoitustunnelin täytön kanssa (Posiva 2012).

Turvallisuustoiminnot muistuttavat tietyltä osin loppusijoitustilan suunnittelutavoitteita, mutta ne eivät kuitenkaan ole samoja. Turvallisuustoimintoa käytetään turvallisuuden arvioinnissa, ja sen voimassaoloa tarkastellaan koko turvallisuuden arvioinnin ajanjakson yli. Turvallisuustoiminto liittyy paitsi teknisiin vapautumisesteisiin, myös luonnon vapautumisesteisiin. Toisaalta suunnittelutavoitteet liittyvät loppusijoitustilan alkutilaan, ja ne rajoittuvat lähinnä teknisiin vapautumisesteisiin.

Edellä mainitut turvallisuustoiminnot konkretisoidaan kehittämällä ko. vapautumisesteele tai sulkurakenteelle täsmällisempi toimintakykytavoite, jolla määritellään tarkemmin ne tekijät (parametrit), joista turvallisuustoiminto muodostuu. Usein turvallisuustoiminto jaetaan useaan eri toimintakykytavoitteeseen. Toimintakykytavoitteelle voidaan edelleen määrittää numeerinen tavoitearvo, joka voi olla minimiarvo, maksimiarvo tai parametrin suositeltu vaihteluväli. Termi toimintakykytavoite koskee teknisiä vapautumisesteitä, kun taas luonnon vapautumisesteiden kohdalla puhutaan tavoiteominaisuudesta.

Kun loppusijoitustila-kallioperä-järjestelmän osajärjestelmät täyttävät toimintakykytavoitteensa, turvallisuustoiminto täyttyy. Tämä ei kuitenkaan vielä automaattisesti takaa loppusijoituksen turvallisuutta, vaan turvallisuusanalyysi on tehtävä tässäkin tapauksessa. Kääntäen, vaikka kaikki toimintakykytavoitteet eivät täytyisikään, loppusijoitus voi silti olla turvallinen. Tällaiset tapaukset on tarkasteltava erityisen tarkasti turvallisuusanalyysissä.

Loppusijoituksen suunnitteluvaiheessa teknisten vapautumisesteiden turvallisuustoimintoihin voidaan vaikuttaa esim. niiden rakennetta tai materiaaleja optimoimalla, kun taas paikan valinnan jälkeen kallioperän turvallisuustoimintojen optimointi tapahtuu lähinnä rakentamisaikaisen kalliosuunnittelun keinoin. Kiinnostunut lukija voi löytää eri turvallisuustoiminnoille määritellyjä toimintakykytavoitteita tavoitearvoineen Posivan TKS-2009-suunnitelmasta (Posiva 2009).

4.3 Kytkös päätöksentekoon

Turvallisuusperustelulle ei ole olemassa mitään ”virallisia” kriteerejä, jotka täyttämällä se olisi automaattisesti hyväksyttävä. STUKin YVL D.5 -ohjeessa on todettu, että pitkäaikaisturvallisuus on osoitettava turvallisuusperustelulla, ja ohjeessa on

annettu joitain minimivaatimuksia turvallisuusperustelun rakenteelle. Edellä on jo mainittu, että loppusijoituksen turvallisuudessa todistustaakka on luvanhakijalla, jolloin viime kädessä turvallisuusperustelu on se, minkä luvanhakija (käytetyn polttoaineen tapauksessa Posiva) ohjeistuksen rajoissa määrittää turvallisuusperustelukseen.

Nykyisin Suomessa vallitsevan ajattelun mukaan turvallisuusperustelu on osa Posivan rakentamislupahakemusta. Tämä on turvallisuusperustelun tekninen kytkös päätöksentekoon. Seuraavassa tarkastellaan eri näkökulmilla turvallisuusperustelun olemusta.

Suomalaisen turvallisuusperustelun yleiset suuntaviivat muotoiltiin Posivan ensimmäisessä turvallisuusperustelun suunnitelmassa (Vieno & Ikonen 2005). Sen mukaisesti turvallisuusperustelu kattaa:

- ehdotetun loppusijoitusratkaisun turvallisuuden laaja-alaiset ja integroidut perustelut
- kvantitatiivisen turvallisuusanalyysin sekä perustellun arvion sen tulosten luotettavuudesta
- jäljellä olevat epävarmuudet ja tutkimustarpeet sekä niiden ratkaisutavat.

Periaatteessa turvallisuusperustelu on kaikki se turvallisuusaineisto, jolla Posiva perustelee loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemustaan. Posivan toisessa turvallisuusperustelun suunnitelmassa on tarkennettu turvallisuusperustelun rakennetta ja jäsentelyä (Posiva 2008). Posivan kolmannessa turvallisuusperustelun suunnitelmassa (Posiva 2012) on otettu huomioon STUKin viranomaispalaute ja STUKin uudessa YVL D.5 -ohjeessa esitettyjä näkökohtia.

5. Turvallisuusperustelun tekninen sisältö

Edellisessä luvussa sivuttiin turvallisuusperustelun olemukseen liittyviä yleisiä näkökohtia koskien erityisesti KBS-3-konseptia. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi sitä turvallisuusperustelutyötä, jota on tehty kansainvälisenä yhteistyönä. Kansainvälinen yhteistyö on keskeistä, koska se jäsentää ja dokumentoi tieteenalan yhteistä näkemystä ja koska tällä näkemyksellä usein on vaikutusta myös kansallisten toimijoiden turvallisuusajattelussa. Turvallisuusperusteluja eri maissa arvioidaan nykyisin paitsi kansallisten myös kansainvälisten asiantuntijoiden voimin, joten siinäkin mielessä kansainvälinen keskustelu on hyvä tuntee.

Kansainvälisessä ydinjäteyhteisössä on keskusteltu loppusijoituksen turvallisuusperustelun käsitteestä (concept of safety case) useita vuosia. Seuraavassa tarkastellaan lähinnä IAEA:n (International Atomic Energy Agency) ja OECD NEA:n (Nuclear Energy Agency) piirissä tehtyä turvallisuusperustelutyötä. Kummassakin asiantuntijajärjestössä turvallisuusperustelutyötä on tehty jo pitkään ja kummallekin on muodostunut tietty oma tarkastelutapa sekä osin myös oma terminologia. IAEA on perinteisesti ollut lähempänä viranomaisia ja NEA puolestaan ydinjätehuollon toteuttajaorganisaatioita. Järjestöt pyrkivät hankkeiden hyvällä koordinoinnilla välttämään päällekkäisen työn tekemisen.

Tässä ei ole tarkoitus mennä kansainvälisen turvallisuusperustelutyön historiaan eikä yksityiskohtiin. Kiinnostunut lukija löytää esim. raporteista IAEA (2011a) ja NEA (2012) paljon aiheeseen liittyviä yksityiskohtia. Nyt on tarkoitus lähinnä asettaa turvallisuusperustelu asiayhteyteen ja kuvata periaatetasolla mitä asioita turvallisuusperusteluun katsotaan kuuluvan. Sekä IAEA että NEA kytkevät turvallisuusperustelun ja turvallisuusanalyysin yhteen, sillä turvallisuusanalyysi on turvallisuusperustelun ydin, jonka ympärille kvantitatiivinen argumentointi rakentuu. Näin ollen seuraavassa kuvataan periaatetasolla myös turvallisuusanalyysia.

5.1 IAEA:n turvallisuusperustelu

International Atomic Energy Agency (IAEA) määrittelee turvallisuusperustelun yksinkertaisesti kokoelmaksi argumentteja ja todisteita, joilla osoitetaan loppusijoitusjärjestelmän turvallisuus (IAEA 2011a):

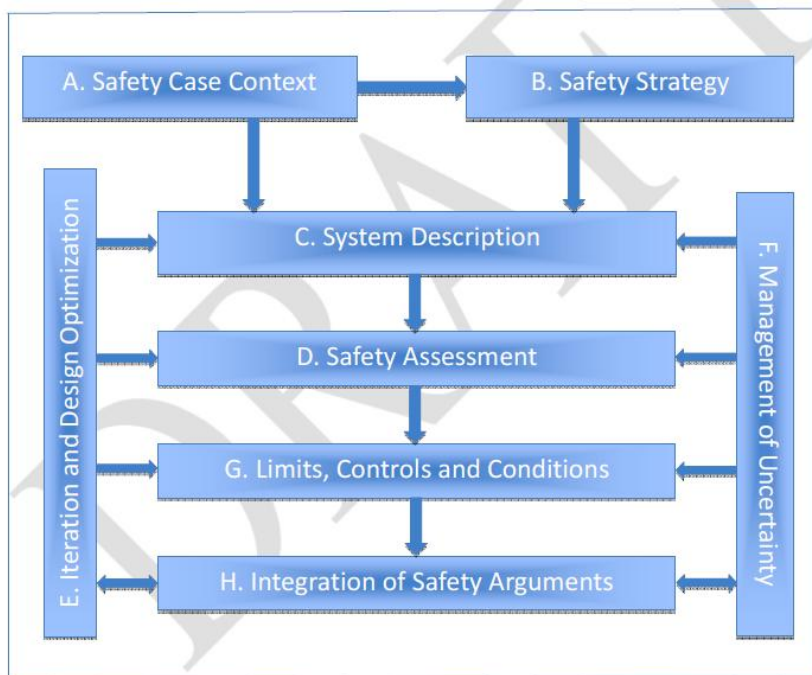
“The safety case is the collection of scientific, technical, administrative and managerial arguments and evidence in support of the safety of a disposal

facility covering the suitability of the site and the design, construction and operation of the facility, the assessment of radiation risks and assurance of the adequacy and quality of all the safety related work associated with the disposal facility.”

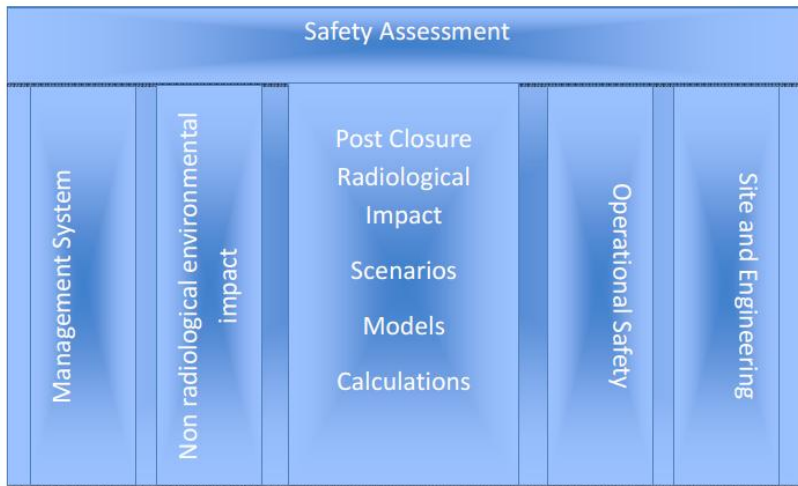
Turvallisuusanalyysi määritellään määrälliseksi analyysiksi, jossa arvioidaan lopusjoiutuslaitoksesta aiheutuvia säteilyannoksia ja säteilyriskejä ja jossa verrataan niitä turvallisuuskriteereihin (IAEA 2011a):

“Safety assessment, an integral part of the safety case is driven by a systematic assessment of radiation hazards and is an important component of the safety case. The latter involves quantification of radiation dose and radiation risks that may arise from the disposal facility for comparison with dose and risk criteria, and provides an understanding of the behavior of the disposal facility under normal conditions and disturbing events, considering the time frames over which the radioactive waste remains hazardous.”

Kuvassa 5.1 on esitetty pelkistetysti IAEA:n turvallisuusperustelun perusrakenne ja kuvassa 5.2 IAEA:n turvallisuusanalyysin perusrakenne.



Kuva 5.1. IAEA:n turvallisuusperustelun pääosat (IAEA 2011a).



