

Satu Siltanen

Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuudesta

Kirjallisuusselvitys

**Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia
käytetyn ydinpolttoaineen
loppusijoituksen palautettavuudesta**
Kirjallisuusselvitys

Satu Siltanen
VTT Prosessit

ISBN 951-38-6122-8 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6123-6 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosessit, Otakaari 3 A, PL 1608, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6390

VTT Processer, Otsvängen 3 A, PB 1608, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6390

VTT Processes, Otakaari 3 A, P.O.Box 1608, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6390

Kansikuva: Kapselien palauttamiskoetta varten sijoitetut sähkölämmittimillä varustetut koekapselit Äspön kalliolaboratoriossa Ruotsissa. Ympäröivään kallioon ja kapselin pinnalle on asennettu sensoreita lämpötilan ja muiden ominaisuuksien monitorointia varten. (Lähde SKB 2001.)

Toimitus Leena Ukoski

Edita Prima Oy, Helsinki 2003

Siltanen, Satu. Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuudesta. Kirjallisuusselvitys [Technical and economic aspects of retrievability in spent nuclear fuel disposal. A literature survey]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2187. 72 s.

Avainsanat nuclear wastes, spent fuel, retrievability, costs, feasibility, final disposal canisters, reopening, tunnels, temperature, radiation

Tiivistelmä

Kirjallisuustutkimukseen on koottu käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuuden teknisiä ja kustannusnäkökohtia.

Suomalainen käytetyn polttoaineen loppusijoitussuunnitelma sisältää palautettavuutta edistäviä piirteitä, kuten loppusijoituksen vaiheittaisen etenemisen, kuparikapselien hyvän korroosionkeston ja graniittiin louhittavien loppusijoitustunnelien pitkäikäisyyden. Mahdollisia teknisiä ja poliittisia motiiveja käytetyn polttoaineen palauttamiseen kerättiin kirjallisuudesta. Toimintaa mahdollisen palauttamisen jälkeen tarkastellaan polttoainekapselien kuljetusten, avaamisen ja välivarastoinnin osalta. Palauttaminen on mahdollista loppusijoituksen elinkaaren kaikissa vaiheissa, ja palauttamisen tekninen toteutus esitetään ennen sijoitusreiän sulkemista, sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen ja kaikkien tilojen sulkemisen jälkeen. Kallioperän olosuhteita, polttoainekapselien lämmöntuottoa, säteilyä ja bentoniitin ominaisuuksia tarkastellaan palautettavuuden kannalta. Ydinmateriaalivalvonnan, monitoroinnin ja tiedon säilyttämisen kysymyksiin otetaan kantaa palautettavuuden yhteydessä.

Erilaisia tapoja kustannusten ilmaisemiseen ovat rahamäärä, prosenttiosuus koko loppusijoituksen kustannuksesta ja viivästymä loppusijoituksen suunnitellusta aikataulusta. Laskettuja kustannuksia koottiin Suomen mallin mukaiselle välittömästi suljettavalle loppusijoitustilalle ja vertailuna eräissä Euroopan maissa suunnitellulle, pidennetyn aukiolon tapaukselle. Suomessa kustannuksia on arvioitu melko karkeasti, mutta Suomen kannalta kiinnostava on Ruotsissa laskettu kustannusesimerkki 400:n loppusijoituskapselin palauttamisesta sijoitustunnelien sulkemisen jälkeen. Palautettavuuden kustannuksista löydettiin vain muutama tarkempi laskelma, koska palauttaminen on varsin epätoennäköistä ja ajoittuu toteutuessaan pitkälle tulevaisuuteen.

Siltanen, Satu. Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palauttavuudesta. Kirjallisuusselvitys [Technical and economic aspects of retrievability in spent nuclear fuel disposal. A literature survey]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2187. 72 p.

Keywords nuclear wastes, spent fuel, retrievability, costs, feasibility, final disposal canisters, reopening, tunnels, temperature, radiation

Abstract

This literature research collects cost and feasibility aspects of retrievability of spent nuclear fuel disposal.

The Finnish plan for the final disposal of spent nuclear fuel includes some features favouring retrievability, like modularity of disposal plan, good corrosion resistance of copper canisters and long estimated lifetime of disposal shafts and tunnels. Possible political and technical arguments for retrievability are collected and the possible actions taken after retrieving (opening of copper canisters, transportations and interim storage) are looked into. In the Finnish disposal plan retrieving is possible in each stage of repository development. Technical feasibility of retrieving is presented before sealing of a disposal hole, after filling and sealing of a disposal tunnel and after final closure of the repository. Many features of the disposal concept (hydrogeological conditions, radioactive radiation and heat generation of the spent fuel, and properties of bentonite) affect the feasibility and cost of retrieving. Questions dealing with nuclear material safeguards, monitoring and continuity of knowledge should be taken into account when retrievability is being considered.

Different ways used for expressing the cost of retrieving, are currency unit, delay of the scheduled disposal project and percentages of the actual disposal cost. Estimated costs for two different cases of retrievability, immediate closure and postponed closure of repository, are presented. Cost estimates, made in Finland, are quite rough, but the Swedish cost calculation example of immediate closure case is interesting because of similarity of Finnish and Swedish disposal concepts. There are also examples of cost, based on research and development work enhancing retrievability. It is noticed that there are only few exact cost estimations relating to retrievability. The reasons might be the improbability of actual retrieving and the fact that retrieving, if materialised, will take place far in the future.

Alkusanat

Tämä työ on tehty Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT Prosessit-tutkimusyksikössä) osana Kansallista ydinjätehuollon tutkimusohjelmaa (KYT), joka toteutetaan vuosina 2002–2005. Kansallista ydinjätehuollon tutkimusohjelmaa rahoittavat kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM), Säteilyturvakeskus (STUK), Fortum Oyj, Teollisuuden Voima (TVO), Posiva Oy ja Teknologian edistämiskeskus (Tekes). Työ on luonteeltaan kirjallisuustutkimus, ja siinä on ollut tavoitteena laatia lähinnä suomalaisesta näkökulmasta yleiskuvaus käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuuden teknistaloudellisista näkemyksistä. Työ on toteutettu osana KTM:n rahoittamaa projektia Ydinjätehuollon teknistieteelliset perusteet (TEPE). Työn ohjaajana on toiminut tekn. tri Kari Rasilainen.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
2. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen kuvaus.....	10
2.1 Ydinjätehuolto Suomessa.....	10
2.2 Ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen.....	11
2.3 Loppusijoitus.....	12
2.3.1 Loppusijoitustilat.....	13
2.3.2 Loppusijoituksen tekninen kulku.....	16
2.4 Loppusijoitussuunnitelman palautettavuutta edistäviä seikkoja.....	20
3. Esitettyjä perusteluja palautettavuudelle.....	21
3.1 Palautettavuuden puolesta.....	21
3.1.1 Teknisiä perusteluja.....	21
3.1.2 Poliittisia perusteluja.....	23
3.2 Palautettavuutta vastaan.....	24
3.3 Mahdollisia palautettavuuden syitä suomalaisessa loppusijoitusmallissa.....	24
4. Mitä palauttamisen jälkeen?.....	26
4.1 Palauttamisen jälkeiset suunnitelmat.....	26
4.2 Kuljetus.....	27
4.3 Polttoainekapselien avaaminen.....	28
4.4 Välivarastointi.....	28
5. Yleiskuvaus palautettavuuden tekniikasta ja kustannuksista.....	30
5.1 Palautettavuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät.....	30
5.1.1 Palauttamisen ajankohta.....	30
5.1.2 Lämpötila.....	31
5.1.3 Olosuhteet kallioperässä.....	32
5.1.4 Säteily.....	34
5.1.5 Bentoniitti.....	37
5.2 Palauttaminen loppusijoitustilan elinkaaren eri vaiheissa.....	37
5.2.1 Palauttaminen ennen sijoitusreiän sulkemista.....	37
5.2.2 Palauttaminen sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen.....	39
5.2.3 Palauttaminen loppusijoitustilan sulkemisen jälkeen.....	43

5.3	Monitorointi, ydinmateriaalivalvonta ja tiedon säilyminen loppusijoituksesta ..	45
5.3.1	Ydinmateriaalivalvonta	45
5.3.2	Monitorointi	47
5.3.3	Tiedon säilyttäminen	48
5.4	Kapselien palauttamiskoe Äspön kalliolaboratoriossa	49
6.	Kirjallisuudessa käytettyjä kustannusten esitystapoja	51
6.1	Kenen vastuulla ydinjätteen palauttamisen kustannukset ovat?	51
6.1.1	Palauttamisen ajankohdan ja syyn vaikutukset	52
6.2	Pidennetty loppusijoitustilojen aukiolo vai välitön tilojen sulkeminen?	54
6.2.1	Kustannusvaikutuksia eri tapauksissa	56
6.3	Kustannusten esitystapoja ja kustannusten arvioinnin vaikeuksia	57
7.	Arvioituja kustannuksia	60
7.1	Palauttamisen kustannus KBS-3-konseptin maissa	60
7.1.1	Suomi	60
7.1.2	Ruotsi	61
7.2	Pidennetyn aukioloajan ylläpitokustannukset	61
7.3	Tutkimuksen ja tuotekehityksen kustannuksia	62
8.	Johtopäätökset	65
	Lähdeluettelo	67

1. Johdanto

Kun energiaa tuotetaan ydinvoimalla, syntyy kolmenlaista radioaktiivista jätettä: voimalaitoksen toiminnasta syntyvää voimalaitosjätettä, käytettyä ydinpolttoainetta sekä voimalaitoksen purkamisesta syntyvää purkujätettä. Voimalaitoksen käytöstä syntyvien voimalaitosjätteiden loppusijoitus on jo käynnissä. Ne sijoitetaan Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten maanalaisiin voimalaitosjätteen loppusijoitustiloihin. Molempien voimalaitosten runsasaktiivinen jäte, eli käytetty ydinpolttoaine, tullaan sijoittamaan syvälle kallioperään rakennettaviin loppusijoitustiloihin Olkiluotoon. Matala- ja keskiaktiivinen purkujäte suunnitellaan loppusijoitettavaksi voimalaitosjätteiden loppusijoitustiloihin rakennettaviin lisäsiiloihin. Loppusijoituksen tarkoituksena on eristää radioaktiiviset aineet lopullisella ja turvallisella tavalla elollisesta luonnosta.

Loppusijoitus ajatellaan nimensä mukaisesti kertakaikkiseksi ydinjätehuollon ratkaisuksi. Valtioneuvoston päätöksessä käytetyn ydinpolttoaineen turvallisuudesta (VN 478/99) on kuitenkin maininta loppusijoitustilojen avattavuudesta: ”mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen tarkoituksenmukaiseksi”. Tässä julkaisussa tarkastellaan käytetyn ydinpolttoaineen palautettavuutta kallioon louhituista loppusijoitustiloista maan pinnalle.

Palautettavuus määritellään mahdollisuutena geologisesti loppusijoitetun ydinpolttoaineen palauttamiseen maan pinnalle. Palautettavuus ei käsitteenä sisällä varsinaista toimintaa käytetyn ydinpolttoaineen palauttamiseksi mutta antaa mahdollisuuden tämän toimenpiteen harkintaan.

Tämä julkaisu on luonteeltaan kirjallisuusselvitys, jossa pääpaino on palautettavuuden teknisessä toteutettavuudessa ja kustannuksissa. Suomen loppusijoitusmalli esitetään pääpiirteiltään, samoin kuvataan lyhyesti kirjallisuudessa esitettyjä mahdollisia syitä käytetyn polttoaineen palauttamiseen ja toimenpiteitä palauttamisen jälkeen.

Julkaisussa keskitytään niihin seikkoihin loppusijoitusmallissa, jotka vaikuttavat palauttamisen kustannuksiin ja asettavat erityisvaatimuksia palauttamiseen käytettävälle tekniikalle ja työtavoille. Selvitykseen on koottu myös erilaisia kirjallisuudessa esitettyjä tapoja kustannusten arviointiin ja esitetty laskettuja kustannusarvioita polttoaineen palauttamiselle. Tekniikan osalta julkaisun pääpaino on Suomessa loppusijoituskonseptiksi valitussa KBS-3-mallissa, mutta kustannusten osalta tarkastellaan myös tilannetta muualla maailmalla.

2. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen kuvaus

Ydinenergilaki säätelee kaikkea ydinteknistä toimintaa Suomessa. Ydinenergilain mukaan Suomessa tuotettu ydinjäte on sijoitettava pysyväksi tarkoitettulla tavalla Suomeen. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituspaikaksi Suomessa valittiin vuonna 2001 periaatepäätöksessä Eurajoen Olkiluoto ja loppusijoituksen suunnitelmat ovat jo pitkällä. Tässä luvussa pyritään antamaan yleiskuvaus jätehuollon ja loppusijoituksen mallista Suomessa, jotta voidaan käsitellä käytetyn polttoaineen palautettavuutta.

2.1 Ydinjätehuolto Suomessa

Suomen ydinjätehuolto perustuu järjestelmään, jossa on kolme päätoimijaa. Ylin johto ydinenergia-alalla on kauppa- ja teollisuusministeriöllä (KTM), Säteilyturvakeskus (STUK) huolehtii säteilyturvallisuuskysymyksistä ja ydinjätteiden tuottajat, eli Teollisuuden Voima Oy ja Fortum Oyj, ovat ydinenergilain mukaan vastuussa tuottamiensa jätteiden loppusijoituksesta ja loppusijoituksen kustannuksista. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten on perustettu ydinvoimayhtiöiden yhteisesti omistama Posiva Oy, joka aloitti toimintansa 1996. Ydinvoimayhtiöiden (Posivan) vastuulla on myös tutkimus- ja kehitystyö käytetyn polttoaineen turvallisen loppusijoituksen toteuttamiseksi. Toimintaa valvotaan viranomaisten, kuten Säteilyturvakeskuksen, toimesta, varmistuen turvallisuuskriteerien ja kansainvälisten sitoumusten täyttyminen. Viranomaiset valmistelevat myös ydinjätehuoltoon liittyvän lainsäädännön teknisen sisällön.

Toukokuussa 1999 Posiva jätti periaatepäätöshakemuksen käytetyn polttoaineen loppusijoittamisesta Eurajoen Olkiluotoon. Hakemuksen tukena oli loppusijoituslaitoksen ympäristövaikutusten arviointiraportti (YVA). Valtioneuvosto teki myönteisen periaatepäätöksen joulukuussa 2000, jota ennen sekä Eurajoen kunta että STUK olivat antaneet hakemuksesta myönteiset lausunnot. Eduskunta hyväksyi valtioneuvoston periaatepäätöksen toukokuussa 2001. Tämä päätös koski nykyisten neljän reaktoriyksikön käytettyä polttoainetta. Toukokuussa 2002, samalla kun viidennestä ydinreaktorista tehtiin myönteinen periaatepäätös, eduskunta vahvisti periaatepäätöksen, jonka mukaan myös viidennen reaktoriyksikön käytetty polttoaine sijoitetaan Olkiluotoon.

Loppusijoitustilojen rakentaminen on suunniteltu aloitettavaksi noin vuonna 2010 ja ydinjätteen loppusijoitus alkavaksi noin vuonna 2020. Ennen varsinaisten loppusijoitustilojen rakentamista rakennetaan Olkiluotoon maanalainen tutkimusluolasto ONKALO, jonka rakentaminen aloitetaan suunnitelmien mukaan 2004. ONKALON rakentamisen yhteydessä saadaan arvokasta kokemusta louhintatöistä ja paikallisen kallioperän olosuhteista. Tehtyjä suunnitelmia loppusijoitustilojen rakentamisesta tarkennetaan tutki-

musluolastosta saatujen kokemusten perusteella. Käytetyn polttoaineen loppusijoituksen aikataulu on taulukossa 1.