Kuva 5.2. IAEA:n turvallisuusanalyysin pääosat (IAEA 2011a).

Kuvissa 5.1–5.2 mainitaan myös käytönaikainen turvallisuus (operational safety), joka joissain maissa kuuluu turvallisuusperusteluun. Suomessa se ei kuulu.

Kiinnostunut lukija saa lisää perspektiiviä IAEA:n turvallisuusajatteluun esim. lähteistä IAEA (2011b, 2011c).

5.2 NEA:n turvallisuusperustelu

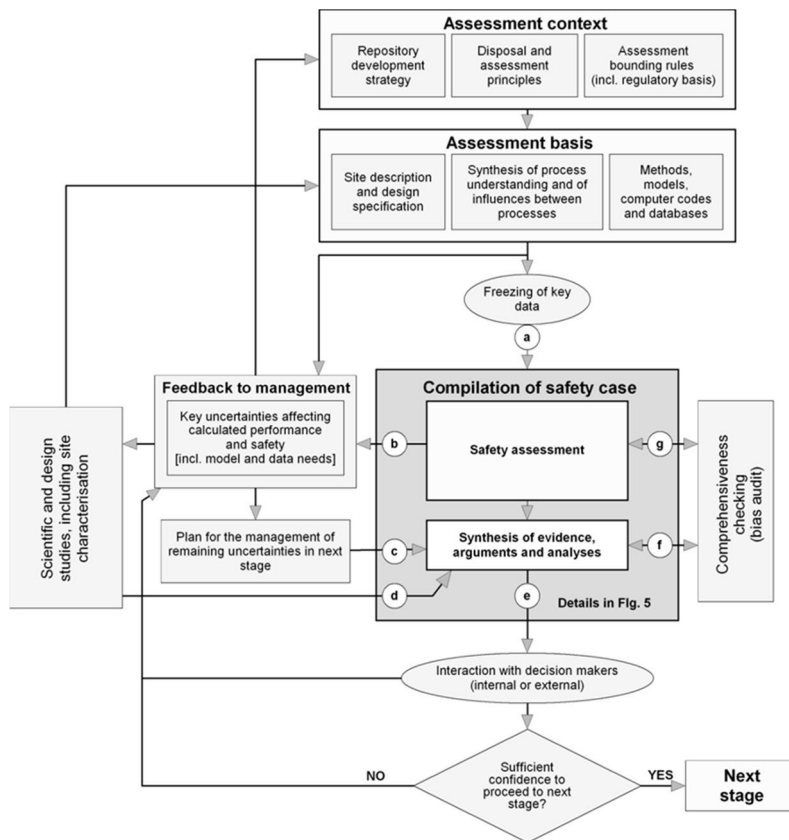
OECD/NEA määrittelee turvallisuusperustelun argumenttien ja todisteiden yhdistelmänä, joka kuvaa, määrittää ja osoittaa loppusijoituslaitoksen turvallisuutta ja turvallisuuden luotettavuustasoa (NEA 2012):

“The safety case is an integration of arguments and evidence that describe, quantify and substantiate the safety of the geological disposal facility and the associated level of confidence. In a safety case, the results of safety assessment – i.e. the calculated numerical results for safety indicators – are supplemented by a broader range of evidence that gives context to the conclusions or provides complementary safety arguments, either quantitative or qualitative. A safety case is the compilation of underlying evidence, models, designs and methods that give confidence in the quality of the scientific and institutional processes as well as the resulting information and analyses that support safety.”

OECD/NEA määrittelee turvallisuusanalyysin systemaattisena analyysinä, jolla tarkastellaan loppusijoituslaitoksen riskejä ja sitä miten loppusijoituspaikka ja -laitos yhdessä toteuttavat asetetut tekniset vaatimukset (NEA 2012):

“Safety assessment is a systematic analysis of the hazards associated with geological disposal facility and the ability of the site and designs to provide the safety functions and meet technical requirements. The task involves developing an understanding of how, and under what circumstances, radionuclides might be released from a repository, how likely such releases are, and what would be the consequences of such releases to humans and the environment.”

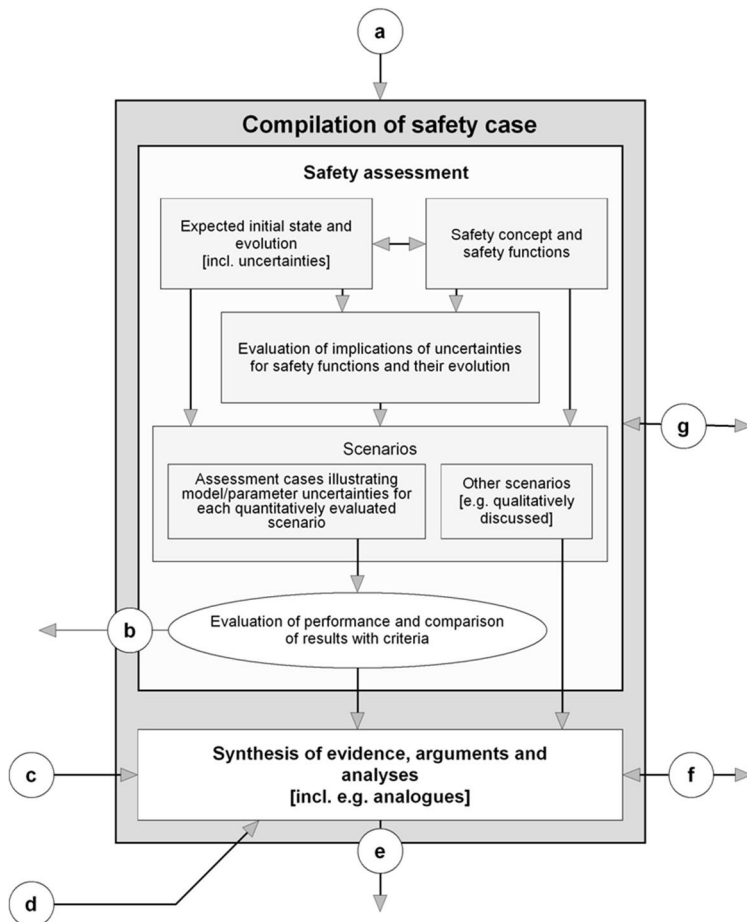
Kuvassa 5.3 on esitetty NEA:n turvallisuusperustelun rakenne ja kuvassa 5.4 NEA:n turvallisuusanalyysin perusrakenne.



Kuva 5.3. NEA:n turvallisuusperustelun pääosat (NEA 2012). Kirjaimilla varustetut nuolet vastaavat samoilla kirjaimilla varustettuja nuolia kuvassa 5.4.

Kuvassa 5.3 on esitetty tietokannan jäädyttäminen ennen turvallisuusperustelun rakentamista. Tämä viittaa siihen, että kuva esittää turvallisuusperustelun tekijöiden, ts. jätehuolto-organisaatioiden, näkökulmaa, sillä kyse on käytännön työn

mukanaan tuomasta teknisestä välttämättömyydestä (kaikki analyysit on tehtävä saman tietokannan pohjalta).



Kuva 5.4. NEA:n turvallisuusanalyysin pääosat (NEA 2012). Kirjaimilla varustetut nuolet vastaavat samoilla kirjaimilla varustettuja nuolia kuvassa 5.3.

Kiinnostunut lukija saa lisää perspektiiviä NEA:n turvallisuusajatteluun esim. lähteistä OECD 2008 ja OECD 2009.

5.3 Turvallisuusperustelun sisällöllinen luuranko

IAEA:n ja NEA:n työn perusteella voidaan hahmotella asioita, jotka kansainvälisissä työryhmissä katsotaan kuuluvan turvallisuusperusteluun. On nähtävissä, että IAEA ja NEA ovat edellä tarkastelluissa kuvissa 5.1–5.4 (ja raporteissa, joista

kuvat on otettu) käsitelleet suurelta osin samoja asioita. Eroja on lähinnä termien määrittelyssä ja siinä, minkä otsikon alla kukin asia esiintyy ja siinä, missä järjestyksessä asioiden katsotaan seuraavan toisiaan. Seuraavat luettelot ovat poimintoja em. kuvista eivätkä pyri esittämään kirjoittajien ehdotusta laajuudeltaan kattavasta turvallisuusperustelusta.

Turvallisuusperusteluun katsotaan kuuluvan ainakin:

- turvallisuusperustelun asiayhteys
- järjestelmäkuvaus
- turvallisuusanalyysi
- epävarmuuksien hallinta.

Turvallisuusperustelun asiayhteys tarkoittaa tässä lähinnä sen toteamista, miksi turvallisuusperustelu on tehty, mihin päätöksentekoon se liittyy, ja miten käsillä oleva päätöksenteko liittyy kansalliseen ydinjätehuollon ohjelmaan.

Järjestelmäkuvaus tarkoittaa tässä loppusijoituspaikan kuvausta, suunnitellun loppusijoituslaitoksen teknisten järjestelmien kuvausta sekä loppusijoitettavien jätteiden kuvausta. Järjestelmäkuvauksessa voisi olla hyvä esittää kuvattavien eri vapautumisesteiden ja sulkurakenteiden turvallisuustoiminnot sekä mahdollisesti toimintakykytavoitteet ja tavoitearvot.

Turvallisuusanalyysi on määritelty edellä lähinnä systemaattiseksi laskennalliseksi analyysiksi loppusijoitustilan aiheuttamien radiologisten vaikutusten arvioimiseksi. Sitä tarkastellaan jatkossa vielä lähemmin.

Epävarmuuksien hallinta on turvallisuusperustelussa erityisen tärkeää, koska kaikista epävarmuuksista ei päästä koskaan eroon. Loppusijoituspaikasta on aina epätäydellinen havaintoaineisto, koska loppusijoituspaikkaa ei haluta kairata puhki, ja toisaalta pitkät tarkasteltavat ajanjaksot sisältävät aina tulevaisuuteen liittyviä epävarmuuksia. Epävarmuuksien olemassaolo on turvallisuusperustelun metodologinen lähtökohta ja siksi turvallisuusperustelussa pyritään noudattamaan ns. konservatiivisuusperiaatetta eli radiologisia vaikutuksia yliarvioivia yksinkertaistuksia. Konservatiivisuusperiaatetta pyritään noudattamaan kaikkia oletuksia tehtäessä sekä kaikkia laskentamalleja ja lähtötietoja valittaessa.

Vastaavasti turvallisuusanalyysiin katsotaan kuuluvan ainakin:

- skenaariot
- laskentamallit
- lähtötiedot
- radionuklidien leviämisen laskenta
- biosfäärilaskenta
- vertailu turvallisuuskriteereihin.

Skenaariot (epävirallinen suomennos ”jossitelma”) edustavat turvallisuusanalyysin luovaa osaa, koska skenaariot ovat turvallisuusanalyysin tekijöiden olennainen valinta. Turvallisuusanalyysin skenaariot ovat kallioperä-loppusijoitusjärjestelmän mahdollisia ja sisäisesti johdonmukaisia tulevaisuuksia. Niiden avulla haarukoidaan järjestelmän käyttäytymistä tulevaisuudessa, jota ei tunneta tarkkaan. Skenaariotekniikka on yksi turvallisuusperustelussa sovellettava epävarmuuksien

hallinnan tapa. Skenaariotekniikan käytössä on olennaista, että skenaariot yhdessä kattavat riittävän ison osan tulevaisuuden mahdollisista kehityskuluista, ei niinkään se, että jokin yksittäinen skenaario on mahdollisimman edustava. Skenaariota ei tule sekoittaa ennusteeseen: skenaariot edustavat lähtökohtaisesti ”jos-niin”-logiikkaa.

Laskentamallit ja mallien tarvitsemat lähtötiedot edustavat turvallisuusanalyysin laskentateknistä työkalua, jonka avulla radionuklidien leviämisen laskenta toteutetaan. Laajaa ja monimutkaista kallioperä-loppusijoitusjärjestelmää koskevien lähtötietojen hankinta on suuritöinen tehtävä. Radionuklidien leviämisen laskenta toteutetaan turvallisuusperustelun tekijöiden valitsemissa skenaarioille.

Voidaan katsoa, että radionuklidien leviämisen laskenta on nimenomaan se toiminta, joka turvallisuusanalyysissä ja turvallisuusperustelussa on pakko tehdä, koska vasta se mahdollistaa vertailun turvallisuuskriteereihin. Biosfäärilaskenta on analyysin vaihe, jossa arvioidaan nuklidien leviäminen biosfäärissä ja ihmisten altistuminen radionuklideille elinpiirissään ja jossa lasketaan annosnopeudet.

Suomessa STUKin asettamat turvallisuuskriteerit ovat annosnopeuspohjaisia (Sv/vuosi) ensimmäisille tuhansille vuosille loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen ja vapautumisnopeuspohjaisia (Bq/vuosi) pidemmille aikaväleille (STUK 2011a).

Radionuklidien leviämisen laskentaan kuuluu ainakin:

- laskentatapausten määrittäminen
- radionuklidien vapautuminen
- pohjaveden virtauksen mallinnus
- radionuklidien kulkeutumis- ja pidättymisprosessit
- kulkeutuminen teknisten vapautumisesteiden läpi (lähialuemallinnus)
- kulkeutuminen veden mukana biosfääriin (kaukoaluemallinnus).

Käytännön laskennassa määritetään ensin laskentatapaukset⁷, jotka puolestaan perustuvat edellä kuvattuihin skenaarioihin. Laskentatapauksissa annetaan numeroarvot kaikille laskennassa tarvittaville lähtötiedoille. Laskentatapauksia voidaan pitää kyseisen skenaarion realisaatioina siten, että yhtä skenaariota kohti voi olla useita realisaatioita. Kokonaisuutena tarkastellen laskentatapauksia voidaan pitää skenaarion sisäisenä herkkyystarkasteluna, jossa haarukoidaan skenaarion sisäisiä mahdollisia kehityskulkuja; laskentatapauksilla voidaan arvioida esim. jonkin yksittäisen parametrisarvon muutoksen vaikutusta.

Radionuklidien vapautumisessa on tunnettava, milloin vapautuminen alkaa ja mikä on vapautumisnopeus. Näiden tietojen saamiseksi on tarpeen tehdä laajoja tutkimuksia loppusijoituskapselin pitkäaikaiskestävyydestä ja käytetyn polttoaineen ominaisuuksista.

Pohjaveden virtausmallinnus on tarpeen radionuklidien kolmiulotteisten kulkeutumisreittien selvittämiseksi ja kulkeutumisreittien virtausominaisuuksien määrit-

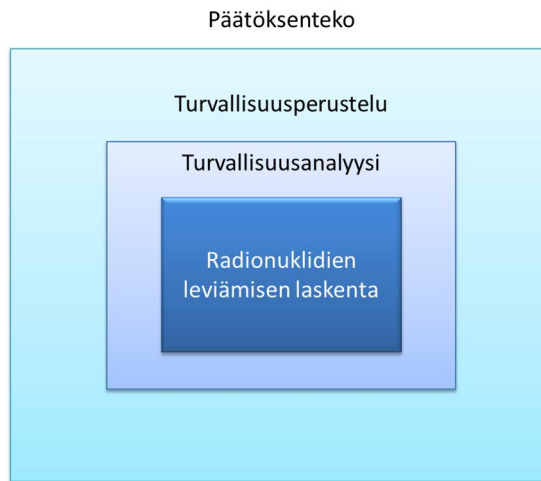
⁷ Käytetty terminologia ei ole aivan johdonmukainen. Edellisessä suomalaisessa lupahakemuksen tueksi tehdyssä turvallisuusanalyysissä TILA-99 (Vieno & Nordman 1999) laskentatapauksia kutsuttiin skenaarioiksi.

tämiseksi. Pohjaveden virtausmallinnus hyödyntää lukuisilla menetelmillä mitattua paikkatutkimusdataa. Virtausmallinnuksen edellytyksenä on mitattujen kallioperän ominaisuuksien, esim. vettä johtavien rakenteiden, kvantitatiivinen kuvaaminen tarkoitukseen suunnitellulla kolmiulotteisella kalliomallilla. Radionuklidit päätyvät ihmisen elinympäristöön, esim. kaivon, suohon tai vesistöön pohjaveden purkautumispaikoista. Pohjaveden virtausmallinnus oli yksi keskeisistä tutkimusmenetelmistä valittaessa paikkaa loppusijoituslaitokselle.

Radionuklidien kulkeutumis- ja pidättymisprosessit lähialueella on tunnettava ennen kuin voidaan mallintaa radionuklidien kulkeutumista teknisten vapautumisesteiden läpi. Lähialueella tarkoitetaan tässä kallioperä-loppusijoitusjärjestelmän sitä osaa, joka on jollain tavalla häiriintynyt loppusijoituksesta. Teknisiä vapautumisesteitä ovat loppusijoituskapseli, bentoniittipuskuri kapselin ympärillä sijoitusreiässä sekä täytetyt loppusijoitustunnelit. Laskennan kannalta on olennaista tietää, mikä on vapautumisesteiden kunto kun kulkeutuminen alkaa, ja sen selvittämiseksi on tarpeen tehdä laajoja tutkimuksia kapselin, bentoniittipuskurin ja tunnelitytön pitkäaikaiskestävyydestä erilaisissa, koko loppusijoituksen aikaskaalassa mahdollisesti esiintyvissä olosuhteissa. Useimmissa laskentatapauksissa kulkeutumismekanismina pidetään diffuusiota, jossa vesi ei virtaa ja jossa kulkeutumista ajava voima on pitoisuuserojen tasoittuminen.

Erotukseksi lähialueesta kaukoalueella tarkoitetaan sitä osaa kallioperä-loppusijoitusjärjestelmästä, joka on säilyttänyt alkuperäiset ominaisuutensa. Kun radionuklidit ovat vapautuneet lähialueelta, toisin sanoen läpäisseet tekniset vapautumisesteet, kulkeutuminen jatkuu luonnon vapautumisesteessä kallioperässä. Siellä nuklidit etenevät virtaavan pohjaveden mukana kohti biosfääriä eli ihmisen elinpiiriä. Virtaavan veden mukana tapahtuvaa kulkeutumista kutsutaan advektioksi, tai vaihtoehtoisesti konvektioksi. Molemmat termit tarkoittavat radionuklidien kulkeutumismallinnuksessa samaa asiaa.

Edellä kuvattua turvallisuusperustelun, turvallisuusanalyysin ja radionuklidien leviämismallinnuksen keskinäistä hierarkiaa on pelkistetty kuvassa 5.5. Kuvassa on myös hahmotettu päätöksenteon roolia suhteessa edellä mainittuihin analyysitasoihin.



Kuva 5.5. Turvallisuusperustelun sisällöllinen luuranko.

Kuva 5.5. käsittelee periaatetasolla aivan samoja asioita kuin IAEA:n ja NEA:n vastaavat kuvat edellä (kuvat 5.1–5.4). Erona on, että luettavuuden parantamiseksi yksityiskohtien määrää on vähennetty. Kuva 5.5 täytyy tulkita niin, että turvallisuusperustelun keskeinen osa on turvallisuusanalyysi ja turvallisuusanalyysin keskeinen osa on radionuklidien leviämisen mallinnus. Tässä katsannossa radionuklidien leviämisen mallinnus on turvallisuusperustelun pelkistetty rautalan-kamalli.

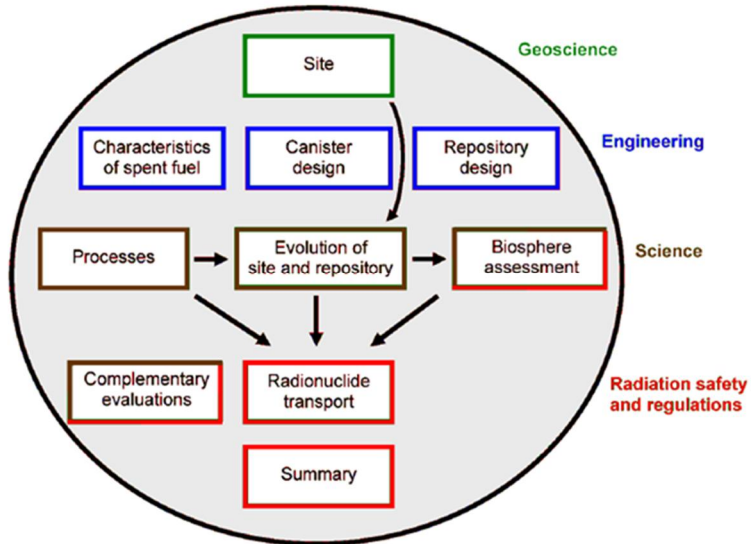
6. Turvallisuusperustelutyö Suomessa

Suomessa on kehitetty valmiuksia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuusanalyysiin jo yli 30 vuotta. Erityisesti valmiuksia kehitettiin alkuvaiheessa radionuklidien leviämisen ja pohjaveden virtauksen mallintamiseen sekä näiden mallinnusvaiheiden tarvitsemien lähtötietojen hankkimiseen kokeellisin tutkimuksin. Termi turvallisuusperustelu otettiin yleisempään käyttöön, kun kansainväliset asiantuntijaryhmät aloittivat käsitteen tarkastelun.

Suomessa käytetyn ydinpolttoaineen turvallisuusperustelutyötä tehdään lähinnä Posivassa, jolla on loppusijoituksen turvallisuuden todistustaakka, ja STUKissa, joka puolestaan arvioi Posivan tuottaman turvallisuusperustelun. Posivan ensimmäistä turvallisuusperustelun suunnitelmaa (Vieno & Ikonen 2005) on päivitetty STUKin kommenttien pohjalta (Posiva 2008) ja edelleen STUKin YVL D.5 -ohjeen ja muun viranomaispalautteen pohjalta (Posiva 2012). Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti Posivan turvallisuusperustelun suunnitelman kehittymistä kolmessa vaiheessa sekä STUKin YVL D.5 -ohjetta, jossa viranomainen ottaa kantaa turvallisuusperustelun rakenteeseen.

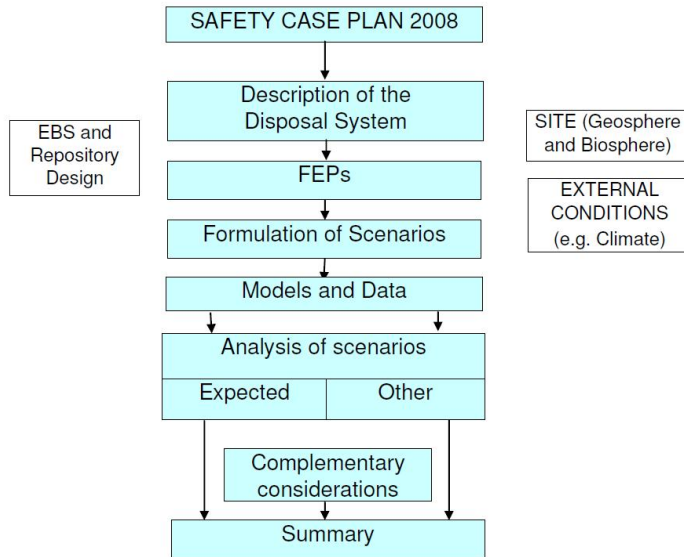
6.1 Posivan turvallisuusperustelutyö

Posivan ensimmäisessä turvallisuusperustelun suunnitelmassa, kuva 6.1, tuotiin esille raporttisalkkuajatus, jonka mukaan turvallisuusperustelu koostuu joukosta raportteja, joista voidaan julkaista useita versioita. Kuvan jokainen laatikko edustaa raporttia kyseisestä aihepiiristä. Nämä turvallisuusperusteluraportit puolestaan tukeutuvat varsinaisiin teknistieteellisiin tutkimusraportteihin. Tällainen raporttihakierarkia on käytännön työn mukanaan tuoma tarve, koska turvallisuusperustelu pitää sisällään erittäin paljon erilaisia tutkimuksia ja niiden raportteja.