Käytetyn ydinpolttoaineen huollon historiallista taustaa Suomessa, toimijoita, päätöksenteon kulkua ja vastuukysymyksiä on käsitelty enemmän mm. viitteissä Rasilainen (2002) ja Litmanen et al. (1999).

Taulukko 1. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen aikataulu Suomessa.

Koko maan alueeseulontatutkimukset	1983–1985
Alustavat paikkatutkimukset	1986–1992
Yksityiskohtaiset paikkatutkimukset	1993–2000
Loppusijoituspaikan valinta	2001
Tutkimuskuilu ja täydentävät tutkimukset	2001–2010
ONKALON rakentaminen aloitetaan	2004
Kapselointilaitoksen ja loppusijoitustilan rakentaminen	2010–2020
Loppusijoituksen aloittaminen	2020

2.2 Ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen

Ydinjätteiden tuottajilla on vastuu tuottamiensa jätteiden huollosta ja niiden kustannuksista. Tämä koskee myös loppusijoitusta. Jätteen tuottajia eli ns. jätehuoltovelvollisia ovat Teollisuuden Voima Oy, Fortum Power and Heat Oy sekä Valtion teknillinen tutkimuskeskus, jonka käytössä on FiR-1-tutkimusreaktori.

Taloudellisten vastuiden ja ydinjätehuollon toteutumisen varmistamiseksi on kauppa- ja teollisuusministeriön alaisuuteen vuonna 1988 perustettu valtion ydinjätehuolto rahasto (KTM 1998), jonka toiminnasta on yksityiskohtaisesti määrätty ydinenergialaissa ja -asetuksessa sekä erillisissä valtioneuvoston päätöksissä. Rahastoon kerätään varoja jätteen tuottajilta takeeksi siitä, että tulevaisuudessa suoritettavat ydinjätehuollon toimenpiteet voidaan kaikissa tilanteissa hoitaa – siis siinäkin tapauksessa, että jätehuoltovelvollinen ei jostain syystä kykenisi huolehtimaan jätehuollosta, vaan vastuu siirtyisi valtiolle. Kullakin hetkellä rahastossa tulee olla kertynyttä jätemäärää vastaava määrä pääomaa joko rahana tai vakuuksina. Vakuuksista ja niiden käyttämisen edellytyksistä on lainsäädännössä tarkat määräykset.

Kauppa- ja teollisuusministeriö vahvistaa vuosittain kullekin jätehuoltovelvolliselle niiden taloudellisen vastuumäärän, jonka pohjalta maksettavat varautumismaksut määrytyvät. Rahaston tehtävänä on kerätä, säilyttää ja turvallisesti sijoittaa jätehuoltovelvollisten rahastoon maksamat varat. Rahaston pääoma muodostuukin, paitsi ydinjätehuoltomaksuista, myös rahaston sijoitus- ja lainaustoiminnan voitosta. Ydinvoimayhtiöt sisällyttävät ydinjätehuoltoon varautumisesta aiheutuvat kustannukset ydinsähkön hintaan.

Kauppa- ja teollisuusministeriön viimeisimmän laskelman mukaan kaikkien Suomessa tähän mennessä syntyneiden ydinjätteiden jäljellä oleva ydinjätehuolto maksaisi nyt toteutettuna noin 1,2 miljardia euroa. Summa sisältää myös nykyisten laitosten purkamiskustannukset (KTM 2002). Vuoden 2001 tilinpäätöksen mukaan valtion ydinjätehuoltorahaston taseen loppusumma 31.12.2001 oli 1 193 milj. euroa, joten tarvittavista varoista on nyt rahastoitu 98 %. Kummankin voimayhtiön vastuuvajauksista on valtiolle annettu lain vaatimat vakuudet.

Kaikkien Suomessa nyt toiminnassa olevien neljän ydinreaktorin koko suunnitellulla eliniällä tapahtuvasta toiminnasta ja purusta aiheutuviksi ydinjätteiden huollon kokonaiskustannuksiksi on arvioitu noin 1 700 milj. euroa (Rasilainen & Vuori 1999).

2.3 Loppusijoitus

Loppusijoitusprosessi käsittää tilojen suunnittelun, rakentamisen, käyttövaiheen ja tilojen sulkemisen. Suomessa loppusijoituksen malliksi valittu konsepti on ruotsalaisten kehittämä KBS-3. Tässä loppusijoitusratkaisussa korostetaan kolmea turvallisuusnäkökohtaa (Grupa et al. 2000, Annex I.G: Sweden): eristäminen, pidättäminen ja laimentaminen.

Loppusijoitusratkaisu perustuu moniesteperiaatteeseen (Riekkola et al. 1999) eli siihen, että radioaktiivisten aineiden eristäminen ja pidättäminen toteutetaan useilla, toisiaan varmistavilla ja toisistaan riippumattomilla vapautumisesteillä. Tällöin yhden esteen peittäminen ei vaaranna koko moniestejärjestelmän toimivuutta. Käytetty polttoaine sijoitetaan kapselisiin, jotka tarjoavat suojan mekaanista rasitusta ja korroosiota vastaan. Kapseli on kaasu- ja vesitiivis ja estää radioaktiivisten aineiden vapautumisen. Kapselien sijoitusreiät on vuorattu bentoniittisavella, joka vähentää veden liikkuvuutta, mukailee kallion pieniä liikkeitä ja vuodon sattuessa viivästä radioaktiivisten aineiden leviämistä. Tunnelitäyte ja sulkemISRakenteet rajoittavat pohjaveden virtausta, tukevat tunnelia mekaanisesti, estävät tahattoman tunkeutumisen ja mahdollistavat olosuhteiden palautumisen kallioperässä kohtuullisella tasolla ennalleen. Lisäksi peruskallio suojaa

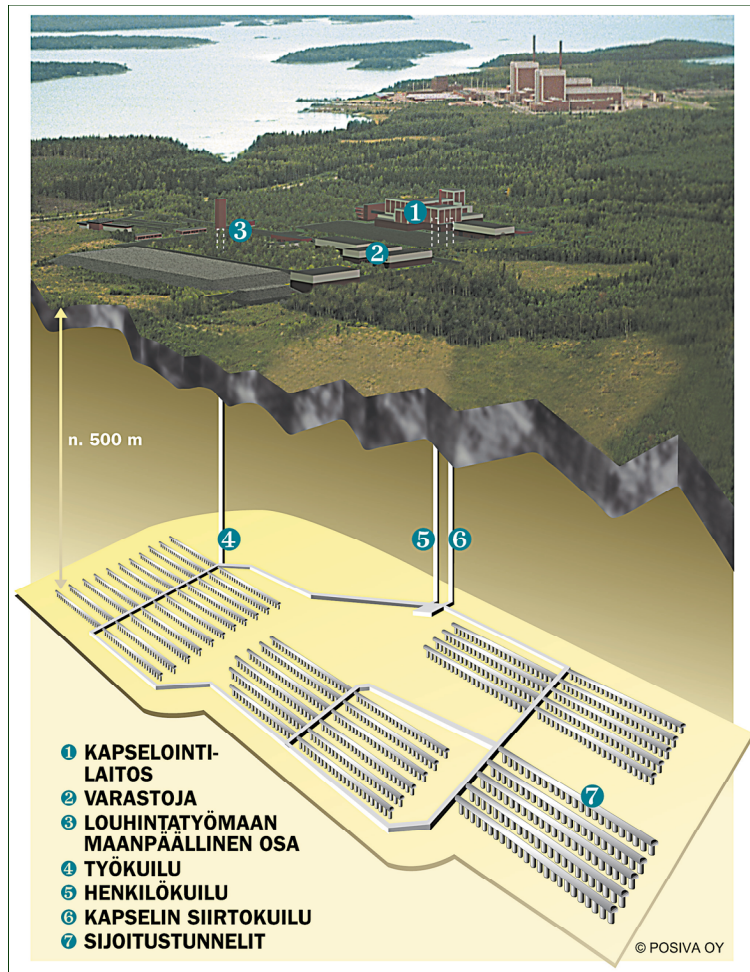
kapselia ja samalla hidastaa vaarallisten aineiden pääsyä elolliseen luontoon, mikäli kapseli syystä tai toisesta rikkoontuisi.

Käytettyä ydinpolttoainetta syntyy Olkiluodon ja Loviisan voimalaitoksilla ja loppusijoitukselle on tehty esisuunnitelma nykyisten reaktorien 40 vuoden käyttöikää vastaaville käytetyn polttoaineen määrille. Lisäksi on tehty suunnitelmat tapaukselle, jossa nykyisten reaktorien käyttöikä on pidennetty 20 vuodella, sekä pidennetyn käyttöiän tapaukselle, jossa on oletettu rakennettavaksi kaksi uutta 1 500 MWe:n voimalaitosta, jotka käynnistyvät aikaisintaan vuonna 2010. Tarkemmin näitä loppusijoituksen eri tapauksia ja syntyviä jätteen määriä on käsitelty viitteessä Riekkola et al. (1999).

2.3.1 Loppusijoitustilat

Loppusijoitustilat rakennetaan Olkiluodon peruskallioon 400–700 metrin syvyyteen. Lopullinen syvyys ja tilojen täsmällinen asettelu määräytyvät paikallisten kallioperäolosuhteiden mukaan. Loppusijoitustilat koostuvat kapselointilaitoksesta ja muista maanpäällisistä osista sekä maan alle louhittavista varsinaisista loppusijoitustiloista. Yhteydet maanpinnalta loppusijoitustiloihin hoidetaan kuilujen ja ajorampin kautta. Loppusijoitustilojen alustava suunnitelma esitetään kuvassa 1. Olkiluodossa loppusijoituslaitokselle tarvitaan oma lämpökeskus viimeistään voimaloiden sulkemisen aikaan.

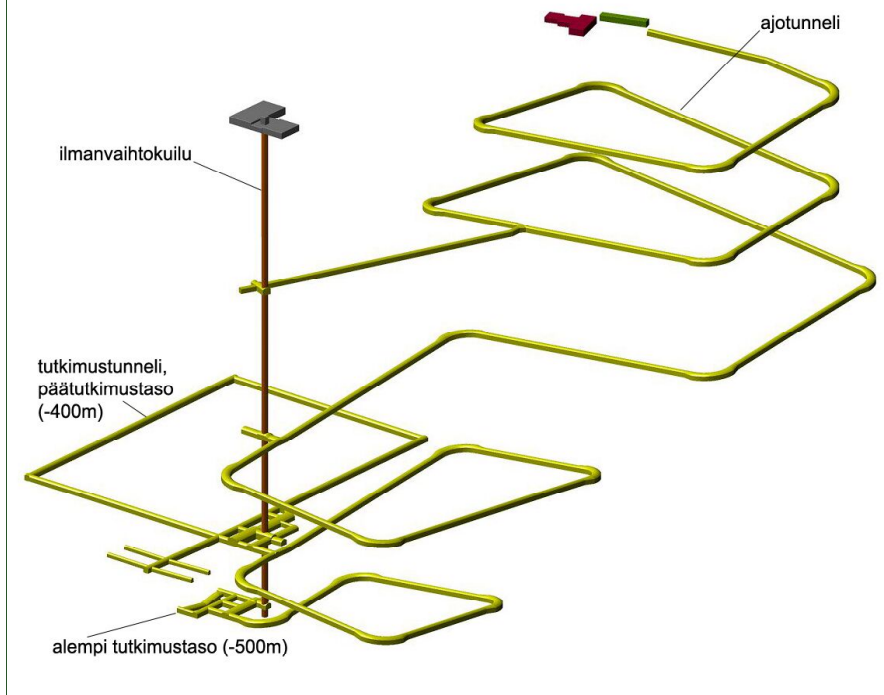
Kapselointilaitoksen konttorirakennuksessa on keskusvalvomo, joka on ympäri vuorokauden miehittynä ja josta hoidetaan mm. kulunvalvonta valvotuille alueille. Säteilyannosvalvonta sekä vartiointi voidaan hoitaa myös kapselointilaitoksen konttorirakennuksesta. Loppusijoitustilat rakennetaan koskemattomalle paikalle, eli paikalla ei ole valmista infrastruktuuria. Loppusijoitustilojen maanpäällisiä osia ja niiden rakentamiseen ja sijoitteluun liittyviä seikkoja on kuvattu tarkemmin viitteessä Kukkola (1999a).



Kuva 1. Loppusijoitustilojen maanpäälliset ja maanalaiset osat (www.posiva.fi/kuvat/4.6.2001).

Maanalainen tutkimusluolasto ONKALO liitetään osaksi loppusijoitustiloja. Tutkimusluolasto esitetään kuvassa 2. ONKALOn ajoramppi korvaa loppusijoitussuunnitelman työkuilun ja ilmanvaihtokuilu on lisänä aiemmin tehtyyn loppusijoitussuunnitelmaan. Loppusijoituksen esisuunnitelma on tehty 1990-luvun aikana, ja päätös ajorampin rakentamisesta ONKALOOon on tehty keväällä 2002. Loppusijoituksen esisuunnitelma on esitetty yhteenvetona viitteessä Riekkola et al. (2000).

ONKALON alustava tilasuunnitelma



Kuva 2. ONKALON alustava tilasuunnitelma. Kesäkuussa 2002 julkaistu kuva tutkimusluolastosta (www.posiva.fi/kuvat 4.6.2002).

Loppusijoitustilat rakennetaan kahdessa vaiheessa. Rakennusvaiheessa louhitaan kuilut, keskustunneli, kaikki yleiset tilat ja sijoitustunneleita 10 kappaletta. Sijoitustunnelit louhitaan keskustunnelin molemmin puolin vähintään 25 metrin välein, ja sijoitusreikien sopiva reikäväli on noin 7,5 metriä. Tällöin yhteen sijoitustunneliin tulisi sijoitusreian paikat 24 kuparikapselille (Riekkola et al. 1999). Sijoitusreikien minimietäisyyttä ja sijoitustunneleiden etäisyyttä toisistaan rajoittaa käytetyn polttoaineen lämmöntuoton aiheuttama lämpötilan nousu kalliassa. Bentoniitin lämpötila ei saa nousta liikaa, jotta se ei menettäisi paisuntakykyään ja säilyttäisi alhaisen vedenjohtavuutensa.

Sijoitusreikien halkaisija on noin 1,8 m. Reikien syvyys Olkiluodon polttoaineen kapselleille on 7,8 metriä ja Loviisan polttoaineen kapselleille 6,6 metriä (Riekkola et al. 1999). Rakennusvaiheessa louhituista sijoitustunneleista kuuteen porataan sijoitusreiät valmiiksi, loppuihin reiät porataan käyttövaiheen aikana, jolloin louhitaan myös loput sijoitustunnelit esim. kahdeksan tunnelia kerralla. Tällöin louhintaurakka kestäisi aina kerrallaan noin vuoden ja toistuisi 3–4 vuoden välein. Vuoden 2001 periaatepäätöksessä puhuttiin kaikkiaan 1 400 polttoainekapselista.

Loppusijoitustilojen rakentaminen sisältää kalliorakennustöitä, rakennusteknisiä töitä ja koneteknisiä töitä.

Kalliorakennustöitä ovat louhinta- ja lujitustyöt sekä sijoitusreikien poraus. Kalliorakennustöiden yhteydessä tunneleita ja kuiluja ympäröivä kallio karakterisoidaan. Tämä tarkoittaa ympäröivän kallion luonnehdintaa mm. rakennusgeologisella kartoituksella, kallionäyttekairauksella ja kairanäytteiden tutkimuksella sekä geofysikaalisilla tutkimuksilla. Käytettävät kalliorakennustekniikat ovat voimakkaasti riippuvia ko. kallion ominaisuuksista, läpäistävien rikkonaisuusvyöhykkeiden sekä vuotovesien määrästä.

Rakennusteknisiin töihin luetaan tunneleiden lattioiden ja seinien rakentaminen, kuilujen kierreportaiden rakentaminen ym.

Koneteknisiin töihin kuuluvat erilaisten järjestelmien asennustyöt, mm. ilmanvaihto- ja sähköjärjestelmän rakentaminen.

Loppusijoitustilojen rakennusvaiheen on arvioitu kestävän noin kuusi vuotta. Tilojen rakentamista on käsitelty tarkemmin viitteessä Saanio & Kokko (2000) ja loppusijoitustilojen järjestelmiä on kuvattu viitteessä Kukkola (1999c).

2.3.2 Loppusijoituksen tekninen kulku

Käytetty polttoaine, joka on poistettu ydinreaktorista, siirretään ensin jäähtymään reaktorirakennuksen vesialtaisuuteen ja muutaman vuoden kuluttua ydinvoimalaitosalueella sijaitsevaan käytetyn polttoaineen välivarastoon. Välivarastossa polttoaine saa jäähtyä vedessä vähintään parikymmentä vuotta ennen loppusijoitusta.

Loppusijoituskapseli koostuu massiivisesta valuraudasta valmistetusta sisärakenteesta, johon on mahdollista sijoittaa 12 kappaletta joko Olkiluodon BWR- tai Loviisan VVER 440 PWR -polttoainenuppuja (Raiko & Salo 1999). Lieriön muotoista sisärakennetta ympäröi 50 mm paksu hapettomasta kuparista valmistettu vaippa, joka tarjoaa hyvän korroosiokeston. Loppusijoituskapseli on esitetty kuvassa 3.

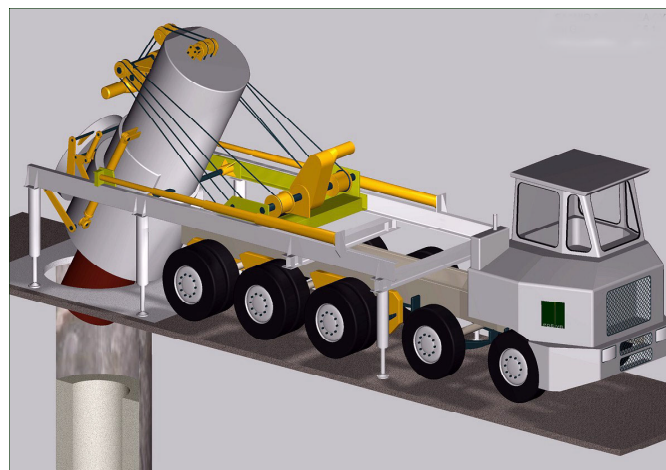
Polttoainenuppu kuljetetaan tarkoitusta varten suunnitellussa kuljetussäiliössä välivarastolta kapselointilaitokseen Olkiluotoon ja sijoitetaan kapselisiin. Kuljetus Loviisan voimalaitosalueelta Olkiluotoon tapahtuu rautateitse ja/tai maanteitse. Kapselointilaitos ja kapselointiprosessi on yksityiskohtaisesti kuvattu viitteessä Kukkola (1999b).

Kapselit kuljetetaan pystyasennossa kapselihissillä loppusijoitustiloihin. Kapselinkuljetusajoneuvo (kuvat 4 ja 5) nostaa kapselin lastausaseman alatasolta ajoneuvon säteilysuojan sisään ja

kuljettaa kapselin vaaka-asennossa sijoitustunneliin. Kapselinkuljetusajoneuvo asentaa kapselin sijoitustunnelin lattiaan porattuun reikään, joka on etukäteen vuorattu bentoniittilohkoilla. Kapselin päälle asetetaan bentoniittilohkoja tunnelin lattiatasoon saakka.



Kuva 3. Loppusijoituskapseli. Sisemmässä kapselissa (kuvassa vasemmalla) on paikat polttoainenipuille. Ulompi kapseli (kuvassa oikealla) toimii korroosiosuojana (www.posiva.fi/kuvat 25.6.2002).



Kuva 4. Kapselinkuljetusajoneuvo asentamassa kapselia sijoitusreikään (www.posiva.fi/kuvat 26.7.2002).



Kuva 5. SKB:n kehittämä kauko-ohjatun ja säteilysuojatun kapseliauton prototyyppi (Witherspoon & Bodvarsson 2001).

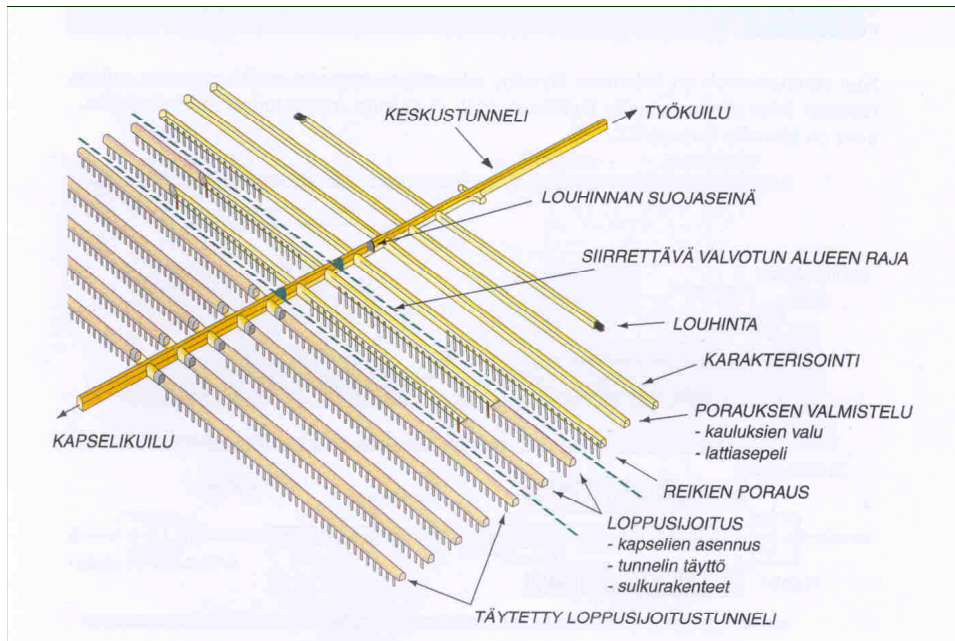
Kapselien asennus aloitetaan sijoitustunnelin perältä, ja tunneli täytetään asennettujen kapselien kohdalta käyttämällä täyttö- ja tiivistyskonetta. Kapselien asennusta ja tunnelien täyttöä ei toteuta samanaikaisesti, vaan työt jaksotetaan kuukausittain siten, että kapseleita asennetaan 2–3 viikkoa ja sijoitustunneleita täytetään 1–2 viikkoa (Kukkola 2000).

Sijoitustunnelit täytetään murskebetoniitillä, ja niiden suuaukkoihin asetetaan teräsbetoniset sulkurakenteet (Haaramo 1999), joilla estetään täyttömateriaalin paisuminen keskustunneliin. Betonirakenteen paksuus on noin kuusi metriä, ja se raudoitetaan rakenteen seinä-, katto- ja lattiapintojen läheltä. Rakenteen yläosan betonointi tapahtuu injektioputken avulla, ja myös kallion ja rakenteen välisen liitoksen tiivistämiseen käytetään injektointia. Rakenteeseen asennetaan jäähdytysvesiputkisto, jotta betonin kovettumisen aiheuttama lämpötilan nousu saadaan pidettyä hallinnassa.

Murskebetoniittiin käytettävä kiviaines valmistetaan tiloista louhitusta kivistä, joka kuljetetaan maan päälle louhekasaan, murskataan sopivaan raekokoon ja jätetään murskeamaan odottamaan tulevaa käyttöä (Riekkola et al. 1999).

Käyttövaiheen aikana loppusijoitustiloissa on sekä valvomattomia että valvottuja alueita. Valvonta-alueelle kuuluu kapselikuilun alue sekä sijoitustunnelit, joissa tehdään kapselien sijoitusta; valvomattomalla alueella louhitetaan uusia sijoitustunneleita, karakterisoidaan louhitut tunnelit ja porataan sijoitusreiät. Tunnelien täyttötyöt tehdään valvomattomalla alueella siten, että valvonta-alueen rajaa siirretään keskustunnelissa kapselikuilua kohden ja täyttötyöt voidaan hoitaa ajorampin (työkuilun) kautta. Käytönaikaiset

työvaiheet ja sekä valvottoman että valvonta-alue esitetään kuvassa 6. Loppusijoituksen käyttövaihetta on kuvattu tarkemmin viitteessä Kukkola (2000).



Kuva 6. Loppusijoitustilojen louhinnan ja kapselien sijoittamisen yhtäaikainen toteutus. Valvonta-alueen raja näkyy kuvassa katkoviivalla. Kapseleita sijoitetaan valvonta-alueella yhtäaikaisesti kahteen tunnelipariin. Kapselit kuljetetaan kapselikuilun kautta. Tunnelien louhinta, karakterisointi, sijoitusreikien poraus ja tunnelien täyttötöet sijoitettujen kapselien osalta tapahtuvat valvomattomalla alueella. Kaikki louhintaan vaadittavat työkoneet, materiaali- ja henkilökuljetukset tapahtuvat työkuilun kautta (Riekkola et al. 1999).

Käyttövaiheen jälkeen loppusijoitustilat suljetaan. Keskustunneli, muut tilat ja yhdyskuilut sekä ajoramppi täytetään murskebetoniitillä, kun kaikki polttoaine on sijoitettu. Tiloista poistetaan rakenteet ja järjestelmät täyttötöiden edetessä. Kuiluihin ja tunneleihin sijoitetaan sulkurakenteita rikkonaisuusvyöhykkeiden kohdalle estämään pohjaveden haitalliset virtaukset tiloihin. Kuilujen alaosiin rakennetaan bentoniittisulut ja yläpäähän betoniset sulkurakenteet. Tilojen sulkeminen kestää arviolta kaksi vuotta. Tilojen sulkemista on käsitelty viitteessä Saanio & Kokko (2000) ja tunnelien täyttötekniikkaa viitteessä Kirkkomäki (1999).

Loppusijoituslaitoksen käytöstä ei saa yleisten turvallisuusmääräyksien mukaan aiheuttaa työntekijöiden tai väestön terveyttä vaarantavia säteilyhaittoja. Eniten altistuvalla yksilöllä kohdistuva efektiivinen vuosiannos tulee jäädä alle 0,1 mSv:n ja oletetun onnettomuuden seurauksena väestön eniten altistuvan yksilön vuosiannos ei saa ylittää arvoa 1 mSv (VN 1999). Turvallisuusvaatimusten täyttymistä ja loppusijoituslaitoksen

käytöstä aiheutuvia säteilyannoksia sekä normaalikäytön aikana että häiriö- ja onnettomuustilanteissa on tarkasteltu viitteessä Rossi et al. (1999). Häiriö- ja onnettomuustilanteita on kuvattu viitteessä Kukkola (1999d).

2.4 Loppusijoitussuunnitelman palautettavuutta edistäviä seikkoja

Palautettavuus ei ole ollut loppusijoitussuunnitelman erityisenä lähtökohtana, eikä palautettavuus saa missään vaiheessa vaarantaa loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta. Suomen loppusijoitusmalliksi valitusta KBS-3-konseptista löytyy kuitenkin jo sellaiseen palautettavuutta edistäviä piirteitä.

Loppusijoitussuunnitelma ja loppusijoituksen toteuttaminen etenevät modulaarisesti, ja sekä käyttövaiheen aikana että tilojen sulkemisen jälkeen on jokainen työvaihe toteutettavissa käänteisesti. Graniittiin louhittavat loppusijoitustunnelit ovat kokemukseen perustuen hyvin pitkäikäisiä, jolloin tunnelien myöhemmin tapahtuva auki kaivaminen on teknisesti mahdollista. Polttoaineniput pakataan massiivisiin kuparivaippaisiin valurautakapseleihin, jotka ovat mekaanisesti erittäin lujia. Kapseleiden lujuus on varmistettu analyysin erilaisissa tapauksissa siten, että on saavutettu kohtuulliset varmuuskertoimet odotettavissa oleville jännityksille ja venymille. Kuormituksessa on muun muassa otettu huomioon hydrostaattinen paine, bentoniitin tasainen tai epätasainen paisuntapaine, lämmön vaikutukset ja kolmen kilometrin paksuisen jäätikön aiheuttama ylimääräinen hydrostaattinen paine (Raiko & Salo 1999). Kuparikapselien korroosionkestoksi arvioidaan vähintään 100 000 vuotta (Saanio & Raiko 1999). Palauttaminen on siis teknisesti mahdollista pitkänkin ajanjakson jälkeen.

3. Esitettyjä perusteluja palautettavuudelle

Ydinpolttoaineen loppusijoitusta koskevat ratkaisut edustavat tämän hetkistä tietämystä parhaimmillaan. Ihmiskunta on kuitenkin ottanut suuria harppauksia teknisessä kehityksessä viimeisen tuhannen vuoden aikana, eikä kehityksen voida olettaa pysähtyvän. Radioaktiivisten aineiden elinikä on pitkä, ja siksi loppusijoituksen turvallisuutta on arvioitava hyvin kauas tulevaisuuteen. Palautettavuutta perusteltaessa joudutaan siis arvioimaan tulevaisuuden tapahtumia.

Tässä luvussa esitetään kirjallisuudessa käsitellyjä perusteluja palautettavuudelle. Toisaalta esitetään myös vasta-argumentteja. Suomen tilannetta tarkastellaan erillisessä alakohdassa.

3.1 Palautettavuuden puolesta

Mahdollisia syitä polttoaineen palauttamiseen voidaan johtaa teknisistä tai poliittisista motiiveista.

3.1.1 Teknisiä perusteluja

Palauttaminen onnettomuuden tai loppusijoituksen myöhemmin havaittavan huonon suorituskyvyn vuoksi

Tärkeintä loppusijoituksessa on turvallisuus. Loppusijoituksen eristyskyvyn lasku tai muut turvallisuusongelmat voivat antaa perusteen polttoaineen palauttamiselle.

Turvallisuusanalyseissä testataan loppusijoitusjärjestelmän suorituskykyä ja luotettavuutta erilaisten oletettujen, järjestelmää heikentävien kehityskulkujen eli skenaarioiden avulla (Vieno & Nordman 1999). Erilaisia odotettavissa olevia tilanteita otetaan huomioon, ja niiden vaikutuksia ja seuraamuksia arvioidaan loppusijoituksen turvallisuuden kannalta. Riskejä pyritään kartoittamaan ja siten varautumaan myös vähemmän odotettaviin tilanteisiin. Aina on kuitenkin olemassa pieni epävarmuus tulevista tapahtumista. Periaatteessa voi ilmetä odottamattomia tilanteita, joihin ei ole pystytty varautumaan loppusijoitustilojen suunnitteluvaiheessa (De Preter 2000). Tällöin mahdollisuus polttoaineen palauttamiseen voi olla tarpeen.

Määritellyt turvallisuusstandardit voivat tulevaisuudessa muuttua, mikäli havaitaan jotakin uutta, mikä osin tai kokonaan muuttaa käsitystä loppusijoitustilan pitkäaikaisturvallisuudesta (NEA 2001). Turvallisuusstandardien merkittävä tiukentuminen voi pa-

kottaa turvallisuuden uuteen arviointiin, ja mikäli tuloksiin ei olla tyytyväisiä, on tilojen avaaminen ja polttoaineen palauttaminen käytettävissä oleva vaihtoehto.

Halu hyödyntää tai käyttää uudelleen loppusijoitetun materiaalin raaka-aineet tai energiasisältö

Käytetyn ydinpolttoaineen energiasisältö on vielä varsin suuri, joten ei voida sulkea pois mahdollisuutta tämän polttoaineen käyttöön tulevaisuuden energiantuotannossa.