Kuva 6.1. Posivan ensimmäinen turvallisuusperustelun suunnitelma (Vieno & Ikonen 2005).

Posivan ensimmäistä turvallisuusperustelun suunnitelmaa (Vieno & Ikonen 2005), kehitettiin prosessimaisempaan suuntaan reaktiona STUKin kommentteihin Posivan TKS-2006-raporttiin (Posiva 2006), ks. kuva 6.2. STUKin kommentteissa kiinnitettiin huomiota turvallisuusperustelutyön kokonaisuuteen, epävarmuuksien hallintaan, skenaarioiden valintaan ja laadun hallintaan. Kehitetystä suunnitelmasta on säilytetty alkuperäisessä suunnitelmassa ollut ajatus julkaista turvallisuusperustelun muodostaman raporttisalkun raporteista alustavia versioita ennen lopullisia lupahakemuksen raporteja.



Kuva 6.2. Posivan toinen turvallisuusperustelun suunnitelma (Posiva 2008). EBS (engineered barrier system) tarkoittaa teknisiä vapautumisesteitä.

Tässä turvallisuusperustelun suunnitelmassa on menty syvemmälle turvallisuusperustelun tekemiseen käytännössä. Siinä mielessä on katsottu, että varsinaisen turvallisuusperustelusalun (kuvassa 6.2 siniset laatikot) lisäksi siihen liittyy tukitoimintoina loppusijoituslaitoksen tekninen suunnittelu, paikkatutkimukset loppusijoituspaikalla (kallioperä ja biosfääri) sekä loppusijoituslaitoksen ulkopuoliset reunaehdot. Ulkopuolisista reunaehdoista tärkein on vallitseva ilmasto, koska Suomen leveysasteilla on tulevaisuudessakin odotettavissa jääkausia, ja loppusijoituslaitoksen turvallisuusperustelussa on syytä tarkastella jääkauden mahdollisia vaikutuksia.

Turvallisuusperustelun suunnitelma (Posiva 2008) sisältää edellisessä luvussa mainittuja asiakokonaisuuksia, joten se heijastelee alan kansainvälistä keskustelua. Useita kansainvälisessä keskustelussa esiin nostettuja asioita on noudatettu Suomessa oma-aloitteisesti jo vuosikausia, esim. loppusijoitushankkeen vaiheittainen suunnittelu.

Description of the Disposal System -raportti (Loppusijoitusjärjestelmän kuvaus) kattaa itse käytetyn polttoaineen, loppusijoituskapselin, bentoniittipuskurin, loppusijoitustunnelien täytön ja tunnelien sulkurakenteet, kallioperän ja biosfääriin, (Posiva 2008). Kuvan 6.2 mukaisesti se tukeutuu vahvasti loppusijoituslaitoksen tekniseen suunnitteluun ja loppusijoituspaikan paikkatutkimuksiin.

FEPs-raportti kuvassa 6.2 tarkoittaa loppusijoituslaitos-kallioperä-biosfäärijärjestelmässä esiintyviä ilmiöitä, tapahtumia ja prosesseja (features, events, processes). Prosessiasiantuntemus määrittää pitkälle turvallisuusperustelun luonnon-

tieteellisen pohjan. Radionuklidien leviämisen arviointi loppusijoitustilasta ihmisen elinympäristöön tehdään laskentamalleilla, jotka perustuvat vallitsevaan käsitykseen prosessien luonteesta ja merkityksestä radionuklidien leviämisen kannalta.

Formulation of Scenarios -raportti (Skenaarioiden muotoilu) sisältää näkemyksen siitä, millaisia tulevaisuuksia loppusijoituslaitos voi kohdata, toisin sanoen minkälaisiin tulevaisuuksiin suunnittelussa tulee varautua. Skenaarioiden muotoilussa on kaksi periaatteellista koulukuntaa: ylhäältä alas (top down) ja alhaalta ylös (bottom up). Ylhäältä alas -ajattelu jäsentää skenaarioita loppusijoituslaitoksen turvallisuustoiminnoista lähtien. Alhaalta ylös -ajattelu puolestaan jäsentää skenaarioita ilmiöistä, tapahtumista ja prosesseista (FEPs) lähtien. Käytännössä skenaarioiden muotoilussa on elementtejä kummastakin koulukunnasta; se on aidosti luovaa työtä ja siihen jää aina tietty subjektiivinen komponentti. Tästä syystä skenaarioiden muotoilun perusteiden ja koko prosessin asianmukainen dokumentointi on välttämätöntä turvallisuusperustelun ymmärrettäväksi tekemiseksi.

Models and Data -raportti (Mallit ja data) kuvaa käytetyt laskentamallit ja lähtötiedot. Laskentamallit ovat aina yksinkertaistuksia todellisuudesta, ja tämän raportin yksi tehtävä on osoittaa laskentamalleissa ja niiden lähtötiedoissa mahdollisia parannusmahdollisuuksia. Yleisesti turvallisuusanalyysin kantava ajatus on, että kun todellisuutta kerran täytyy joka tapauksessa yksinkertaistaa, tehtäköön se sitten konservatiivisesti eli radiologisia vaikutuksia yliarvioivaan suuntaan. Tämän hyvän periaatteen toteuttaminen edellyttää, että matemaattisesti mallinnettava järjestelmä tunnetaan hyvin. Toisin sanoen ollaan prosessi- tai FEP-asiiantuntemuksen varassa.

Analysis of Scenarios -raportti (Skenaarioiden analyysi) sisältää varsinaisen radionuklidien leviämisen laskennallisen analyysin, joka on tehty valituille skenaarioille. Käytännön laskentaa varten skenaarioista johdetaan erilaisia realisaatioita eli laskentatapauksia. Posivan turvallisuusperustelun suunnitelmassa on otettu huomioon viranomaisohjeistus YVL D.5, jonka mukaan turvallisuusperustelussa on tarkasteltava sekä todennäköisinä pidettäviä kehityskulkuja että epätodennäköisiä tapahtumia.

Complementary considerations -raportti (Täydentävät tarkastelut) sisältää laskennallisen turvallisuusanalyysin ulkopuolisia turvallisuusargumentteja, joiden katsotaan tukevan turvallisuusperustelua. Ne voivat olla esim. yleisiä luonnontieteellisiä järkeilyjä tai havaintoja luonnosta. Luonnon havaintoja, joita on tutkittu ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuusmielessä, kutsutaan luonnonanalogoiksi. Yksi mahdollinen täydentävän tarkastelun aihepiiri voi olla luonnossa mitatut radionuklidien pitoisuudet, esim. pohja- tai kaivovedessä.

Loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemustaan varten Posiva on edelleen päivittänyt edellä esiteltyä turvallisuusperustelun suunnitelmaansa viranomaisilta saamansa palautteen ja STUKissa valmisteilla olevan YVL D.5 -ohjeen pohjalta, ks. kuva 6.3.

TURVA-2012	
Synthesis	
Yleisen metodologian kuvaus, yhteenveto kaikista turvallisuutta koskevista perusteluista, luotettavuuden toteaminen sekä pitkäaikaisturvallisuusvaatimusten täyttymisen arviointi.	
Site Description	Biosphere Description
Loppusijoituskallion nykytilan ja menneen kehityskulun kuvaus.	Maanpintaympäristön nykytilan ja kehityskulun kuvaus.
Design Basis	
Vapautumisestneiden toimintakyktavoitteet ja tavoiteominaisuudet.	
Production Lines	
Teknisten vapautumisestneiden ja kalliotilojen suunnittelu, tuotanto ja alkutila.	
Description of the Disposal System	
Yhteenveto maanalaisen loppusijoitusjärjestelmän alkutilasta ja maanpintaympäristön nykytilasta.	
Features, Events and Processes	
Yleinen kuvaus loppusijoitusjärjestelmään vaikuttavista ilmiöistä, tapahtumista ja prosesseista.	
Performance Assessment	
Maanalaisen loppusijoitusjärjestelmän toimintakyvyn analyysi ja toimintakyktavoitteiden ja tavoiteominaisuuksien täyttymisen arviointi.	
Formulation of Radionuclide Release Scenarios	
Ilmaston kehityskulun kuvaus sekä päästöskenaarioiden määrittäminen.	
Models and Data for the Repository System	Biosphere Assessment Data Basis
Maanalaisen loppusijoitusjärjestelmän analyysissä käytetyt mallit ja lähtötiedot.	Biosfäärianalyysissä käytetyt lähtötiedot ja yhteenveto malleista.
Biosphere Assessment: Modelling reports	
Kuvaus malleista ja maanpintaympäristön yksityiskohtainen mallintaminen.	
Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System	Biosphere Assessment
Päästöjen analysointi sekä annosten ja aktiivisuusvuoarvojen laskeminen.	
Complementary Considerations	
Täydentävät todisteet, mm. luonnon- ja antropogeeniset analogiat.	
	Pääraportit
	Keskeisimmät taustaraportit

Kuva 6.3. Loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemusta varten laadittu Posivan uusin turvallisuusperustelun suunnitelma TURVA 2012 (Posiva 2012). Vihreät laatikot edustavat raporttisalkun pääraportteja ja harmaat keskeisimpiä taustaraportteja. Kuvassa on myös lyhyt kuvaus kunkin raportin sisällöstä.

Viimeisimmässä turvallisuusperustelun suunnitelmassa on tukeuduttu aiempaa enemmän STUKin YVL D.5 -ohjeeseen, tai tarkemmin sanoen sen luonnokseen, ja siinä mielessä otettu raporttisalkkuun mukaan aiempaan verrattuna uusia asiakokonaisuuksia, jotka toki aiemminkin ovat olleet olemassa, mutta eivät raporttisalkussa. Havaitaan, että raporttisalkussa on kaksi kokonaan uutta raporttia: Design Basis ja Performance Assessment.

Design Basis -raportti (Suunnitteluperuste) esittää Posivan VAHA-ohjelmassa (vaatimusten hallinta) kehitetyt loppusijoitusjärjestelmän eri komponenteille määritellyt turvallisuustoiminnot, toimintakykytavoitteet ja tavoiteominaisuudet sekä niiden perusteet. Loppusijoitustila-kallioperä-järjestelmän turvallisuustoiminnot on esitelty aiemmin luvussa 4. Tässä raportissa kukin turvallisuustoiminto puretaan yksittäiseksi, jopa parametritason toimintakykytavoitteiksi, ja niille asetetaan numeeriset tavoiteominaisuudet mikäli mahdollista (ks. esim. Posiva 2006). Erityisen tärkeää on tietää ne teknistieteelliset perusteet, joilla turvallisuustoiminnot, toimintakykytavoitteet ja tavoiteominaisuudet on asetettu, koska aivan samalta luonnontieteelliseltä perustalta tehdään myös loppusijoituksen skenaarioiden muotoilutyötä. Perusskenaariossa nimittäin oletetaan, että toimintakykytavoitteet täyttyvät, lukuun ottamatta satunnaisia poikkeamia.

Design Basis -raportissa esitetään luonnollisesti loppusijoitustilan suunnittelun määritellyt ja perusteet. Kallion soveltuvuusluokittelu (rock suitability criteria, RSC, nytemmin rock suitability classification) sisältyy Design Basis -raporttiin. Soveltuvuusluokittelu esim. sisältää loppusijoitusreikien paikan hyväksymiskriteerit: jos paikka ei täytä kriteereitä, siihen ei kairata loppusijoitusreikää. Todettakoon, että biosfäärille ei ole määritelty turvallisuustoimintoja, toimintakykytavoitteita tai tavoiteominaisuuksia.