Syntyvät fissiotuotteet, esimerkiksi harvinaiset maametallit palladium, rodium ja teknetium, sekä jätteen muut alkuaineet voivat muuttua arvokkaiksi, tai palauttamisen perusteena voi olla esimerkiksi jätekapseleiden raaka-ainemetalli (KASAM 2001).

Loppusijoitukseen valittu paikka voi tulevaisuudessa osoittautua raaka-aineiden lähteenä tai luonnonarvoiltaan arvokkaaksi, ja jätteen palauttamiseen saatetaan ryhtyä, mikäli alueen muu suunniteltu käyttö (esim. luonnonsuojelu tai virkistyskäyttö) vaarantaa pitkäaikaisturvallisuutta tai jätteiden geologinen loppusijoitus vähentää alueen arvoa. (NEA 2001). Tosin nimenomaan tällaisia, luonnonarvoiltaan nyt tai tulevaisuudessa mahdollisesti merkittäviä paikkoja pyritään erityisesti karttamaan loppusijoitustilan paikan valinnassa.

Halu käyttää uudenlaista loppusijoitusmenetelmää tai täysin uutta tekniikkaa jätteenkäsittelyssä

Tutkimustyö vaihtoehtoisten jätteenkäsittelytapojen kehittelyyn jatkuu, ja tulevaisuudessa voi olla mahdollista käsitellä käytetty ydinpolttoaine loppusijoitusta paremmalla ja turvallisemmalla tavalla.

Suurin huomio keskittyy erotteluun ja transmutaatioon (partition and transmutation P&T). Transmutaatiolla tarkoitetaan pitkäikäisten radionuklidien muuttamista neutronisäteilytyksellä lyhytikäisiksi tai stabiileiksi. Transmutaation perustekniikan ja siihen liittyvien erotusprosessien kuvaus löytyy viitteestä Enarsson et al. (1998).

Eräissä maissa (mm. Ranskassa, Venäjällä, Japanissa ja Espanjassa) transmutaation katsotaan voivan merkittävästi lieventää loppusijoitukselle asetettavia vaatimuksia ja tutkimustyöhön panostetaan huomattavasti ennen lopullisten päätösten tekemistä ydinjätehuollon strategiasta. Esimerkiksi Ranskassa päätös loppusijoituksesta tehdään vuonna 2006, ja siihen saakka tutkitaan tasaveroisesti kolmea erityisaluetta, joista transmutaatio on yksi. Muut vaihtoehdot ovat geologinen loppusijoitus ja pitkäaikaisvarastointi (Richardsson 1999a).

Transmutaation tekninen toteutettavuus alkaa olla näköpiirissä (Enarsson et al. 1998). Vielä on kuitenkin liian aikaista arvioida mahdollisia lyhyen tai pitkän tähtäimen kustannus- tai turvallisuusetuja verrattuna suunniteltuun geologiseen loppusijoitukseen. Toimivan tekniikan kehittäminen tähän päivään mennessä tuotettujen ja väliaikaisesti varastoitujen jätteiden mittakaavassa vaatii edelleen voimakasta tutkimustyöhön panostusta.

Myös loppusijoitustekniikassa voidaan tehdä merkittäviä läpimurtoja. Loppusijoitustekniikan alalla voidaan löytää uusia ratkaisuja radioaktiivisten aineiden eristykseen. Myös dimensioiltaan, materiaaliltaan tai muilta ominaisuuksiltaan parempien jätesäiliöiden ja kapselien kehittäminen on mahdollista (Richardsson 1999a). Todennäköisesti motivaatio loppusijoitustekniikan edelleen kehittämiseen kuitenkin vähenee, jos ensimmäiset geologiset loppusijoituslaitokset toimivat hyvin (NEA 2001).

3.1.2 Poliittisia perusteluja

Sosiaalinen hyväksyntä, poliittiset näkökannat, eettiset syyt

Loppusijoituksen eettisistä vaikutuksista on kirjoitettu paljon. Jokaisessa ydinvoimavaltiossa on tehty mielipidemittauksia tai laajempia tutkimuksia asenteista ydinenergiaan ja loppusijoitukseen. Näkemykset eettisesti parhaasta lähestymistavasta vaihtelevat. Toisaalta katsotaan nykyisen sukupolven velvollisuudeksi kehittää ja ottaa käyttöön pitkällä aikavälillä turvallinen loppusijoitusratkaisu. Toisaalta pidetään tärkeänä myös tulevien sukupolvien mahdollisuutta parempien ratkaisumallien kehittämiseen.

Palautettavuus on monissa maissa nähty keinona saavuttaa suuren yleisön hyväksyntää, kun keskustellaan nykyisen sukupolven oikeudesta päättää jätteiden käsittelystä tulevien sukupolvien puolesta. Palautettavuus antaa tuleville sukupolville mahdollisuuden nostaa jätteet maan pinnalle ja käsitellä niitä parhaaksi katsomallaan tavalla. Loppusijoitustilojen rakentaminen on kansallinen hanke, ja on todennäköistä, että vain harva (tai ei ainutkaan) loppusijoitustila rakennetaan ilman suuren yleisön varmuutta palautettavuuden mahdollisuudesta siltä varalta, että loppusijoitus katastrofaalisesti pettäisi (Richardsson 1999a).

Isossa-Britanniassa pidetyssä Nirexin organisoimassa konferenssissa toukokuussa 1999 (Hiett 2000) valittiin 10–15 ihmisen kansalaispaneeli keskustelemaan ydinjätteen palautettavuudesta ja monitoroinnista. Kansalaispaneelin jäsenillä oli erilaiset sosiaaliset asemat ja poliittiset näkemykset. Jäsenillä ei etukäteen ollut tietoa ydinjätteen loppusijoituksesta, ja he saivat opastusta jätteenkäsittelyn malliin Isossa-Britanniassa. Konferenssin lopputuloksena kansalaispaneeli oli yksimielinen siitä, että loppusijoitusmallin

tulee olla yleisesti hyväksytty ja jätteen on pysyttävä saatavilla ja monitoroitavana, jotta tulevilla sukupolvilla on mahdollisuus käsitellä ongelmaa uudelleen, jos parempi ratkaisu on tarjolla.

Suuren yleisön lisäksi myös poliittiset päätöksentekijät näkevät palautettavuuden positiivisena; ei haluta tehdä peruuttamattomia päätöksiä, vaan halutaan jättää tuleville sukupolville mahdollisuus harkita nyt tehtyä päätöstä tulevan tietämyksen valossa ja ryhtyä toimenpiteisiin, mikäli siihen nähdään aihetta.

Ydinvoiman ja loppusijoituksen etiikasta voi lukea lisää viitteistä KTM (1995), NEA (2000) ja KOMMENTUS (1999).

3.2 Palautettavuutta vastaan

Palautettavuuden mahdollisuutta on myös eräiltä osin kritisoitu. Mahdollisuus polttoaineen palauttamiseen saattaa houkuttaa vastuuttomiin palauttamisyriityksiin, ja tilojen ollessa avattavissa on myös ydinmateriaalivalvontaa mahdollisesti lisättävä.

Loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden on eräissä maissa katsottu kärsivän, mikäli palautettavuus on otettu suunnitelmiin mukaan. Näissä maissa palautettavuus kuitenkin mahdollistetaan viivyttämällä loppusijoitustilojen lopullista sulkemista, jolloin tilojen aukioloaika pitenee. Pidennetty aukioloaika vaatii institutionaalisten järjestelyjen, ylläpidon ja ydinmateriaalivalvonnan edellyttämien suojatoimien määrän pitämistä tilojen käyttövaiheen tasolla, jolloin kustannukset nousevat ja odottamattomien tapahtumien riski kasvaa (tulvat, poliittinen tilanne tms.) (Grupa et al. 2000). Ei voida myöskään varmuudella sanoa, etteikö aukiolon pidentämisestä koituisi negatiivisia vaikutuksia työntekijöille kasvaneiden säteilyannosten muodossa (NEA 2001).

Palautettavuuden mahdollistaminen voi myös herättää kysymyksen (González 2000) koko geologisen loppusijoituksen ajatusta vastaan: ”Jos loppusijoitus on turvallista, mihin tarvitaan palautettavuutta?”

3.3 Mahdollisia palautettavuuden syitä suomalaisessa loppusijoitusmallissa

Vuonna 1999 Suomen valtioneuvosto teki päätöksen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuudesta. Päätös pohjautuu vuonna 1987 annettuun ydinenergialakiin, ja siinä sanotaan: ”Loppusijoitus tulee suunnitella siten, että pitkäaikaisturvallisuuden varmistaminen ei edellytä loppusijoituspaikan valvontaa ja että loppusijoitustila on

avattavissa, mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen tarkoituksenmukaiseksi” (VN 478/99). Suomessa mahdollisuudesta polttoaineen palauttamiseen määrätään siis lainsäädännössä, jossa todetaan myös syy polttoaineen palauttamiseen: tekniikan kehittyminen.

Suomalainen loppusijoitusmalli perustuu ajatukseen sijoittamisesta pysyväksi tarkoitettulla tavalla, ja loppusijoitustilojen sulkeminen aloitetaan välittömästi viimeisen kapse-
lin sijoittamisen jälkeen. Palautettavuuden mukanaolo suomalaisessa loppusijoitusmal-
lissa ei aseta loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta epäilyksenalaiseksi. Palauttami-
nen ei myöskään ole ollut nimenomaisena edellytyksenä loppusijoitustilojen suunnitte-
luvaiheessa, eikä suomalaiseen loppusijoitussuunnitelmaan ole tehty muutoksia helpot-
tamaan mahdollista polttoaineen palauttamista.

Kuitenkin tilojen avattavuus on Suomessa lain vaatimuksena. Syyt tähän ovat pitkälti poliittiset. Ei haluta tehdä peruuttamatonta päätöstä, ja toisaalta avattavuutta on vaadittu loppusijoitukseen varautuneemmin suhtautuvilta tahoilta.

Loppusijoitus katsotaan turvalliseksi ratkaisuksi, mutta halutaan antaa kehittyvälle tek-
niikalle mahdollisuus. Kehittyvää tekniikkaa ei tässä yhteydessä ole tarkemmin määri-
tely. Halutaan korostaa sitä tosiasiaa, ettei palautettavuus ole keskustelun aiheena siksi,
ettei luotettaisi loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuteen. Pitkäaikaisturvallisuus käy-
tetyin ydinpolttoaineen loppusijoituksessa ei myöskään saa vaatia tilojen sulkemisen
jälkeistä monitorointia.

Loppusijoituksen ja ydinmateriaalin roolista suomalaisessa yhteiskunnassa ja suuren
yleisön suhtautumisesta ydinvoimaan ja loppusijoitukseen on enemmän viitteessä Lit-
manen et al. (1999).

4. Mitä palauttamisen jälkeen?

Käytetyn ydinpolttoaineen mahdolliseen palauttamiseen johtavia syitä pohdittiin edellisessä luvussa. On selvää, ettei palauttamiseen lähdetä ilman painavaa syytä. Palauttamisen jälkeen polttoainetta käsitellään asianmukaisella tavalla, riippuen palauttamisen syystä. Kustannusten osalta on vaikea vetää tarkkaa rajaa palauttamisen jälkeisten toimintojen ja itse loppusijoituskapselien maan pinnalle noston välille. Toiminta palauttamisen jälkeen aiheuttaa kustannuksia, ja siksi tässä yhteydessä on pohdittu niitä palauttamisen jälkeisiä toimintoja, joiden toteuttamiseen ei palauttamisen syyllä ole niin suurta vaikutusta.

4.1 Palauttamisen jälkeiset suunnitelmat

Palauttamisen jälkeisiä toimia ei juurikaan ole suunniteltu tässä työssä läpikäydyssä kirjallisuudessa. Syynä tähän on palauttamisoperaation epätodennäköisyys ja palauttamisen jälkeisten toimien vahva sidonnaisuus palauttamisen syyhyn. Ei voida tehdä suunnitelmia operaatiolle, jonka toteutuksen todennäköisyys on hyvin pieni eikä toteuttamisen syy ole vielä tiedossa.

Teknisten ongelmien vuoksi polttoaineen palauttamiseen tuskin joudutaan lähtemään, mutta mikäli näin kuitenkin käy, voidaan polttoaineen palauttaminen joutua aloittamaan melko nopeasti. Paremman tekniikan tai uuden jätehuoltomenetelmän vuoksi tehtävä polttoaineen palauttaminen sitä vastoin suunnitellaan rauhallisella aikataululla ja punniten tarkkaan uudella menetelmällä saatuja hyötyjä ja jätteen palauttamisen vaatimaa työmäärää sekä kustannuksia.

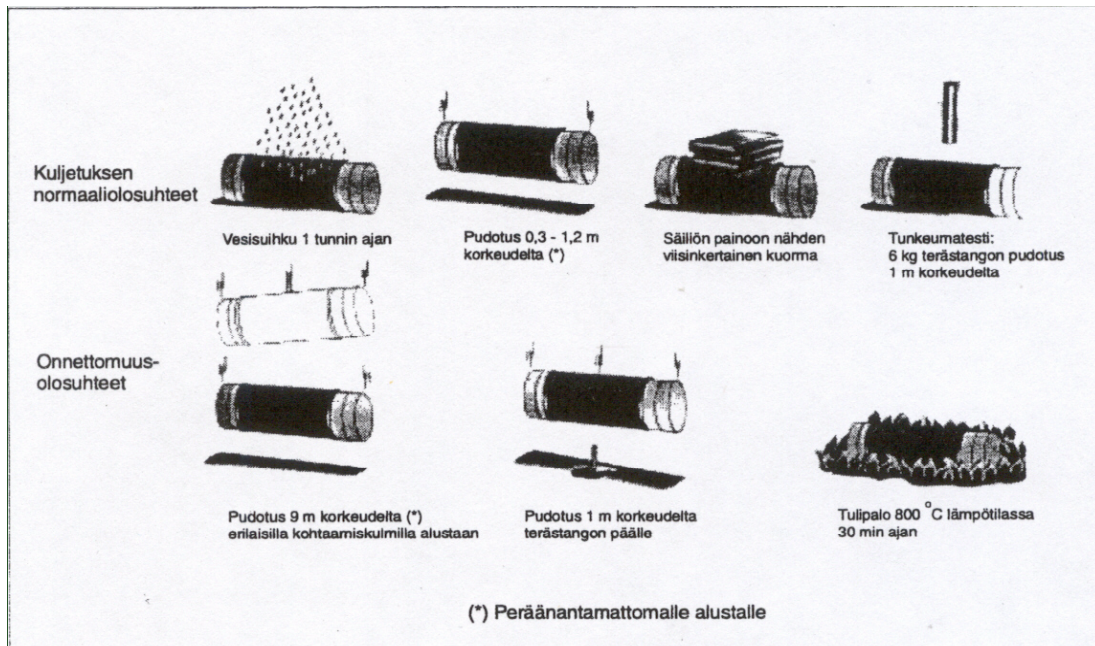
Polttoaineen loppusijoittaminen vie aikaa useita kymmeniä vuosia, joten palauttamisenkaan ei ilmeisesti tarvitse tapahtua yhdessä yössä. Palauttamispäätöstä suunnitellaan tarkoin ja luvanhakuprosessi vie aikaa. Tilojen sulkemisen jälkeinen aukaisu, kapselien poisto ja tilojen täyttäminen uudelleen kestäisi nykyarvion mukaan reilut kymmenen vuotta (Saanio & Raiko 1999). Tarkat toimintasuunnitelmat siis ehditään pakon edessä tekemään jopa palauttamisprosessin aikana.

Yleisellä tasolla polttoaineen palauttamisen jälkeisiä toimia voidaan arvioida. Kapselien kuljetukset, avaaminen ja välivarastoinnin ratkaisut ovat kaikissa palauttamiseen johtavissa tapauksissa oleellisia kysymyksiä, joihin on mahdollista varautua etukäteen ja siltä osin huolehtia palauttamisprosessin kustannustehokkaasta toteutuksesta.