Performance Assessment -raportti (Toimintakykyarvio) esittää edellä kuvatussa raportissa määriteltujen turvallisuustoimintojen, toimintakykytavoitteiden ja tavoitearvojen täyttymisen todennäköisten kehityskulkujen aikana. Tämä todennäköisiin kehityskuluihin rajoittuva määritelmä on jonkin verran kapeampi kuin ennen turvallisuusperustelun käyttöönottoa sovellettu määritelmä, jossa *performance assessment* tarkoitti koko loppusijoitustilan radiologisen vaikutuksen arviota ja oli olennaisesti sama kuin turvallisuusanalyysi ilman vertailua viranomaisvaatimuksiin.

Uusien raporttien lisäksi huomionarvioista on, että aiemman suunnitelman Models and Data -raportti on nyt eriytetty loppusijoitusjärjestelmälle ja biosfäärille. Sama eriyttäminen on kohdistunut aiemman suunnitelman Analysis of Scenarios -raporttiin, jossa siinäkin on nyt eri raportit loppusijoitusjärjestelmälle ja biosfäärille. FEPs-raporttia on laajennettu kattamaan myös biosfääri. Biosfäärianalyysi on nostettu uusimmassa suunnitelmassa aiempaa selvemmin esille omaksi analyysivaiheeseen.

Description of the Disposal system -raportin julkilausuttu tavoite on määritellä loppusijoitusjärjestelmän alkutila sekä biosfäärin nykytila. Loppusijoitustilan alkutilan määrittely on olennaista turvallisuusanalyysissä, koska radionuklidien leviämismallinnus on klassista alkuarvomallinnusta, jossa systeemin kehittyminen lähtee annetusta alkuehdosta, joka tässä vastaa loppusijoitustilan alkutilaa. Alkutilan määrittäminen on kuitenkin haasteellista siksi, että koska loppusijoitusta teh-

dään vaiheistetusti, loppusijoitustilassa on jokaisella ajan hetkellä kapseli-loppusijoitusreikä-ympäristöjä ajallisesti eri kehityksen vaiheissa.

6.2 STUKin turvallisuusperustelutyö

Seuraavassa tarkastellaan STUKin ohjeessa YVL D.5 esiintuotuja näkökohtia koskien turvallisuusperustelua. Tarkastelutapa on sellainen, että YVL D.5 -ohjeen liitteessä esitetyt näkökohdat esitetään sellaisenaan yksi kerrallaan ja samalla pohditaan, missä määrin Posivan turvallisuusperustelun toinen suunnitelma (Posiva 2008) ja YJH-2012 -ohjelmassa esitetty uusin suunnitelma (Posiva 2012) vastaa STUKin ajattelua. Uuden YVL D.5 -ohjeen yhtenä merkittävänä taustaineistona voidaan nähdä pohjoismaisten säteilyturvallisuusviranomaisten yhdessä laatima ns. Pohjoismaainen lippukirja (Nordic Authorities 1993). Tällä hetkellä luonnoksena oleva YVL D.5 -ohje on tarkoitus julkaista v. 2013 alkupuolella.

”A01. Pitkäaikaisturvallisuutta koskevien säteilyturvallisuusvaatimusten täyttyminen sekä loppusijoitusmenetelmän ja loppusijoituspaikan soveltuvuus on osoitettava turvallisuusperustelulla, jossa on tarkasteltava sekä todennäköisinä pidettäviä kehityskulkuja että pitkäaikaisturvallisuutta heikentäviä epätodennäköisiä tapahtumia. Turvallisuusperustelu muodostuu kokeellisiin tutkimuksiin pohjautuvasta laskennallisesta analyysistä sekä täydentävistä tarkasteluista siltä osin kuin kvantitatiiviset analyysit eivät ole mahdollisia tai niihin sisältyy huomattavia epävarmuuksia (VNA 736/2008).”

Tässä määritellään turvallisuusperustelun asiayhteys, esim. se, että turvallisuusperustelu liittyy pitkäaikaisturvallisuuteen. Posivan suunnitelmassa on varauduttu tarkastelemaan sekä todennäköisiä että vähemmän todennäköisiä tapahtumia.

”A02. Turvallisuusperusteluun on sisällyttävä kuvaus loppusijoitusjärjestelmästä: radioaktiivisten aineiden määrät, jätepakkaukset, puskurimateriaalit, täyteaineet, eristys- ja sulkurakenteet, louhitut tilat, ympäröivän kallioperän geologiset, hydrogeologiset, hydrokemialliset, termiset ja kalliomekaaniset ominaisuudet sekä loppusijoituspaikan luonnonympäristö.”

Loppusijoitusjärjestelmän kuvaus sisältyy Posivan suunnitelmaan.

”A03. Turvallisuusperustelussa on määriteltävä vapautumisesteet ja turvallisuustoiminnot ja asetettava niille toimintakykytavoitteet. Niitä asetettaessa on otettava huomioon ajalliset ja satunnaiset muutokset, jotka aiheutuvat mm. geologisista ja ilmastollisista prosesseista.”

Posivan uusimmassa suunnitelmassa, kuva 6.3, on mukana Design Basis -raportti, joka nimenomaan määrittelee loppusijoitusjärjestelmän turvallisuustoiminnot, toimintakykytavoitteet ja tavoiteominaisuudet sekä niiden perustelut. Jo aiemmassa turvallisuusperustelun suunnitelmassa todetaan, että Posivalla on erityinen vaatimusten hallintajärjestelmä (VAHA), jossa muotoillaan turvallisuustoimintojen toimintakykytavoitteet.

"A04. Turvallisuusperusteluun on sisällyttävä skenaarioanalyysi, joka kattaa sekä todennäköisinä pidettävät kehityskulut että pitkäaikaisturvallisuutta heikentävät epätodennäköiset tapahtumat. Skenaariot on koostettava niin, että ne kattavat ilmiöt, tapahtumat ja prosessit, joilla voi olla merkitystä pitkäaikaisturvallisuudelle ja jotka voivat aiheuttaa

- loppusijoitusjärjestelmän sisäisistä radiologisten, mekaanisten, termisten, hydrologisten, kemiallisten, biologisten ja säteilyyn liittyvien ilmiöiden aiheuttamista vuorovaikutuksista*
- ulkoisista seikoista, kuten ilmastonmuutoksista, geologisista prosesseista tai ihmisen toiminnasta."*

Posivan suunnitelmassa on skenaarioiden muotoilu.

"A05. Perusskenaarion on pohjauduttava turvallisuustoiminnoille määriteltyihin tavoitteisiin niin, että otetaan huomioon satunnaiset poikkeamat tavoitearvoista. Yhden turvallisuustoiminnon olennaisen heikkenemisen vaikutusta tai, mikäli turvallisuustoimintojen välillä on kytkentää, yhtä useamman turvallisuustoiminnon heikkenemisen yhteisvaikutusta on analysoitava muunnelmaskenaarioiden avulla. Pitkäaikaisturvallisuutta heikentävien epätodennäköisten tapahtumien vaikutusten analysointia varten on muodostettava häiriöskenaarioita."

Posivan suunnitelmassa on varauduttu erilaisiin, sekä todennäköisinä pidettäviin että epätodennäköisiin skenaarioihin. Skenaarioiden muodostamisen tapa muistuttaa ylhäältä alas -menetelmää. YVL D.5 -ohjeen kohdassa A04 on toisaalta jonkin verran elementtejä alhaalta ylös -menetelmästä.

"A06. Loppusijoitettujen radioaktiivisten aineiden vapautumisen ja kulkeutumisen laskennallista arviointia varten on muodostettava konseptuaalisia malleja, joilla kuvataan turvallisuustoimintoja säätelevät ilmiöt ja prosessit. Näiden vapautumista ja kulkeutumista varsinaisesti kuvaavien mallien lisäksi tarvitaan turvallisuustoimintoihin vaikuttavia olosuhteita kuvaavia malleja. Konseptuaalisista malleista johdetaan, yleensä yksinkertaistaen, vastaavat laskennalliset mallit. Malleja yksinkertaistettaessa samoin kuin niiden tarvitsemia lähtötietoja määritettäessä periaatteena on oltava, että turvallisuustoiminnon tehokkuutta ei yliarvioida, mutta samalla vältetään myöskin liiallista aliarviointia."

Posivan suunnitelmassa Models and Data for the Repository System -raportti sisältää käytettyjen konseptuaalisten ja matemaattisten mallien kuvaukset loppusijoitustila-kallioopera-järjestelmälle. Biosphere Assessment Data Basis -raportti kuvaa biosfäärimallinnuksen vastaavat mallit ja lähtötiedot.

"A07. Mallinnuksen ja lähtötietojen määrittämisen on perustuttava korkeatasoiseen tutkimustietoon ja asiantuntijakäsitykseen, jotka on saatu laboratoriotutkimusten, sijoituspaikkatutkimusten ja luonnonanalogioiden tutkimisen kautta. Mallien ja lähtötietojen on sovelluttava kyseessä olevaan ske-

naarioon, tarkasteluajanjaksoon ja loppusijoitusjärjestelmään. Silloin kun mallien käyttämissä lähtötiedoissa on satunnaisvaihtelua esim. kallioperän heterogeenisuuden vuoksi, voidaan soveltaa stokastisia malleja.”

Posivan suunnitelmassa Models and Data for the Repository System -raportti sisältää käytettyjen konseptuaalisten ja matemaattisten mallien kuvaukset loppusijoitustila-kallioperä-järjestelmälle. Biosphere Assessment Data Basis -raportti kuvaa biosfäärimallinnuksen vastaavat mallit ja lähtötiedot.

”A08. Käytettäviä laskennallisia menetelmiä ja lähtötietoja valittaessa lähtökohtana on pidettävä, että todellisen säteilyaltistuksen ja vapautuvien radioaktiivisten aineiden todellisten määrien on hyvällä varmuudella oltava pienempiä kuin turvallisuusanalyysien antamat tulokset. Turvallisuusanalyysiin sisältyvien epävarmuuksien merkitys on arvioitava tarkoitukseen soveltuvilla menetelmillä, esim. herkkyysanalyysillä tai todennäköisyyspohjaisilla menetelmillä. Turvallisuusperusteluun on sisällyttävä arvio, miten luotettavasti turvallisuusvaatimukset täyttyvät ja mitkä ovat merkittävimmät luotettavuuteen vaikuttavat epävarmuudet.”

Turvallisuusanalyysit perustuvat perinteisesti konservatiivisuusperiaatteeseen, jonka mukaisesti mallit, lähtötiedot ja oletukset valitaan tietoisesti päästöjä yliarvioivaan suuntaan. Toisaalta ylikonservatiivisuutta tulee pyrkiä välttämään, jotta turvallisuusanalyysistä saadaan mielekäästä palautetta loppusijoitusjärjestelmän suunnitteluun. Posivan suunnitelmassa (Posiva 2008) todetaan, että sen epävarmuuksien tarkastelutapa tukeutuu suurelta osin eurooppalaisten viranomaisten toteuttaman pilottihankkeen periaatteisiin (Vigfusson et al. 2007). Suunnitelmassa on yksi luku omistettu epävarmuuksien pohdinnalle (Posiva 2008).

”A09. Jos skenaariota ei voida kattavasti ja perustellusti kuvata numeerisella turvallisuusanalyysillä, sen merkitys on selvitettävä täydentävin tarkasteluin. Ne voivat käsittää esim. yksinkertaistetuina menetelmin tehtyjä laskelmia, vertailuja luonnonanalogioiden tai sijoituspaikan geologista historiaa koskevia havaintoja. Tällaisten tarkastelujen merkitys on sitä suurempi, mitä pitempi tarkasteluajanjakso on kyseessä, ja yli miljoonan vuoden päähän ulottuva turvallisuuden arviointi voidaan pääasiassa perustaa tällaisiin täydentäviin menetelmiin. Täydentäviä menetelmiä on sovellettava myös varsinaisen turvallisuusanalyysin rinnalla lisäämään luottamusta analyysin tai sen osan tuloksiin.”

Posivan suunnitelmassa on mukana täydentävät tarkastelut.

”A10. Turvallisuusperustelu on dokumentoitava huolellisesti. Turvallisuusperustelun kunkin osan lähtökohtien, käytettyjen menetelmien, tulosten ja kytkennän kokonaisuuteen on käytävä helposti selville (selkeys) ja dokumentaatiosta on helposti löydettävä perustelut käytetyille oletuksille, lähtötiedoille ja malleille (jäljitettävyyden).”

Posivan suunnitelman raporttisalkkulähestymistapa pyrkii turvallisuusperustelun läpinäkyvään ja jäljitettävään dokumentointiin. Uuteen raporttisalkkuun kuuluu 9 raporttia.

”A11. Turvallisuusperustelun laatu on varmistettava loppusijoituslaitoksen suunnitteluun, rakentamiseen ja käyttöön liittyvällä johtamisjärjestelmällä. Hankkeen toteuttajalla on oltava tarkoitukseen soveltuva organisaatio, riittävä asiantuntemus ja tarkoituksenmukainen tiedonhallintajärjestelmä. Turvallisuusperustelun valmistelun eri osavaiheet on suunniteltava järjestelmällisesti ja tärkeiden tutkimusten ja analyysien tulokset on arvioitava riippumattomasti.”

Posivan suunnitelmassa (Posiva 2008) kuvataan yleisellä tasolla turvallisuusperustelun laadunhallintajärjestelmää, joka on yksi johtamisjärjestelmän keskeinen osa. Turvallisuusperustelun tekeminen on jaettu neljään osaprosessiin. Sinänsä Posivan johtamisjärjestelmä perustuu ISO 9001:200 –standardiin, ja Posiva vaatii samaa laatustandardia myös konsulteiltaan.

Kaiken kaikkiaan on nähtävissä, että Posivan turvallisuusperustelun uusin suunnitelma vastaa rakenteeltaan hyvin STUKin vaatimuksia, mikä ei sinänsä ole yllättävää, koska suunnitelmaa muokattiin nimenomaan STUKin toivomaan suuntaan.

7. Tieteellisen tutkimuksen rooli

Turvallisuusperustelu voidaan nähdä tapana jäsentää ja tuottaa tietoa ydinjätehuollon päätöksentekoa varten. Tavoitteena on, että käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituspäätös perustuu parhaaseen saatavilla olevaan tutkimustietoon. Tässä luvussa pohditaan lyhyesti tieteellisen tutkimuksen⁸ ja turvallisuusperustelun välistä suhdetta. Samalla tarkastellaan tieteellisen tutkimuksen ja viranomaisohjeiden välistä suhdetta sekä myös viranomaisohjeiden ja turvallisuusperustelun välistä suhdetta.

Tieteessä tehdään havaintoja ilmiöistä, tapahtumista ja prosesseista eri tavoin. Havaintoja luokitellaan ja niistä muotoillaan ymmärtämistä, yleistämistä ja käyttökelpoisuutta lisääviä teorioita. Teorioista puolestaan kehitetään yksinkertaistettuja malleja, esim. käsitteellisiä malleja⁹, laskenta- tai tietokonemalleja. Turvallisuusperustelun kannalta erityisen tärkeitä ovat laskentamallit, koska loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden arviointi perustuu olennaisesti laskennalliseen analyysiin. Turvallisuusperustelun luotettavuuden kannalta laskennallisten ja tietokonemallien kelpoistaminen kokeellisia havaintoja vastaan (mallien validointi) on välttämätöntä.

Loppusijoituksen turvallisuuteen liittyvän tieteellisen tutkimuksen erityispiirre on sen moni- ja poikkitieteellisyys. Koska tutkimus keskittyy yhtäältä teknisten vapautumisesteiden pitkäaikaiskäyttäytymiseen¹⁰ ja toisaalta haitallisen aineen vapautumiseen ja kulkeutumiseen¹¹, tarvitaan osaamista ja prosessien ymmärtämistä teknisten vapautumisesteiden käyttäytymisestä loppusijoitusolosuhteissa, kulkeutuvan aineen ominaisuuksista, kulkeutumisympäristöstä ja kulkeutumislähtöistä sinänsä. Hyvin tärkeää on myös ymmärtää ja mallintaa eri materiaalien ja proses-

⁸ Tässä tieteellistä tutkimusta käytetään lyhenteenä kattamaan teknistä ja luonnontieteellistä tutkimusta.

⁹ Tieteenfilosofiassa teorian ja mallin välillä tehdään toisinaan ero. Tässä yhteydessä teoriolla tarkoitetaan jonkin havainnon tai ilmiön abstraktia selitystä, joka voidaan luonnontieteessä usein esittää matemaattisessa muodossa. Jossain määrin teoria-käsitteen kanssa rinnakkainen käsite on malli, joka myös kuvaa havainnoitua todellisuutta mutta osin eri tavoin, kuten materiaalisina ja visuaalisina ilmentyminä (esim. pienoismallit, kartat) tai abstraktimpina matemaattisina esityksinä.

¹⁰ Liittyy taulukossa 4.1 esitettyihin turvallisuustoimintoihin, tarkemmin sanoen radionuklidien eristämiseen.

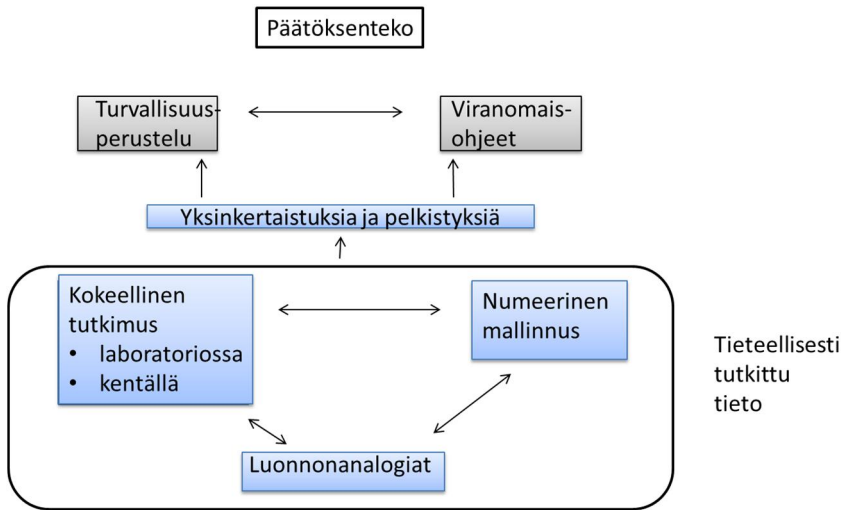
¹¹ Liittyy taulukossa 4.1 esitettyihin turvallisuustoimintoihin, tarkemmin sanoen radionuklidien leviämisen rajoittamiseen ja hidastamiseen.

sien toisiinsa kytkeytymisen vaikutuksia. Yksi tapa jäsentää turvallisuusperustelun luonnontieteellistä pohjaa on koota ilmiöihin, tapahtumiin ja prosesseihin liittyvä asiantuntemus omaksi prosessiraportiksi, kuten edellisessä luvussa kuvattiin.

Turvallisuusperustelun pohjana käytetty tieteellinen tieto voi olla yksinkertaistettu esitys todellisuudesta. Sen epätäydellisyys voidaan kuitenkin hyväksyä, kun tunnetaan se pätevyysalue, jossa esimerkiksi havainnoista tehdyn mallin tiedetään olevan voimassa. Tiedon tulee siis perustua riittävän monitieteellisiin tutkimuksiin, jotta yksinkertaistus voidaan perustella. Koko turvallisuusperustelun luotettavuus perustuu viime kädessä siihen, miten nykytietämyksen mukaiset ilmiömaailman havainnot, teoriat ja mallit siirtyvät turvallisuusperusteluun ja miten niitä sovelletaan. Tätä voidaan pitää koko ydinjätetutkimuksen yhtenä keskeisistä kysymyksistä.

Tiedon luotettavuuden arviointi niin kokonaisuutena kuin prosessitasollakin on loppusijoituksen tieteellisen perustelun kulmakivi. Tutkimustieto saattaa olla monista syistä hajonnut eri tutkimuslinjoiksi, joiden välille voi normaalisti toimivassa tiedeyhteisössäkin syntyä näkemuseroja silloinkin, kun havainnoidaan samaa ilmiökokonaisuutta. Tieteellinen metodi soveltuu ristiriitaisten tulosten käsittelyyn hyvin, sillä sen menetelmiä ovat tutkimuksen kriittinen analyysi, toisto, teorioiden testaus ja keskinäinen vertailu sekä lisätutkimus riippumattomalla menetelmällä. Joissakin tapauksissa tutkimuslinjakysymykseen ei ole nopeasti tai helposti löydettävissä riittävän vahvoja argumentteja minkään yksikäsitteisen teorian tai mallin taakse, vaan ratkaisu kehittyi tieteelliseen metodiin liittyvän hitaan konsensuksen muodostumisen kautta. Toisaalta jotkin luonnonilmiöt ja siten myös niiden teoriat ja mallit ovat käytännössä täysin kiistattomia, esim. painovoima, jota hyödynnetään pohjaveden virtausmallinnuksessa.

Loppusijoituksen turvallisuusperustelussa joudutaan väistämättä tilanteisiin, joissa ilmiöt on esitettävä yksinkertaistuksina verrattuna siihen mitä ilmiöstä sinänsä tiedetään. On tärkeää, että nämä yksinkertaistukset tehdään sopusoinnussa tieteellisen tutkimuksen kanssa ja että ne tulevat vaikutuksineen myös päätöksenteon tietoon. Kuvassa 7.1 on hahmotelma siitä, miten tieteellinen tutkimus, turvallisuusperustelu ja viranomaisohjeet suhtautuvat toisiinsa.

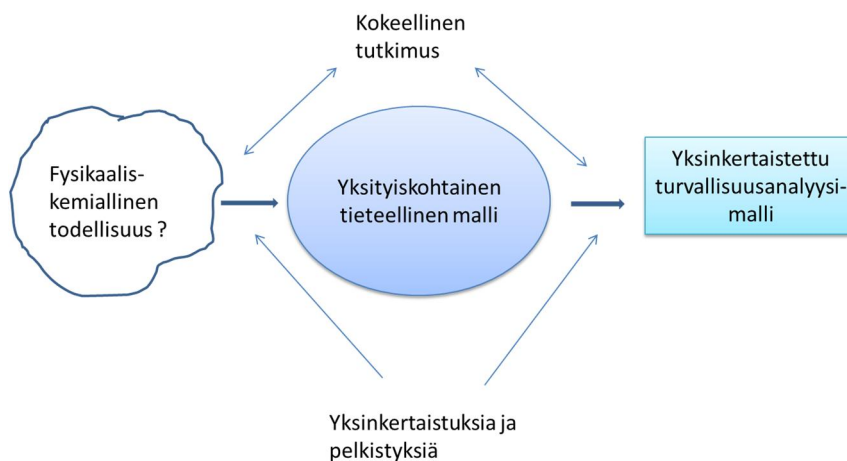


Kuva 7.1. Tieteellisen tutkimuksen tuki turvallisuusperustelulle ja viranomaisohjeille.