4.2 Kuljetus

Käytetty polttoaine voidaan kuljettaa käyttökohteeseen maanteitse, meritse tai rautateitse. Kuljetukset tehdään erityisillä ajoneuvoilla, joissa radioaktiivinen aine on sijoitettu säteilysuojan sisään. Kuljetusreitit suunnitellaan huolellisesti, ja noudatetaan tarkkoja suojatoimia ja turvallisuusmääräyksiä. Poikkeustilanteiden ja onnettomuuksien säteilyvaikutuksia kuljetusten yhteydessä on arvioitu ja kuljetussäiliö rakennettu kestäämään odotettavissa olevat tilanteet.

Poikkeustilanteisiin liittyvät testit pyrkivät kattamaan mahdollisten onnettomuustilanteiden synnyttämät mekaaniset ja termiset kuormitukset, kuten törmäysten aiheuttamat säiliöön kohdistuvat iskut ja palavia nesteitä kuljettavan ajoneuvon tulipalon (Suolanen et al. 1999). Kansainvälisten säädösten mukaiset testit kuljetussäiliöille esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Testit kuljetussäiliöille. Upotustestit eivät ole kuvassa mukana (Suolanen et al. 1999).

Väestön eniten altistuvalla yksilöllä ja kuljetushenkilökunnalla on asetettu suurimmat sallitut annosmäärät sekä normaalikuljetuksissa, häiriötapauksissa että onnettomuuksien yhteydessä. Kuljetusten säteilyvaikutuksia on käsitelty tarkemmin viitteessä Rasilainen et al. (2001).

Polttoainekapseli painaa polttoainepuilla täytettynä Olkiluodon polttoaineelle 24,5 t ja Loviisan polttoaineelle 18,7 t (Riekkola et al. 1999). Pelkkien polttoainepuujen kuljettamiseen tarkoitettun kuljetusajoneuvon tukikori painaa Olkiluodon polttoaineelle

27,1 t. Tähän kuljetussäiliöön mahtuvan polttoaineen massa on 14,9 t. Loviisan polttoaineelle vastaavat luvut ovat 33,1 t ja 18,0 t (Kukkola 1999c).

Mikäli polttoaine halutaan kuljettaa kapseleissa, tulee kuljetusajoneuvot rakentaa sellaisiksi, että kapseli mahtuu säteilysuojan sisään ja kuljetusauton tukirakenne kestää kapselin painon. Maantieliikenteeseen soveltuvia kuljetusajoneuvoja on jo nykyään käytössä. Kapseloitua polttoainetta kuljettavalle ajoneuville pitää myös toteuttaa soveltuvat kuljetusten turvallisuustestit onnettomuustapauksien varalta.

4.3 Polttoainekapselien avaaminen

Kapselointiprosessin yhteydessä kiinnitetään erityistä huomiota kapselien sulkemiseen. Kun polttoaineniput on asennettu kapseliin, tarkistetaan tiivistepintojen ja hitsattavien kuparipintojen puhtaus ja vauriottomuus. Kaasunvaihtokupu lasketaan kapselin päälle ja kapseliin imetään tyhjiö. Sisemmän kapselin kannen mutterit kiristetään yhtäaikaaisesti kaasunvaihtokuvun alla ja kiinnityksen lujuus sekä tiiveys tarkistetaan. Kuparikansi nostetaan paikoilleen koneistettujen pintojen ohjaamana. Kansi menee osittain kapselin sisään. Kuparikansi hitsataan elektronisuihkuhitsauksella. Hitsipinta koneistetaan ja tarkastetaan ultraäänitarkastuksella, kapseli puhdistetaan ja hitsille suoritetaan vielä volymetrinen tarkastus röntgentomografialla. Mikäli kapseli ei läpäise tarkastuksia, tehdään korjaavia toimenpiteitä tai polttoaineniput asennetaan toiseen kapseliin (Kukkola 1999b).

Kapselien mahdollinen avaaminen tapahtuu jyrsimällä sivusuunnasta kuparikapselin kansi auki. Sisempi kansi avataan kaasunvaihtokuvun alla ja polttoaineniput voidaan poistaa. Kapseli on tämän jälkeen käsiteltävä aktiivisena jätteenä.

Kapselien avaamiseen nykytekniikalla vaaditaan siis kapselointilaitos tai vastaava. Vaikka uusi rakennettava laitos olisi konseptiltään vain kapselien avaamiseen suunniteltu, ovat perustoiminnot kuitenkin samat kuin kapselointilaitoksessa. Mahdollista on myös avata kapselit johonkin uuteen tekniikkaan perustuvalla menetelmällä, jonka ominaisuuksia ei vielä voida arvioida.

4.4 Välivarastointi

Palautuksen jälkeen, riippumatta siitä, avataanko kapselit heti vai ei, on polttoaine kuljetettava käyttökohteeseen tai varastoitava väliaikaisvarastoon odottamaan mahdollista jatkokäsittelyä. Mikäli käytetty ydinpolttoaine aiotaan palauttamisen jälkeen käsitellä vaihtoehtoisella menetelmällä tai palautetun materiaalin raaka-ainevarat aiotaan hyö-

dyntää, joudutaan kapselit avaamaan. Mikäli taas loppusijoitus aiotaan toteuttaa vaihtoehtoisella menetelmällä, ei kapselleita välttämättä ole pakko avata, ei ainakaan välittömästi.

Palauttamisprosessin yhteydessä joudutaan todennäköisesti rakentamaan uusia tiloja joko välivarastointia, jätteen jatkokäsittelyä tai mahdollisesti molempia varten. Tällöin voi olla järkevää suorittaa mahdollinen kapselien avaaminen vasta käyttökohteessa, jolloin erillisen kapselien avaamiseen suunnitellun laitoksen rakentaminen on tarpeellonta. Jätteenkäsittelylaitoksen (esim. erottelua ja transmutaatiota varten) rakentaminen Suomeen ei kuitenkaan ole kovin todennäköinen vaihtoehto, koska käytetyn ydinpolttoaineen määrä on kokonaisuudessaan melko pieni verrattuna esim. Venäjän tai Ranskan käytetyn ydinpolttoaineen määrään. Mikäli jätteen jatkokäsittely nousee vaihtoehdoksi tulevaisuudessa, kuljetetaan jätteet todennäköisesti jonnekin, missä jatkokäsittelyn vaatima laitos on jo toiminnassa.

Nykyratkaisun mukaiseen välivarastoon (polttoaineniput sijoitetaan vesialtaisiin, vesi jäähdyttää polttoainetta ja toimii säteilysuojana) kuljetettavat polttoainekapselit olisi avattava viimeistään ennen polttoainenippujen veteen sijoittamista. Tällä hetkellä käytetty ydinpolttoaine on väliaikaisesti varastoituna Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosalueille. Voimalaitosten käyttöään päätyttyä voimalaitokset puretaan ja kontaminoituneet rakennusmateriaalit käsitellään aktiivisena jätteenä. Käytöstäpoisto on Olkiluodossa suunniteltu toteutettavaksi viivästetysti 30 vuoden kuluttua laitoksen sulkemisen jälkeen. Loviisassa käytöstäpoistotyöt on suunniteltu aloitettavaksi välittömästi laitoksen käyttöään päätyttyä (Posiva Oy, web-sivu www.posiva.fi 15.7.2002). Jos palauttaminen tapahtuu myöhemmin kuin pari vuosikymmentä loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen, on molempien voimalaitosten välivarastointitilat ehditty purkaa ja välivarastointi edellyttää uusien tilojen rakentamista.

Mikäli kapselien avaaminen ei jatkokäsittelyn vuoksi ole tarpeen, kapselit voisi väliaikaisesti varastoida myös avaamattomina. Kuiva välivarastointi edellyttää riittävää jäähdytystä (esim. ilmanvaihtoa), jotta lämpötila välivarastossa ei nousisi liian suureksi. Kapselien lämpötila on suurimmillaan noin 20 vuotta loppusijoituksen jälkeen. Tällöin lämpötila on 90 °C. Kahden sadan vuoden kuluttua kapselin lämpötila on n. 65 °C (ks. kuva 8). Kuivassa välivarastoinnissa tulisi ottaa huomioon myös kapselien keskinäisen sijoittelun vaikutus välivaraston lämpötilaan. Lämpötilaa enemmän kuivaa välivarastointia rajoittaa kuitenkin kapselien radioaktiivinen säteily. Kapselien aktiivisuus on suuri vielä pitkään loppusijoittamisen jälkeen (ks. kuva 10), ja riittävä säteilyeristys kuivassa välivarastossa pitäisi järjestää esim. betonirakenteilla. Vesi voisi toimia myös avaamattomien kapselien välivarastoinnissa tavittavana jäähdytyksenä ja säteilysuojana, sillä kapselien hyvät korroosionkesto-ominaisuudet voisivat mahdollistaa kuparikapselien sijoittamisen vesialtaisiin.

5. Yleiskuvaus palautettavuuden tekniikasta ja kustannuksista

Tässä luvussa kuvataan kirjallisuudesta poimittuja näkökohtia, jotka koskevat polttoaineen palauttamista loppusijoitustilan elinkaaren eri vaiheissa. Palauttamisessa voidaan erottaa kolme perustapausta: palauttaminen ennen loppusijoitusreiän sulkemista, palauttaminen sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen ja palauttaminen kaikkien tilojen sulkemisen jälkeen. Näiden perustapausten pohjalta saadaan johdettua palauttaminen loppusijoituksen missä tahansa vaiheessa.

Luvun alkuun on kerätty palautettavuuden ja kustannuksien kannalta merkityksellisiä yleisiä tekijöitä. Huomiota on kiinnitetty myös loppusijoitustilan monitorointiin, ydinmateriaalivalvonnan edellyttämiin suojatoimiin (safeguards) ja pitkän aikavälin tiedon säilyttämiseen ja näihin liittyviin ongelmiin.

Luvun lopussa esitellään Äspön kalliolaboratoriossa Ruotsissa käynnissä oleva kapselin palauttamista demonstroiva koe.

5.1 Palautettavuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät

5.1.1 Palauttamisen ajankohta

Käyttövaiheen aikana tapahtuva yksittäisen kapselin palauttaminen onnistuu melko helposti, eivätkä kustannukset nouse merkittävästi. Onkin varsin mahdollista, että voidaan joutua nostamaan ja sijoittamaan yksittäisiä kapseleita toiseen sijoitusreikään tai mahdollisesti sijoittamaan polttoaineniput toiseen kapseliin.

Kokonaan täytetyn sijoitustunnelin avaaminen ja kaikkien sen sisältämien kapselien palauttaminen on epätodennäköisempää. Tämänkään toteuttaminen ei vielä ole kohtuuttoman hankalaa.

Suljettujen loppusijoitustilojen avaamista ja kaikkien sijoitettujen kapselien palauttamista pidetään erittäin epätodennäköisenä vaihtoehtona. Tässä tapauksessa palauttamisen kustannukset ja teknisen toteutettavuuden vaikeus kasvavat huomattavasti.

Sulkemisen jälkeen ulkopuolinen kontrollointi ja valvonta on ajan kuluessa tarkoitus lopettaa kokonaan, ja kaikkien tilojen sulkemisen jälkeen ei loppusijoitustilassa tapahtuvista prosesseista ole saatavissa tietoa. Mitä pidempi tämä sulkemisen jälkeinen ajan-

jakso on, sitä hankalampaa on myös tiedon säilyttäminen loppusijoituspaikasta ja loppusijoitustekniikasta.

Kehittyvä tekniikka voi toisaalta antaa pitkällä aikavälillä sekä syyn että parantuneet mahdollisuudet loppusijoitetun polttoaineen palauttamiseen. Suljettujen tilojen avaaminen on jo nykytekniikalla toteutettavissa. Mahdolliset uudet innovaatiot perinteisten kaivu- ja louhintatekniikoiden rinnalla tai korvaajina voivat helpottaa kapselien palauttamista. Erityisesti louheennostotekniikoissa ja bentoniitin poistamisessa tehtävät uudet ratkaisut voivat helpottaa palauttamisoperaatiota.

5.1.2 Lämpötila

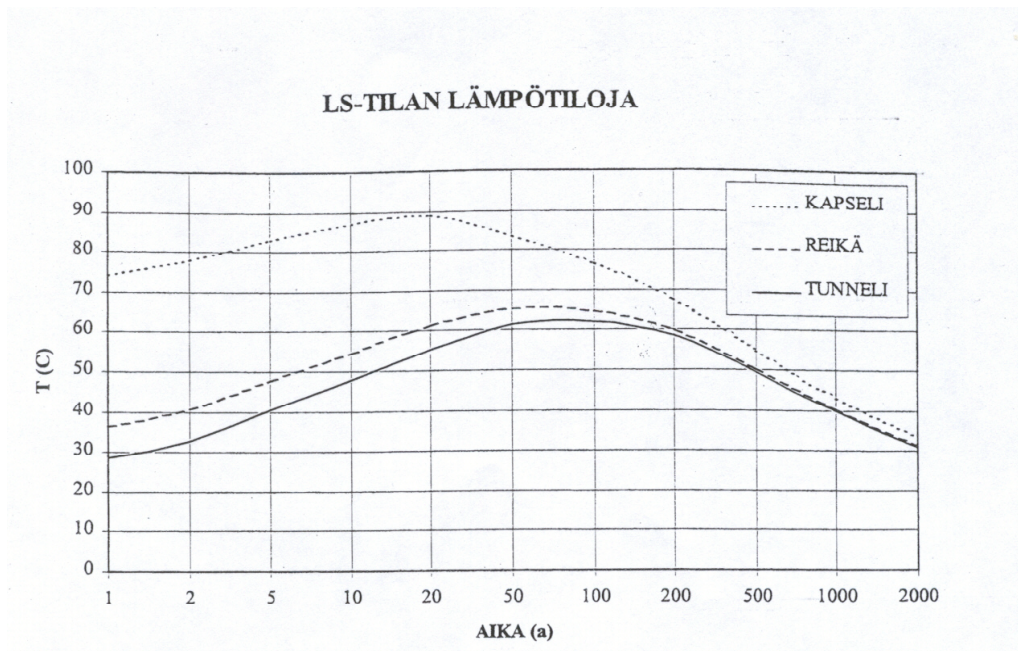
Käytettyä polttoainetta sisältävät kapselit tuottavat radioaktiivisen hajoamisen aiheuttamaa jälkilämpöä. Kapselointihetkellä lämpöteho Olkiluodon polttoaineelle on noin 1,7 kW/kapseli ja Loviisan polttoaineelle noin 1,3 kW/kapseli (Raiko 2001). Lämmön-
tutotannosta johtuen lämpötila kapsелеissa, niitä ympäröivässä bentoniitissa ja kalliope-
rässä nousee, kun syntyvä jälkilämpö leviää johtamalla ympäröivään kallioon ja va-
pautuu hiljalleen ilmakehään. Kapselien pinnan lämmönjohtavuus on yli satakertainen
ympäröivään kallioon verrattuna, joten kapselin lämpötila nousee ympäröivää kalliota
nopeammin.

Kapselien sijoittelu loppusijoitustilassa suunnitellaan siten, ettei lämpötila nouse yli +100 °C:n. Olkiluodon kalliope-
rän lämpötila on -500 m:n syvyydellä +12 °C, ja lämpö-
tilavaihtelu sataa metriä kohden on 1,4–1,5 °C. Tällöin suurin sallittu lämpötilan nousu
kapsелеissa on 80 °C. Kapselien lämpötehon vaihtelun, kallion paikallisten ominaisuuksien
ja bentoniitin epätäydellisen turpoamisen vaatimaksi lämpötilamarginaaliksi jätetään
5 °C (Raiko 2001).

Kuvassa 8 esitetään loppusijoitustilan maksimilämpötila ajan funktiona. Kapselien läm-
pötila on suurimmillaan noin 20 vuotta loppusijoittamisen jälkeen. Sijoitusreiän reunan
ja ympäröivän kallion lämpötilat seuraavat pienellä viiveellä.

Lämpötilan nousu vaikeuttaa palauttamisoperaatiota. Työt hidastuvat ja kustannukset kasvavat. On arvioitu, että nykytekniikalla voidaan työskennellä ilman lämpötilan ollessa alle 70 °C ja kallion lämpötilan ollessa alle 100 °C (Saanio & Raiko 1999). Loppusijoitustilojen lämpötilamaksimi on asetettu juuri 100 °C:seen. Kuumissa oloissa työskenneltäessä tunnelien lämpötila saadaan sopivaksi jäähdytyksen ja ilmaston avulla. Kuumien massojen käsittely on mahdollista, sillä esimerkiksi tienpäällystystöissä käytettävät laitteet käsittelevät kuumempia massoja kuin loppusijoitustunnelien täytemate-

riaali. Työskentelyoloista korkeissa lämpötiloissa on kokemuksia mm. Saksassa, missä on työskennelty kaivosolosuhteissa yli 55 °C:n lämpötilassa.



Kuva 8. Lämpötila ajan funktiona loppusijoitustiloissa. Kanisterin pinnan lämpötila on laskettu bentoniitin ollessa kuivaa. Bentoniitin oletetaan olevan kontaktissa kapselin pinnan kanssa. Bentoniitin ollessa vedellä kyllästynyttä kapselin pinnan ja sijoitusreiän lämpötilan välinen ero pienenee 50 %. Sen sijaan reiän ja tunnelin lämpötilat eivät ole riippuvaisia bentoniitin kosteudesta (Raiko & Salo 1999).

5.1.3 Olosuhteet kallioperässä

Merkittävimpiä loppusijoitukseen vaikuttavia kallioperän ominaisuuksia ovat kallioperän rikkonaisuusvyöhykkeet ja pohjaveden virtaukset. Pitkällä aikavälillä huomiota kiinnitetään kallioperän pieniin liikkeisiin, maankuoren kohoamiseen ja muuhun maankuoren liikkeeseen. Erityisesti huomion kohteena ovat jääkauden jälkeiset vaikutukset ja maanjäristykset.

Pohjaveden virtaukset ja kallioperän rikkonaisuusvyöhykkeet voivat luoda olosuhteet, joissa radionuklideja pääsee vapautumaan elolliseen luontoon. Loppusijoitustila sijoitetaan kalliioon kohtaan, jossa rikkonaisuusvyöhykkeet ja pohjaveden liike ovat vähäisiä ja hyvin ennustettavissa.

Olkiluodon kallioperä on pääosin migmaattista kiillegneissia, jonka joukossa on tonaliittia ja graniittia (Posiva Oy, muistio, 6.5.2002). Rakennettavuudeltaan ja louhittavuudeltaan

deltaan se on Suomen oloissa tyypillinen kallio. Paikka paikoin kallio on voimakkaasti rakoillutta. Tällaiset kohdat voivat merkittävästi hankaloittaa kalliorakentamista, ja niitä pyritäänkin välttämään loppusijoitustilojen sijoittelussa.

Vuosittaiset maanjäristykset Suomessa ovat voimakkuudeltaan niin pieniä, ettei niillä katsota olevan merkitystä loppusijoituksen kannalta. Kallioperän pitkäaikaiskäyttäytyminen ja siten seuraavan jääkauden jälkeiset vaikutukset voivat sitä vastoin vaikuttaa loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuteen. Ikiroidan vaikutukset ja jääkauden jälkeiset hapekkaat sulamisvedet voivat nopeuttaa kuparikapselien korroosiota. Jääkauden jälkeen myös maankuoren kohoaminen on hyvin nopeaa ja todennäköisesti tapahtuu voimakkaita maanjäristyksiä. Nämä maankuoren liikkeet tapahtuvat kuitenkin helpoiten (pienimmällä kitkalla) jo valmiiksi rikkoontuneissa kallioperän kohdissa, jolloin uusia rikkonaisuusvyöhykkeitä ei uskota syntyvän. Tähän tulokseen on päädytty tutkimalla edellisen jääkauden ja sen jälkeisen ajan vaikutuksia maamme kallioperään. Tutkimusta jääkauden jälkeisistä vaikutuksista ja maanjäristyksistä tehdään koko ajan erilaisilla metodeilla (Rasilainen 2002).

Luonnonanalogiat ovat luonnon järjestelmiä, jotka joltain osin muistuttavat loppusijoitusjärjestelmää. Luonnonanalogioiden avulla saadaan tietoa kallioperässä luonnollisesti, hyvin pitkän ajan kuluessa tapahtuneista prosesseista. Tällaisia kokeita ei ole mahdollista toteuttaa laboratorio-oloissa, ja luonnonanalogioiden avulla tutkitaankin mm. toistuvien jääkausien vaikutuksia uraanin kulkeutumiseen. Suomessa eniten tutkittu luonnon analogia on Palmotun uraaniesiintymä (Blomqvist et al. 2000). Palmotun esiintymä on 1,7 miljardia vuotta vanha, ja esiintymässä on urania noin 1 000 tonnia epäsäännöllisinä juonteina maanpinnalta aina 300 metrin syvyyteen asti. Kallioperän ylimmissä osissa vallitsevat hapettavat pohjavesiolosuhteet 100 metrin syvyyteen asti ja alempana pelkistävät pohjavesiolosuhteet. Palmotussa on mitattu uraanipitoisuuksia pohjavedessä, pintavedessä, järvisedimentissä ja turpeessa ja saatu näin hyvä käsitys uraanipitoisuudesta biosfäärin ja kallioperän eri osissa.

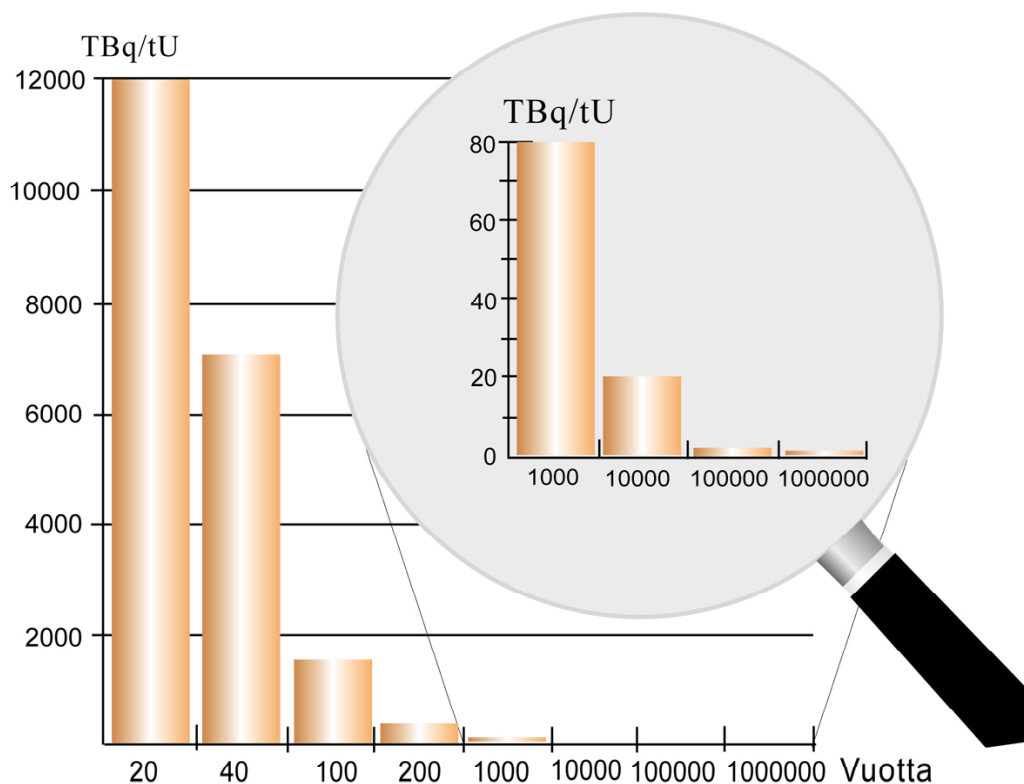
Olosuhteet kallioperässä muuttuvat hyvin hitaasti. Tämänhetkiset, valitulla loppusijoituspaikalla Olkiluodossa vallitsevat ominaisuudet pystytään määrittelemään ja loppusijoitus toteuttamaan pitkäaikaisturvallisuuden vaatimuksia noudattaen. Seuraavan jääkauden jälkeisten kallioperän muutosten ennustaminen on vaikeaa, mutta tutkimustyö tällä alueella jatkuu.

Maanjäristysten aiheuttamien kallionliikahdusten arvioimiseen on esitetty menetelmä viitteessä LaPointe & Cladouhos (1999). Jääkausivaikutuksia ydinjätteen loppusijoitukseen on esitelty tarkemmin viitteessä Ahonen et al. (2002) ja kalliomekaniikkaa sekä loppusijoitustunneleiden pysyvyyttä on tarkasteltu viitteessä Johansson & Rautakorpi (2000).

Voidaan todeta, että kallioperän olosuhteet huomioon ottaen loppusijoituskapselien palautus on teknisesti mahdollista ainakin seuraavaan jääkauteen saakka. Ratkaisevaksi kysymykseksi näin pitkällä aikajaksolla nousevatkin tiedon säilyvyyden kysymykset, joista enemmän myöhemmin.

5.1.4 Säteily

Käytetty ydinpolttoaine on voimakkaasti aktiivista reaktorista poistamisen jälkeen, ja polttoaineen tulee jäähtyä vähintään 20 vuotta ennen loppusijoitusta. Vuodessa sen aktiivisuus vähenee jo sadasosaan, ja Posivan (Posiva Oy, websivu www.posiva.fi 25.7.2002) arvioimalla loppusijoitushetkellä eli noin 40 vuotta reaktorista poistamisen jälkeen ydinpolttoaineen aktiivisuudesta on jäljellä enää tuhannesosa alkuperäisestä. Kuvassa 9 esitetään käytetyn ydinpolttoainetonnin aktiivisuus eli radioaktiivisten ytimien halkeamisten määrä sekunnissa [Bq] ajan funktiona. Käytetty ydinpolttoaine on reaktorista poistamisen jälkeen massaosuudeltaan noin 95-prosenttisesti alkuperäistä uraanidioksidia, loput ovat halkeamistuotteita (noin 4 %) ja aktinideja (noin 1 %).



Kuva 9. Käytetyn ydinpolttoainetonnin aktiivisuus ajan funktiona reaktorista poistamisen jälkeen. Loppusijoitus on suunniteltu toteutettavaksi 40 vuotta reaktorista poistamisen jälkeen (muokattu viitteestä Posiva 1999).

Polttoaineen palauttamista suunniteltaessa tulee ottaa huomioon loppusijoitetun uraani-polttoaineen aktiivisuus ja ihmisille aiheutuva säteilyaltistus. Säteilyaltistusta mitataan annosnopeuden, sievertin (Sv), avulla. Suuruusluokan perusteella sopiva yksikkö on mSv. Palauttamisessa henkilökunnalle koituvia säteilyvaikutuksia voidaan arvioida annosnopeuksien avulla.

Loppusijoitusprosessin aikana suurin säteilyaltistus työntekijöille aiheutuu kuljetussäiliön vastaanotossa, jolloin työskennellään säiliön läheisyydessä, eräissä vaiheissa säiliön pinnan tuntumassa. Tällöin työntekijät altistuvat enintään noin 0,0045 manSv:n annokselle suoraa ulkoista säteilyä, joka jakaantuu 1–2 työntekijälle¹ (Rossi et al. 1999). Vuosittain käsitellään noin 25 kuljetussäiliötä. Tällöin kuljetussäiliöiden vastaanotossa työskenteleville kohdistuva vuotuinen kollektiivinen säteilyannos on 0,11 manSv. Säteilyturvakeskuksen ohjeiden mukaan keskimääräinen säteilyannos viiden vuoden aikana saa olla enintään 20 mSv, joten kuljetussäiliöiden vastaanottovaiheeseen eivät välttämättä voi osallistua samat ihmiset koko ajan (Rasilainen et al. 2001).

Kuumakammio käsittely, kapselien siirrot ja sijoitusreikiin asettaminen tehdään kauko-ohjatusti, jolloin ulkoinen annosnopeus jää alle 0,025 mSv:n/h, vuotuinen annos on tällöin vain noin 0,007 manSv. Määräaikaishuolloista, kunnossapidosta ja siivouksesta aiheutuva vuotuinen annos on 0,003 manSv. Yhteensä laitoksessa työskenteleville kertyy normaalikäytössä 0,12 manSv:n annos. Tällä säteilyannostasolla vuotuinen terveysriski on vähäinen (Rasilainen et al. 2001).

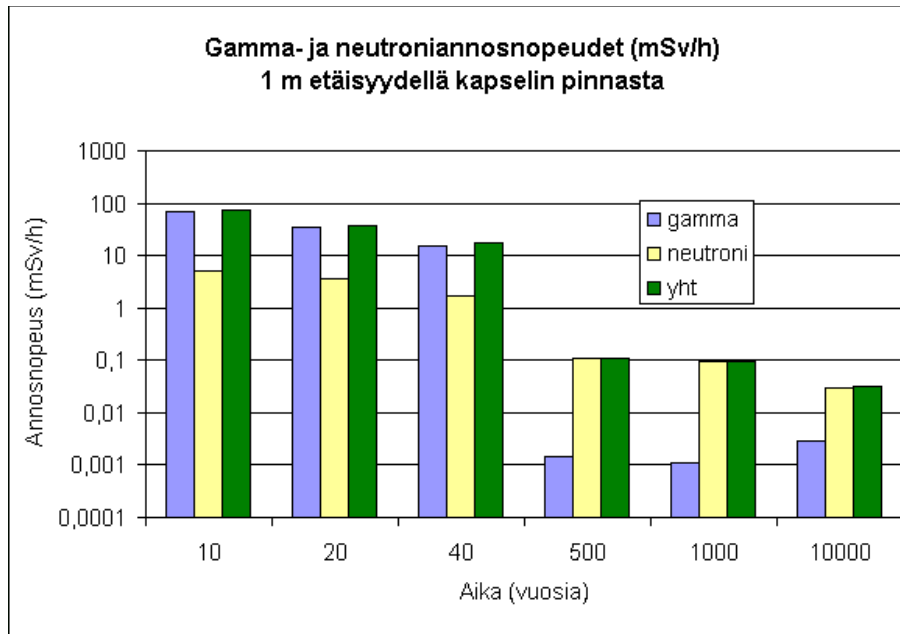
Kapselin palauttaminen tapahtuu käänteisesti kapselin sijoittamiseen nähden, ja kapselin nostaminen sijoitusreiästä tapahtuu kauko-ohjatusti. Työntekijöiden altistus suoralle säteilylle jää normaalitilanteessa kapselin sijoittamisen tasolle.

Bentoniitin poistamisen yhteydessä joudutaan työskentelemään sijoitusreiän läheisyydessä, mutta tällöin bentoniitin poistoon käytettävä suolavesiliuos suojaa työntekijöitä suoralta ulkoiselta säteilyltä (ks. kuva 14).

Kuvassa 10 esitetään gamma- ja neutroniannosnopeudet kapselin pinnalla. Kymmenen vuotta kapselin sijoituksen jälkeen annosnopeus kapselin pinnalla on yli 100 mSv/h. 10 000 vuoden kuluttua annosnopeus on pienentynyt yhteen tuhannesosaan ja on hieman yli 0,1 mSv/h. Työntekijälle kohdistuva efektiivinen vuosiannos saa olla enintään 50 mSv ja keskimäärin viiden vuoden aikana 20 mSv, joten jatkuvaa työskentelemistä kapselin vierellä mahdollisen kapselin palauttamisen yhteydessä tulee rajoittaa. Vielä

¹ manSv on kollektiivisen säteilyannoksen yksikkö, joka saadaan laskemalla yhteen altistuneiden yksilöiden yksilöannokset.