Havaitaan, että sekä turvallisuusperustelu että viranomaisohjeet perustuvat olennaisesti tieteelliseen tutkimuksen tuottamaan tutkittuun tietoon. Siinä välissä on kuitenkin tieteellisen tiedon yksinkertaistus- ja pelkistysvaihe. Yksinkertaistus ja pelkistys voidaan toteuttaa sitä paremmin mitä enemmän erilaista luotettavaa tutkimusaineistoa on saatavilla. Viranomaisohjeet perustuvat toki myös kansallisiin lakeihin ja asetuksiin sekä kansainväliseen yhteistyöhön esim. IAEA:ssa, mutta ohjeiden luonnontieteellisen järkevyyden takaamiseksi yhteys tieteelliseen tutkimukseen on syytä säilyttää. Kuvan 7.1. mukaisesti turvallisuusperustelun ja viranomaisohjeiden välillä tapahtuu dialogia, ja itse asiassa edellisessä luvussa nähtiin tuon dialogin vaikutus Posivan turvallisuusperusteluun suunnitelman asteittaisena tarkentumisena. Myös viranomaisohjeet tarkentuvat, esim. nyt virallinen käytetyn polttoaineen huoltoa koskeva ohje YVL 8.4 korvataan vuonna 2013 ohjeella YVL D.5.

Aiemmin luvuissa 5 ja 6 mainittiin konservatiivisuusperiaate, jota turvallisuusanalyysissä ja turvallisuusperustelussa noudatetaan kaikissa vaiheissa. Kuvassa 7.1 sama asia tuodaan esiin symbolisesti, ja tästä esitystavasta nähdään paremmin tiedon kulkusuunta. Turvallisuusperusteluun pätee itse asiassa sama kuin viranomaisohjeisiin: yhteyttä tieteelliseen tutkimukseen ei saa kadottaa. Turvallisuusperustelua voisi sanoa robustiksi tutkimukseksi erotukseksi tieteellisestä tutkimuksesta, ja olennaista on että robustikin tutkimus heijastelee tieteellisen tutkimuksen osaamisen tasoa. Konkreettisesti tämä tarkoittaa, että aika ajoin on hyvä pohtia, heijastaako turvallisuusanalyysin laskentamethodiikka, joka olennaisesti kehitettiin 1980-luvulla, vielä tämän hetken osaamista vai onko tieteellinen tutkimus edennyt siinä määrin, että turvallisuusanalyysin laskentamethodiikka voidaan konservatiivisuusperiaatetta uhraamatta päivittää. Kuvassa 7.2 on hah-

moteltu sitä, miten fysikaaliskemiallisesta todellisuudesta muokataan yksinkertaisuuksilla ja pelkistyksillä yksinkertaistettu turvallisuusanalyysimalli.



Kuva 7.2. Todellisuuden tutkiminen ja yksinkertaistaminen turvallisuusanalyysimalliksi.

Kuvasta havaitaan, että myös ns. yksityiskohtainen tieteellinen malli on aina yksinkertaistus fysikaaliskemiallisesta todellisuudesta. Malli on lisäksi ajan funktio: jos kokeellisten tutkimusten menetelmät kehittyvät, todellisuutta voidaan tutkia tarkemmin ja yksityiskohtaista tieteellistä mallia voidaan tarkentaa.

Tieteellisen tutkimuksen rooli turvallisuusperustelun kehittämisessä ja arvioimisessa on kiinnostava. Yhtäältä tieteellisen tutkimuksen tuloksista muokataan turvallisuusperustelun luonnontieteellinen substanssi. Toisaalta tieteellinen tutkimus on se, mitä vasten turvallisuusperustelua arvioidaan, kun STUK viranomaisena arvioi Posivan toimittaman turvallisuusperustelun hyvyttä. Turvallisuusperustelun hyvyttä ei nimittäin voi arvioida pelkästään turvallisuusperustelun sisäisistä lähtökohdista.

Ydinjätehuollon tutkimuksessa on leimallista sen pitkäjänteisyys, ja Suomessa on havahduttu osaamisen jatkuvuuden ongelmaan. Ydinenergian ja ydinjätetutkimuksen asiantuntijoiden ensimmäinen sukupolvi lähestyy eläkeikää, ja tutkimusorganisaatioilla, esim. VTT:llä on haastava työ rekrytoida lahjakkaita nuoria tutkijoita ja siirtää heille eläkkeelle lähtijöiden osaaminen. Tämä työ on parhaillaan käynnissä.

Itse asiassa Suomessa on havahduttu laajemminkin koko ydinenergia-alan, ei pelkästään ydinjätealan, osaajien kouluttamisen tarpeeseen. Tarve liittyy myös ydinenergian lisärakentamiseen Suomessa. Työ- ja elinkeinoministeriön johdolla Suomessa on toteutettu laaja osaamistarvekartoitus (Huttunen et al. 2012), jonka pohjalta koulutusta voidaan suunnitella.

8. Yhteenveto

Julkaisussa on tarkasteltu lyhyesti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuusperustelua ja sen roolia tutkimuksessa ja päätöksenteossa. Periaatteessa turvallisuusperustelu on se kokonaisdokumentaatio, jolla käytetyn polttoaineen loppusijoituksen luvanhakija, Suomessa Posiva Oy, osoittaa loppusijoituslaitoksensa pitkäaikaisturvallisuuden. Luvanhakijalla on turvallisuuden todistustaakka. Raportin tavoite on keskittyä turvallisuusperustelun rakenteeseen eli siihen, mitä asioita turvallisuusperusteluun katsotaan kuuluvan ja miksi. Turvallisuusperustelun sisällön laatiminen on Posivan vastuulla ja sen arvioiminen Säteilyturvakeskuksen (STUK) vastuulla.

Posivan suunnittelema käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus perustuu KBS-3-konseptiin, jota on kehitetty yhteistyönä Ruotsissa ja Suomessa. Ydinjätehuollossa pätee saastuttaja maksaa -periaate, eli ydinjätteiden tuottajat, ts. Posivan omistajat Teollisuuden Voima ja Fortum, ovat velvollisia suunnittelemaan, toteuttamaan ja maksamaan tuottamiensa ydinjätteiden turvallisen huollon. Valtion ydinjätehuoltorahastossa (VYR) pidetään yllä jätteiden tuottajilta kerättyä varallisuutta, jolla voidaan tarvittaessa kattaa kullakin hetkellä syntyneiden ydinjätteiden huolto tulevaisuudessa, myös tilanteessa, jossa jätehuoltovelvolliset ajautuisivat maksukyvyttömyyteen.

Käytetyn polttoaineen huoltoon on kansainvälisesti esitetty suoraa loppusijoitusta (Suomessa valittu vaihtoehto), jälleenkäsittelyä (suurten ydinenergiamaiden vaihtoehto) ja valvottua pitkäaikaisvarastointia (pätöksenteossaan selvästi vaikeuksiin päätyneiden ydinenergiamaiden vaihtoehto). Suomen ydinjätehuollon aikataulu on pitänyt maailmanlaajuisesti ainutlaatuisen tarkasti, mutta useassa isossa-kin ydinenergiamaassa jätehuollon päätöksenteko on ollut vaikeaa. Raportissa esitetään yhteenveto käytetyn polttoaineen huollon kaavailuista eri maissa.

Suomalaisessa käytetyn polttoaineen huollossa turvallisuusperustelu rajataan loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuteen. Turvallisuusperustelun tekninen kytkös päätöksentekoon on siinä, että se on Posivan 28.12.2012 jättämän loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen yksi osa. Turvallisuusperustelussa KBS-3-loppusijoituskonseptin vapautumisestelle määritellään turvallisuustoiminnot eli kuvaus siitä, millä tavalla kyseinen vapautumiseste edistää loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta.

Raportissa käydään lyhyesti läpi kansainvälisissä asiantuntijaorganisaatioissa IAEA (International Atomic Energy Agency) ja OECD/NEA (Nuclear Energy Agency) tehtyä turvallisuusperustelutyötä. Organisaatioiden raportoidun työn pohjalta on hahmoteltu asiat, joita turvallisuusperustelussa katsotaan ainakin tarvittavan: asiayhteys, järjestelmäkuvaus, turvallisuusanalyysi ja epävarmuuksien hallinta. Turvallisuusanalyysissa katsotaan tarvittavan ainakin skenaariot, laskentamallit, lähtötiedot, radionuklidien leviämisen laskenta, biosfäärilaskenta ja vertailu turvallisuuskriteereihin. Radionuklidien leviämisen laskentaan katsotaan kuuluvan ainakin laskentatapaukset, radionuklidien vapautuminen, pohjaveden virtaus, radionuklidien kulkeutuminen lähi- ja kaukoalueella.

Suomessa tehtävää turvallisuusperustelutyötä on kuvattu tarkastelemalla lyhyesti Posivan turvallisuusperustelun suunnitelman kehittymistä. Loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen yhteydessä on käytössä järjestyksessä kolmas suunnitelma. Posivan turvallisuusperustelun suunnitelman tarkentumiseen on vaikuttanut merkittävästi STUKilta saatu palaute, joko Posivan tutkimus- ja kehityssuunnitelmista tai turvallisuusperustelun suunnitelmasta. STUK on omalla tahollaan päivittämässä turvallisuusohjeitaan, ja ydinjätteiden loppusijoitusta koskeva uusi ohje YVL D.5 astuu voimaan v. 2013. Raportissa havaitaan, että Posivan uusin turvallisuusperustelun suunnitelma vastaa rakenteeltaan pitkälti STUKin tulevan YVL D.5 -ohjeen käytettävissä olevan luonnoksen ajattelua.

Lopuksi pohditaan tieteellisen tutkimuksen roolia ja havaitaan, että sekä turvallisuusperustelu että viranomaisohjeet rakentuvat substanssiltaan tieteellisesti tutkitun tiedon varaan. Edelleen katsotaan, että kummankin kohdalla yhteys tieteelliseen tutkimukseen edistää niiden luonnontieteellistä osuvuutta ja ajankohtaisuutta.

Lähdeluettelo

- Anttila, M., Björnberg, M. & Vuori, S. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaihtoehdot: Pitkäaikaisvarastointi ja transmutaatio. Kauppa- ja teollisuusministeriö KTM, energiaosasto, Helsinki. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 10. 64 s.
- Huttunen, R., Aurela, J., Melkas, H. & Avolahti, J. 2012. Kansallisen ydinenergia-alan osaamistyöryhmän raportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja: Energia ja ilmasto 2/2012, 273 s. http://www.tem.fi/files/32383/TEMjul_2_2012_web.pdf.
- IAEA 2011a. The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste Disposal DRAFT SAFETY GUIDE No. DS 355 (Version 2011-06-01).
- IAEA 2011b. Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements No. SSR-5., 62 s. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449_web.pdf).
- IAEA 2011c. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety guide No. SSG-14, 104, s. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1483_web.pdf).
- NEA 2012. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. ISBN 978-92-64-99190-3. (<http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2012/nea6923-MESA-initiative.pdf>).
- Nordic Authorities 1993. Disposal of High Level Radioactive Waste. Consideration of some Basic Criteria. The Radiation protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. 64 s.
- OECD 2008. Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? Symposium Proceedings Paris, France 23–25 January 2007, OECD NEA, 422 s. ISBN 978-92-64-99050-0.
- OECD 2009. International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC). Outcomes of the INTESC Project, 205 s.
- Peachey, C. 2012. Disposal plans. Nuclear Engineering International, June 2012, s. 38–48.