10 000 vuoden jälkeenkin työntekijä saa koko vuoden sallitun annoksen 200 tunnin (viiden täyden työviikon) aikana joutuessaan jatkuvasti työskentelemään kapselin välittömässä läheisyydessä.



Kuva 10. Gamma- ja neutroniannosnopeudet kapselin pinnalla. Kapseli vaimentaa uraanipolttoaineen suoraa säteilyä. Taustasäteilytaso on 0,0004mSv/h (3,7 mSv/vuosi) (Anttila 1998, 2002).

Loppusijoitustilojen avaamisen yhteydessä annosnopeuksia mitataan jatkuvasti. Mikäli Säteilyturvakeskuksen asettamat rajat ylitetään, on tunnelien avaaminen säteilyaktiivista työtä. Tämä asettaa lisääntyneitä vaatimuksia työntekijöiden säteilysuojaukselle ja nostaa kustannuksia. Sijoitustunnelien aukaisua ja bentoniitin poistoa tilanteessa, jossa kapseli on korrodoitunut puhki, ei ole pohdittu, sillä odotettavissa olosuhteissa kapselin kestoikä on vähintään 100 000 vuotta. Mikäli kapselit kuitenkin ovat vaurioituneita, on mahdollista, että suunniteltuihin työmenetelmiin vaaditaan muutoksia, jotta välttyttäisiin suoralta ulkoiselta säteilyltä työskennellessä kapselin välittömässä läheisyydessä.

Säteilyn on katsottu, lämpötilan ohella, olevan palauttamisen mahdollisuutta heikentävä tekijä silloin, kun säteilytaso ja kapselien pinnan lämpötila ovat niin suuret, että kapselien suunniteltua palauttamista tulee työntekijöiden turvallisuuden vuoksi lykätä (NEA 2001) tai palauttaminen tulee toteuttaa kauko-ohjatusti.

5.1.5 Bentoniitti

Bentoniitti on tuotenimi, jolla tarkoitetaan eri savimineraaleista koostuvaa materiaalia. Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta sen keskeinen ominaisuus on, että se turpoaa merkittävästi joutuessaan kosketuksiin veden kanssa.

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa bentoniitin rooli kapselien puskurimateriaalina ja moniesteperiaatteen osana on merkittävä. Bentoniitin vedenjohtavuus on erittäin pieni ja se estää pohjaveden virtauksen kapselin ympärillä. Kapseleita ympäröidessään bentoniitti sitoo itseensä kallioperästä peräisin olevan kosteuden ja pyrkii paisumaan. Paisuntapaineen vaikutuksesta bentoniitti tarjoaa myös joustavan suojan kallioperän pieniä liikahduksia vastaan (KASAM 2001).

Suomalaisessa loppusijoituskonseptissa käytetään kaupallisesti saatavaa MX-80-bentoniittia, joka koostuu pääosin natrium-montmorilloniitista. Murskeen kanssa sekoitettuna bentoniitista muodostetaan tunnelien täytemateriaalia siten, että 80 % seoksesta on bentoniittia ja 20 % louhintatöistä saatavaa murskettä. Tällöin myös tunnelien täytemateriaalilla on veden virtauksia hidastava vaikutus ja samalla täytemateriaali, paisuntapaineensa vaikutuksesta, tukee (murskeen lisäksi) tunneleita mekaanisesti.

Mikäli polttoainekapselit halutaan palauttaa, on bentoniitti pystyttävä poistamaan kapselien ympäriltä. Tämä on mahdollista paineistetun suolaliuoksen avulla, jonka vaikutuksesta bentoniittirakenteet purkautuvat ja liukenevat ja bentoniitti on mahdollista pumpata pois loppusijoitusreiästä (Karnland 1998). Palauttamisen yhteydessä poistettavan bentoniitin aktiivisuutta on tarkkailtava. Mikäli bentoniitti on kontaminoitunut eli, jos kapselin tiiviys ei ole pitänyt, on pois pumpattavaa bentoniittia käsiteltävä radioaktiivisena jätteenä (Papp 1999).

5.2 Palauttaminen loppusijoitustilan elinkaaren eri vaiheissa

Palauttamista loppusijoitustilan elinkaaren eri vaiheissa on käsitelty laajemmin viitteessä Saanio & Raiko (1999) sekä viitteessä Grupa et al. (2000 Annex I.G, Sweden). Tämä alakohta käsittelee palauttamista nimenomaan Suomen loppusijoituskonseptissa.

5.2.1 Palauttaminen ennen sijoitusreiän sulkemista

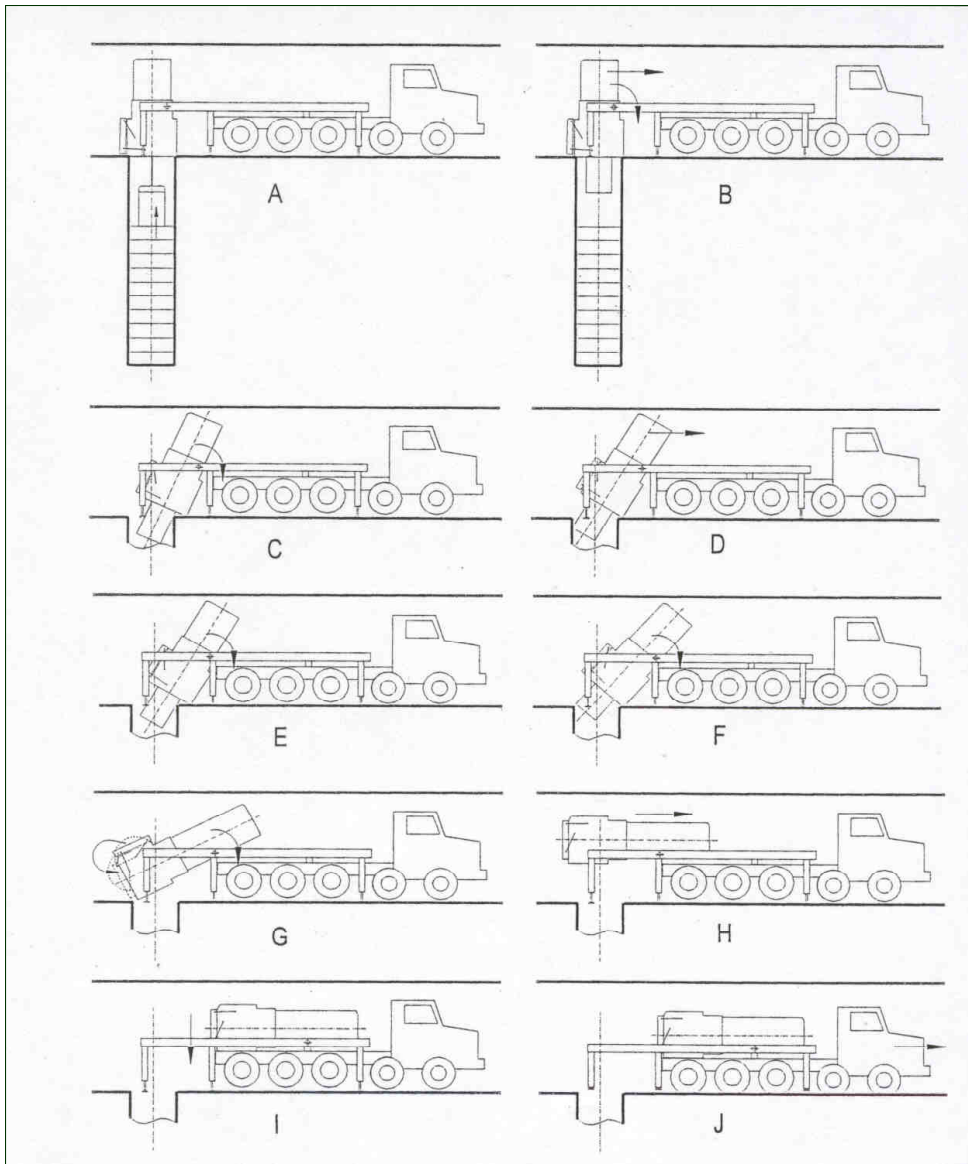
Oletetaan, että päätös kapselin palauttamisesta tehdään joko kapselia reikään laskettaessa tai kun kapselin kuljetus- ja asennusajoneuvon ote on irrotettu. Tilanne tulee kysee-

seen, jos havaitaan kapselia sijoitettavan väärään reikään, kapseli asennetaan vinoon, kapselia kolhitaan sijoituksen yhteydessä, kapselissa havaitaan jotakin vikaa tai sijoitusreiän havaitaan olevan tarkoitukseen sopimaton. Lähtökohtainen oletus tässä tapauksessa on, ettei bentoniitti ole vielä tarttunut kapseliin.

Kapselinkuljetusajoneuvossa on säteilysojattu säiliö kapselin kuljetusta varten, tartuntalaitteet kapseliin tarttumista varten, paikantamisjärjestelmä ja TV-kamera-avusteinen ohjausjärjestelmä. Paikantamisjärjestelmällä tarkoitetaan ajoneuvon nostopisteen x,y-säätöä, jonka avulla on mahdollista tarttua kapseliin, vaikka se olisi vinoon asennettu. Kapselinkuljetusajoneuvo esitetään kuvissa 4 ja 5.

Kapselin kuljetusajoneuvon tartuntalaitteet kiinnitetään kapselin kanteen, joka kiinnitysurineen on puhdistettava mahdollisista kapselin päälle pudonneista bentoniitin muruista ja kivistä. Kapseli nostetaan pystyyn nousevan säteilysojan sisään, ja säteilysoja käännetään kuljetusajoneuvon päälle. Kuljetusajoneuvo kuljettaa kapselin takaisin kapselikuilun hissille, ja kapseli nostetaan kapselointilaitokseen. Työvaiheet ovat käänteiset kapselin sijoitusreikään asentamiseen verrattuna ja ne esitetään kuvassa 11.

Kapselointilaitoksessa kapseli puhdistetaan, kapselin tiiviys tarkastetaan ja tarvittaessa polttoaineniput siirretään uuteen kapseliin. Mikäli palauttamisen syy ei ollut kapselissa, laitetaan kapseli puskurivarastoon odottamaan uudelleen sijoitusta. Kapselin sijoitusreikään voidaan sijoittaa toinen kapseli, mikäli sijoitusreikä ei ollut syy palauttamiseen. Mikäli sijoitusreiässä havaittiin vikaa, harkitaan sen käyttämistä tapauskohtaisesti, ja mikäli sen todetaan olevan käyttökelvoton, täytetään se murskeen ja bentoniitin seoksella.



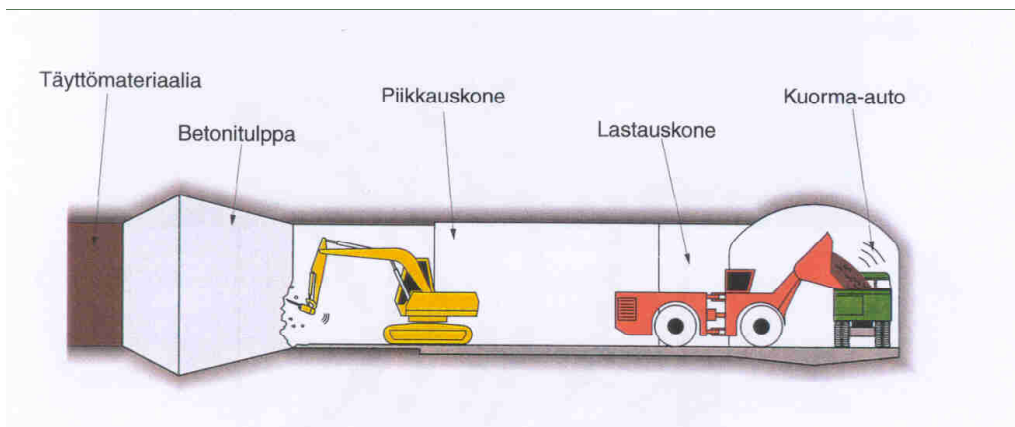
Kuva 11. Kapselin palauttamisen työvaiheet (Saanio & Raiko 1999).

5.2.2 Palauttaminen sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen

Kapselien sijoittamisen jälkeen sijoitusreiät täytetään bentoniittilohkoilla tunnelin lattiatasoon saakka ja sijoitustunneli täytetään murskeen ja bentoniitin seoksella asennettujen kapselien osalta. Enimmillään kapseli ehtii olla täyttämättömässä sijoitustunnelissa vain kolme viikkoa (Kukkola 2000) ennen tunnelin täyttämistä ja teräsbetonisen sulkurakenteen (Haaramo 1999) asentamista sijoitustunnelin ja keskustunnelin yhdistymiskohtaan. Ennen sijoitustunnelin sulkemista on poistettu tunnelin järjestelmät (valaistus, sähkö, ilmastointi) kuten myös lattiasora ja seinärakenteet.

Kapselin palauttaminen suljetusta sijoitustunnelista koostuu sijoitustunnelin aukaisusta, sijoitusreiän aukaisusta ja kapselin poistamisesta sijoitusreiästä. Työ etenee vaiheittain.

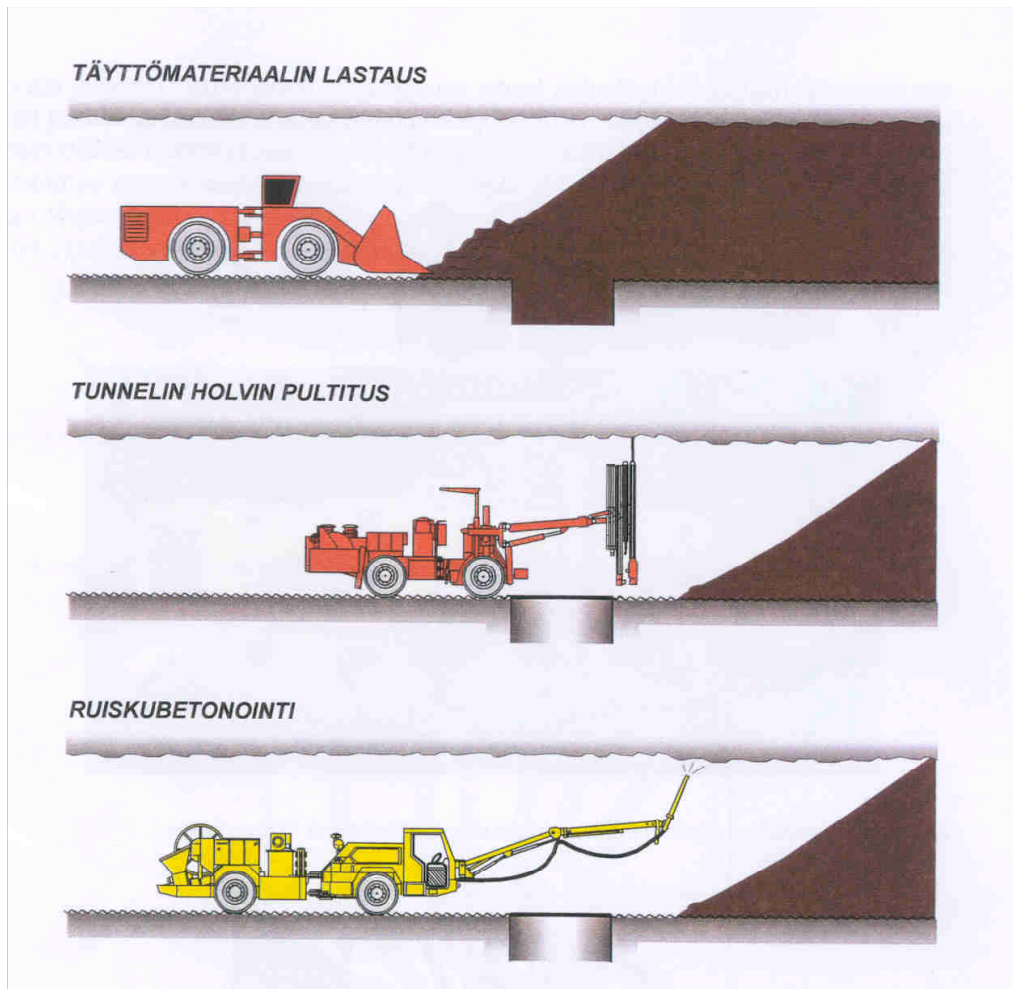
Ennen sijoitustunnelin auki kaivamisen aloittamista on poistettava sulkurakenne tunnelin suulta. Rakenteen läpi porataan muutama pieni reikä, jotta voidaan tarkkailla täyteaineen painetta ja mahdollisesti vähentää sitä päästämällä vettä pois täyteaineesta. Myös aktiivisuusmittauksien suorittaminen reikien läpi on mahdollista. Sulkurakenne voidaan poistaa vaihtoehtoisilla menetelmillä. Työmenetelmiä ovat mm. piikkaus, timanttisahaus ja räjäyttämisen. Työmenetelmää valittaessa otetaan huomioon lähimmän sijoitusreiän sijainti ja, mikäli käytetään räjähteitä, on räjäytykset tehtävä useassa osassa tärinän välttämiseksi. Syntyvä jäte kuljetetaan työkuilulle ja maan pinnalle tai vaihtoehtoisesti johonkin täytettävistä tunneleista. Kuvassa 12 on esitys betonisulun poistamisesta piikkauskoneen avulla.