- Posiva 2006. TKS-2006. Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants: Programme for research, development and technical design for 2007–2009. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- Posiva 2008. Safety Case Plan 2008, POSIVA 2008-05, 80 s.
- Posiva 2009. TKS-2009. Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuolto: Selvitys suunnitelluista toimenpiteistä ja niiden valmistelusta vuosina 2010–2012. 532 s.
- Posiva 2012. YJH-2012. Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuollon ohjelma vuosille 2013–2015. 354 s.
- STUK 2011a. Ydinjätteiden loppusijoitus. Ohje YVL D.5, Luonnos 4 / 17.3.2011 (<https://ohjeisto.stuk.fi/YVL/D.5-L4.pdf>).
- STUK 2011b. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 4th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention. STUK-B 138 / October 2011 (http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/tiivistelmat/b_sarja/en_GB/stuk-b138/_files/86363725037371550/default/stuk-b138.pdf)
- Vieno, T. & Ikonen, A.T.K. 2005. Plan for Safety Case of Spent Fuel Repository at Olkiluoto. POSIVA 2005-01, 69 s.
- Vieno, T. & Nordman, H. 1999. Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99. POSIVA 99-07, 253 s.
- Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.-J. & Smith, R. 2007. European Study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management, 53 s. (http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/Pilotstudie_Radioactive%20Waste_0.pdf).
- Vuori, S. & Rasilainen, K. 2009. Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa. VTT Tiedotteita 2515, 59 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2515.pdf>

Liite A: Keskeisiä käsitteitä ja määritelmiä

Advektio; massavirtaprosessi, jossa vesi liikkuu ja kuljettaa mukanaan esim. radionuklidia.

Bentoniitti; montmorilloniittirikasta savea, joka on muodostunut vulkaanisesta tuhkasta suolaisessa vedessä. Luonnontuotteena sen koostumus vaihtelee.

EBS, engineering barrier system; ihmisen tekemien teknisten vapautumisesteiden järjestelmä loppusijoitustilassa. KBS-3V-konseptissa EBS koostuu lähinnä kapselista, bentoniittipuskurista, tunnelitäytteestä ja tunnelien sulkurakenteista. Usein myös jätematriisi luetaan kuuluvaksi teknisiin vapautumisestesiin (esim. STUKin YVL D.5 -ohje), tosin se voidaan periaatteessa lukea myös itse jätetuotteeksi, jonka sisältämien radionuklidien leviämistä muut tekniset vapautumisestest pyrkivät rajoittamaan.

FEP, features, events, processes; luettelo turvallisuudelle mahdollisesti tärkeistä ilmiöistä, tapahtumista ja prosesseista. On olemassa kansainvälisiä (esim. OECD/NEA:ssa) ja kansallisia FEP-tietokantoja.

Kaukoalue, far-field; loppusijoituspaikan alkuperäiset olosuhteet säilyttänyt kalloperä.

KBS-3V/KBS-3H; KBS-3V on KBS-3-loppusijoituskonseptin pystyvaihtoehto (vertical), jossa kapselit loppusijoitetaan loppusijoitustunnelin lattiaan kairattuihin pystysuoriin sijoitusreikiin (yksi kapseli per reikä). KBS-3H on KBS-3-loppusijoituskonseptin vaakavaihtoehto (horizontal), jossa loppusijoituskapselit loppusijoitetaan vaakasuuntaan kairattuihin pitkiin loppusijoitustunneleihin (useita kapseleita per tunneli).

Konservatiivisuusperiaate; loppusijoituksen turvallisuusanalyysissä noudatettu periaate, jonka mukaisesti turvallisuusanalyysin oletukset, laskentamallit ja lähtötiedot pyritään valitsemaan pessimistisesti eli päästöjä yliarvioivaan suuntaan. Mikäli konservatiivisesti kuvattu loppusijoitusjärjestelmä alittaa turvallisuusksiteerit, tarkasti kuvattu loppusijoitusjärjestelmä (jos absoluuttisen tarkka kuvaus olisi mahdollista) alittaisi ne myös.

Laskentatapaus; säteilyvaikutuksen laskemista varten muodostettu skenaarion realisaatio, jossa määritellään kaikkien laskemisessa tarvittavien parametrien numeeriset arvot. Yhdestä skenaarionista voidaan johtaa useita laskentatapauksia.

Luonnonanalogia; luonnon järjestelmä, joka joltain osaltaan muistuttaa loppusijoitusjärjestelmää, esim. materiaali, prosessi.

Lähialue, near-field; loppusijoitustilan louhimisesta ja jätteen ominaisuuksista aiheutunut häiriintynyt vyöhyke loppusijoitustilassa ja sen ympärillä. Lähialue sisältää EBS:n eli tekniset vapautumisestest.

Moniesteperiaate; termi, jolla tarkoitetaan loppusijoitustilan toisiaan täydentävien teknisten ja luonnon vapautumisesteiden muodostaman kokonaisuuden turvallisuusuointoa. Moniesteperiaatteeseen kuuluu, että yksittäisen vapautumisesteen vajavainen toiminta ei vaaranna loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta.

Skenaario, ”jossitelma”; Loppusijoitustila-kallioperä-biosfääri -järjestelmän mahdollisia vaihtoehtoisia tulevaisuuksia haarukoidaan erilaisten skenaarioiden avulla. Skenaario on hypoteettinen loppusijoitusjärjestelmän kehittymisen kuvaus, joka koostuu peräkkäisistä tapahtumista. Olennaista on, että loppusijoitusjärjestelmän pitkäaikaisturvallisuutta arvioidaan riittävän kattavasti erilaisten skenaarioiden avulla. Skenaario noudattaa jos-niin-logiikkaa, se ei ole ennuste.

Edellä selitettiin lyhyesti eräitä tässä julkaisussa käytettyjä käsitteitä ja termejä. Kiinnostunut lukija löytää laajemman ydinjätehuollon sanaston esim. lähteestä IAEA, 2003. Radioactive Waste Management Glossary. 2003 Edition, International Atomic Energy Agency, 54 s. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1155_web.pdf).

Nimeke	Käytetyn polttoaineen huolto Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä
Tekijä(t)	Kari Rasilainen, Seppo Vuori, Markus Olin, Lasse Ahonen & Juhani Suksi
Tiivistelmä	<p>Julkaisussa on yleiskuvaus turvallisuusperustelun roolista käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa. Turvallisuusperustelu on se dokumentaatio, jolla loppusijoituksen luvanhakija haluaa lupahakemuksessaan osoittaa loppusijoituslaitoksensa turvallisuuden. Turvallisuuden todistustaakka on luvanhakijalla. Käytetyn ydinpolttoaineen huollon suunnitelmia Suomessa ja muissa maissa kuvataan lyhyesti. Suomessa käytetyn polttoaineen loppusijoituksen turvallisuusperustelu koskee pitkäaikais-turvallisuutta. Kansainvälisissä asiantuntijajärjestöissä IAEA ja NEA tehtyä turvallisuusperustelutyötä kuvataan, ja tämän työn vaikutus havaitaan myös suomalaisessa turvallisuusajattelussa. Suomessa Posiva Oy on edennyt kolmanteen turvallisuusperustelun suunnitelmaansa: suunnitelma on tarkentunut Säteilyturvakeskuksen kanssa käydyn dialogin myötä. Samaan aikaa Säteilyturvakeskus päivittää omaa ohjeistustaan. Havaitaan, että Posivan uusin turvallisuusperustelun suunnitelma on rakenteeltaan varsin lähellä STUKin uusimman ohjeluonnoksen ajattelua. Tieteellisen tutkimuksen rooli on merkittävä turvallisuusperustelulle, sillä sekä turvallisuusperustelu itse että viranomaisohjeistus perustuvat olennaisesti tieteellisesti tutkittuun tietoon, ja kummallekin on olennaista, että yhteys tutkimukseen säilyy.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7980-8 (nid.) ISBN 978-951-38-7981-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (painettu) ISSN 2242-122X (verkkojulkaisu)
Julkaisu-aika	Huhtikuu 2013
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	52 s. + liitt. 2 s.
Avainsanat	Nuclear waste management, final disposal, long-term safety, safety case, safety assessment
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111

Title	Management of spent nuclear fuel Safety Case as a tool of research and decision making
Author(s)	Kari Rasilainen, Seppo Vuori, Markus Olin, Lasse Ahonen & Juhani Suksi
Abstract	An overall picture is given about the role of safety case in the final disposal of spent nuclear fuel. Safety case is the documentation with which the applicant of licence for a spent fuel repository wants to prove the safety of the repository. The burden of proof lies with the applicant. Plans of spent fuel management in Finland and other countries are described briefly. In Finland, safety case is about long-term safety of the spent fuel repository. Safety case work done in international expert organisations IAEA and NEA is described briefly, and the effect of this work on Finnish safety thinking is observed. In Finland, the safety case work by Posiva Oy has advanced to the third safety case plan; safety dialogue with the Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland (STUK) has focussed the plan. Currently, STUK is updating its set of regulatory guides. It is noted that the latest safety case plan by Posiva is very close to the safety thinking in STUK's forthcoming guide on nuclear waste disposal. The role of scientific research in safety case is important, as both the safety case and regulatory guides are fundamentally based on scientific knowledge, and for both it is essential that the link to scientific research is maintained.
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7980-8 (Soft back ed.) ISBN 978-951-38-7981-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Print) ISSN 2242-122X (Online)
Date	April 2013
Language	Finnish, English abstract
Pages	52 p. + app. 2 p.
Keywords	Nuclear waste management, final disposal, long-term safety, safety case, safety assessment
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

VTT Technical Research Centre of Finland is a globally networked multitechnological contract research organization. VTT provides high-end technology solutions, research and innovation services. We enhance our customers' competitiveness, thereby creating prerequisites for society's sustainable development, employment, and wellbeing.

Turnover: EUR 300 million

Personnel: 3,200

VTT publications

VTT employees publish their research results in Finnish and foreign scientific journals, trade periodicals and publication series, in books, in conference papers, in patents and in VTT's own publication series. The VTT publication series are VTT Visions, VTT Science, VTT Technology and VTT Research Highlights. About 100 high-quality scientific and professional publications are released in these series each year. All the publications are released in electronic format and most of them also in print.

VTT Visions

This series contains future visions and foresights on technological, societal and business topics that VTT considers important. It is aimed primarily at decision-makers and experts in companies and in public administration.

VTT Science

This series showcases VTT's scientific expertise and features doctoral dissertations and other peer-reviewed publications. It is aimed primarily at researchers and the scientific community.

VTT Technology

This series features the outcomes of public research projects, technology and market reviews, literature reviews, manuals and papers from conferences organised by VTT. It is aimed at professionals, developers and practical users.

VTT Research Highlights

This series presents summaries of recent research results, solutions and impacts in selected VTT research areas. Its target group consists of customers, decision-makers and collaborators.

Käytetyn polttoaineen huolto

Turvallisuusperustelu tutkimuksen ja päätöksenteon välineenä

Posiva Oy jätti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen Suomen hallitukselle 28.12.2012. Siihen kuuluvalla turvallisuusperustelulla luvanhakija osoittaa loppusijoituslaitoksensa turvallisuuden. Rakentamislupahakemuksessa loppusijoituksen turvallisuuden todistustaakka on luvanhakijalla.

Raportissa kuvataan turvallisuusperustelua syksyllä 2012 käytettävissä olleiden tietojen ja suunnitelmien valossa. Kansainvälisissä asiantuntijajärjestöissä IAEA ja OECD/NEA sekä Suomessa Posivassa ja Säteilyturvakeskuksessa tehtyä turvallisuusperustelutyötä esitellään lyhyesti. Tavoitteena on kuvata periaatetasolla turvallisuusperustelun rakennetta ja turvallisuusargumentoinnin jäsentämistä eli sitä, mihin asioihin turvallisuusperustelussa kiinnitetään huomiota ja miksi. Turvallisuusperustelun sisältöön ei oteta kantaa, sillä turvallisuusperustelun laatiminen on luvanhakijan vastuulla ja sen arvioiminen viranomaisten vastuulla.

Työ kuuluu Kansalliseen ydinjätehuollon tutkimusohjelmaan (KYT2014), jonka nyt menossa oleva tutkimusjakso kattaa vuodet 2011–2014. Tutkimusohjelmaa rahoittavat yhdessä Valtion ydinjätehuoltorahasto (VYR) ja mukana olevat tutkimuslaitokset.

ISBN 978-951-38-7980-8 (nid.)
ISBN 978-951-38-7981-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-1211 (painettu)
ISSN 2242-122X (verkkójulkaisu)