Kuva 12. Betonisen sulkurakenteen poistaminen ja poistettavan materiaalin lastaus (Saanio & Raiko 1999).

Sulkurakenteen poiston jälkeen aletaan sijoitustunnelista poistaa täyttömateriaalia. Täyttömateriaalin poistoon käytetään perinteisiä kaivinkoneita, lastauskoneita ja tarvittaessa rouhijoita. Sijoitustunnelin täyttömateriaali poistetaan aina vain yhden reiän kohdalta, sijoitusreiä avataan, kapseli poistetaan, reikä täytetään murskebetoniitilla ja sijoitustunnelia avataan seuraavan reiän matkalta.

Sijoitustunneliin tulee asentaa uudelleen tarvittavat järjestelmät, jotta työskentelyolosuhteet saadaan sopiviksi. Järjestelmät vastaavat tasoltaan tilapäisten työmaiden järjestelmiä. Myös tunnelin seinämien lujitustarve tarkistetaan, irtoamassa olevat kivet poistetaan ja tunnelia lujitetaan tarvittaessa pultittamalla, injektoimalla tai ruiskubetonoinnilla. Nämä lujitustyöt vastaavat normaaleja kallionrakennustöissä tehtäviä lujitustoimenpiteitä. Holvin pulttitusta ja ruiskubetonointia havainnollistaa kuva 13.



Kuva 13. Tunnelien täytemateriaali tukee tunneleita mekaanisesti, ja täytemateriaalia poistettaessa on tunnelien lujitustarve tarkistettava. Kuvassa täytemateriaalin poistoa, tunnelin holvin pultituskone ja ruiskubetonointilaitte (Saanio & Raiko 1999).

Murskebentoniitin ominaisuuksiin kuuluu veden sitominen, ja täytemateriaalin poistamiseen vaikuttavatkin voimakkaasti tunneliin vuotaneen veden virtaama ja aika, jonka tunneli on ollut suljettuna. Erot voivat olla tunnelikohtaisia ja eroja esiintyy jopa eri kohdissa sijoitustunnelia.

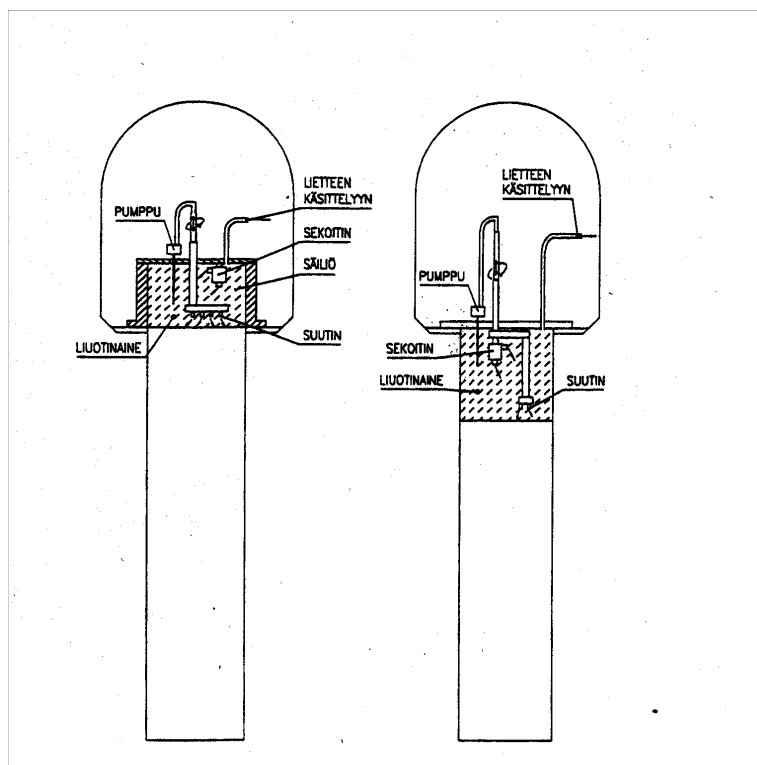
Sijoitustunnelin aukaisun aikana tarkkaillaan ilman ja täytemateriaalin aktiivisuutta jatkuvasti, ja ilman aktiivisuuden ylittäessä asetetun rajan kytketään sijoitustunnelin ilmanvaihto valvotun alueen ilmanvaihtoon.

Täytemateriaalin käsittelyyn tarkoitettujen laitteiden suunnitellaan kestävänsä täytemateriaalin lämpötilan nousu. Korkeimmillaan täytemateriaalin lämpötila on noin 65 °C hieman alle vuosisadan kuluttua tunnelin sulkemisesta.

Kun täytemateriaali on poistettu, pääsee sijoitusreiän bentoniitti paisumaan avattuun tunneliin, kun sen sisäinen paine purkautuu. Sijoitusreiän päälle asennetaan tunnelia tyhjennettäessä ajosilta, jossa on aukko sijoitusreiän kohdalla ja kaulusrakenne, jolla voidaan tiivistä peittää sijoitusreiän suuaukko ja siten estää lattiamateriaalin valuminen sijoitusreikään.

Bentoniittilohkot, joilla sijoitusreikä on vuorattu ja peitetty, ovat kyllästyneet vedellä kehittäen paisuntapainetta ja muodostaneet kerroksen, jonka vedenjohtavuus on hyvin pieni. Paineen suuruus riippuu vuotoveden määrästä ja siten ajanjaksosta, jonka kapseli on ollut sijoitusreiässä. Ennen kapselin poistoa bentoniitti on poistettava sen päältä ja vähintään löyhdytettävä kapselin sivuilta, jottei kapseli vaurioituisi poiston yhteydessä.

Kapselin päältä bentoniitti poistetaan perinteisillä kaivumenetelmillä. Kapselin sivuilta bentoniitti pehmennetään käyttämällä esimerkiksi 5–10-prosenttista suolavettä, joka muuttaa bentoniitin pumpattavaksi lietteeksi. Bentoniitti poistetaan kerroksittain ylhäältä alas edeten. Sijoitusreikä on koko ajan täynnä vesi-suolaliuosta, joka myös suojaa työskentelijöitä suoralta säteilyltä. Bentoniitin lämpötila nousee kapselistä vapautuvan lämmön vuoksi, minkä takia bentoniittilietteen pumppaamiseen käytettävät laitteet rakennetaan kestäämään kuumuutta. Bentoniitin poistaminen esitetään kuvassa 14.



Kuva 14. Bentoniitin poistamiseen käytettävä menetelmä (Saanio & Raiko 1999).

Bentoniittilietettä syntyy n. 50–60 m³ sijoitusreikää kohden. Joko liete pumpataan säiliöön reiän lähistölle tai bentoniitti ja vesi erotetaan reiän läheisyydessä. Bentoniittilietteen aktiivisuus mitataan sen selvittämiseksi, pitääkö sitä käsitellä aktiivisena jätteenä.

Bentoniittia poistettaessa tulee kapseli tukea, jottei se kallistuisi. Kun kapselin yläosa saadaan näkyviin, kiinnitetään siihen tukirakenne, jolla kapselia tuetaan sivuttaissuunnassa kallionseinämää vasten ja ylhäältä sijoitusreiän kaulusrakennetta vasten.

Bentoniitti tukee paisuntapaineellaan sijoitusreiän seinämiä, ja siksi on varauduttava irtoaviin kivilohkareisiin, kun bentoniitti poistetaan. Reiän yläosan irtoavat lohkaaret poistetaan ja alaosan lohkaroitumiseen varaudutaan joko kartoittamalla etukäteen mahdollisesti lohkaroituvat kohdat luotausten avulla, varaamalla laitteet lohkaareiden havaitsemiseen ja poistoon bentoniitin liettämisen yhteyteen tai valmistautumalla tukemaan kallio teräsrenkaiden avulla, jotka asetetaan sijoitusreiän ulkoreunoille.

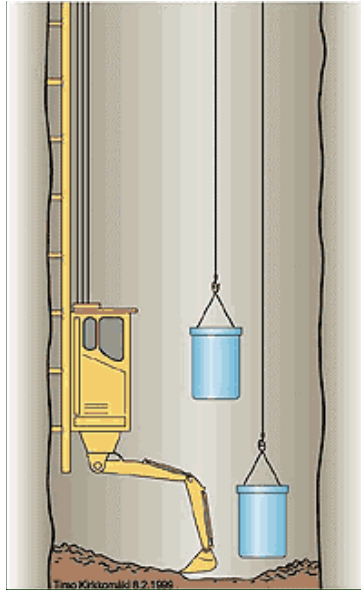
Kun bentoniitti on poistettu kapselin alareunaan asti, voidaan aloittaa kapselin irrotus. Työmenetelmä on sama kuin edellä kuvatussa kapselin palauttamisessa ennen sijoitusreiän sulkemista, mutta tulee huolehtia, ettei kapseliin ole jäänyt kiinni suuria määriä bentoniittia. Puhdistaminen voidaan tehdä vesisuihkulla. Kapseli nostetaan säteilysuojan sisään kapselinkuljetusajoneuvoon ja kuljetetaan kapselihissille.

Kun sijoitustunnelista on poistettu kaikki kapselit, puretaan tunnelin järjestelmät ja täytetään tunneli.

5.2.3 Palauttaminen loppusijoitustilan sulkemisen jälkeen

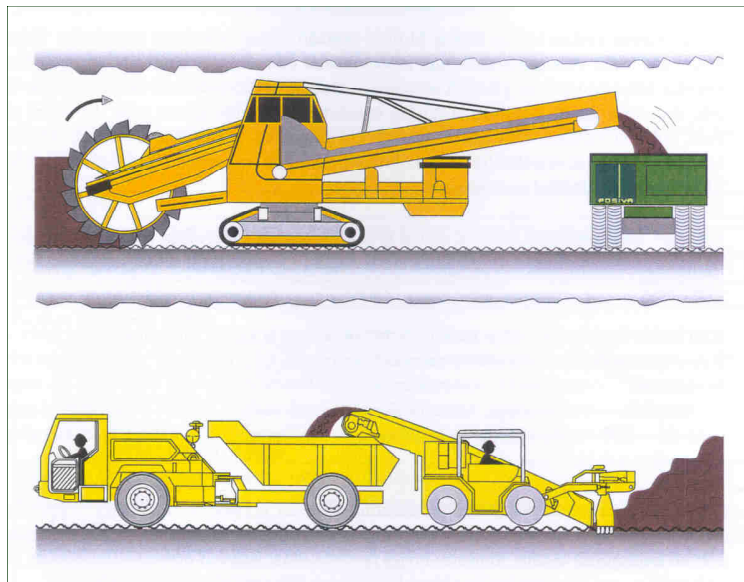
Loppusijoitustilojen sulkemisen ja alueen maisemoinnin jälkeen polttoainekapselien palauttamiseen vaaditaan maanpäällisten tilojen ja infrastruktuurin uudelleen rakentaminen sekä kuilujen, keskustunnelin ja muiden tilojen auki kaivaminen. Työt muistuttavat loppusijoitustilojen rakennustöitä, vaikkakin tilojen auki kaivaminen on työtekniisesti helpompaa kuin uusien pääsyreittien louhiminen loppusijoitustilaan, mikä olisi myös sinänsä mahdollista.

Ennen loppusijoitustilojen sulkemista kuilut on täytetty murskeella ja bentoniitilla ja suljettu betonisulkurakenteilla. Heikkousvyöhykkeissä ja kuilujen alaosissa on bentoniitista tehdyt sulut. Kuilut kaivetaan auki perinteisillä kaivu-, piikkaus- ja räjäytysmenetelmillä, ja täytemateriaalin nostossa käytetään samanlaisia nostoratkaisuja kuin tunnelien louhintavaiheessa louheen nostolle (Saanio & Kokko 2000). Kuvassa 15 on esitetty menetelmä tunnelitäytteen poistoa varten. Kuiluihin rakennetaan tarvittavat järjestelmät osin aukikaivun yhteydessä ja osin sen jälkeen.



Kuva 15. Tunnelitäyteen poisto menetelmällä, jossa kaivinkonetyyppinen lastauskone on asennettu nousunajohissiin (Alimak) (www.posiva.fi 23.7.2002).

Kuilun aukaisun jälkeen kaivetaan keskustunneli ja muut tilat auki. Työt koostuvat täyteaineen kaivusta, pois kuljetuksesta ja bentoniittisulkujen avaamisesta. Poistettavan täyteaineen määrä on niin suuri, että on kiinnitettävä huomiota tehokkaaseen täyteaineen siirtoon ja toimivaan tunnelin avaustekniikkaan. Kuva 16 on havainnollistaa muutamaa tehokasta kaivu- ja tunnelitäyteen poistomenetelmää.



Kuva 16. Vaihtoehtoisia tapoja tunnelimateriaalin kaivuun ja lastaukseen (Saanio & Raiko 1999).

Ensimmäisen kuilun lisäksi avataan myös tiloihin johtavat muut pääsyreitit. Nyt voidaan avaamista suorittaa sekä ylhäältä- että alhaaltapäin. Kun kaikki tilat on avattu ja tarvittavat järjestelmät asennettu, päästään edellä kuvattuun tilanteeseen, kapselien palauttamiseen sijoitustunnelien sulkemisen jälkeen.

5.3 Monitorointi, ydinmateriaalivalvonta ja tiedon säilyminen loppusijoituksesta

Palauttavuudesta puhuttaessa on otettava huomioon loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeiset monitorointiin, ydinmateriaalivalvontaan ja tiedon säilyttämiseen liittyvät seikat. Polttoainekapselien palauttaminen on vaikeaa ilman riittävää tietoa loppusijoitustekniikasta ja olosuhteista loppusijoituspaikalla. Tämä edellyttää organisatorista jatkuvuutta ja jonkinasteista valvontaa.

Mahdollisuus loppusijoitustilojen avaamiseen pakottaa kuitenkin myös jonkinlaiseen ydinmateriaalivalvonnan jatkamiseen tilojen sulkemisen jälkeenkin. Polttoainekapselien palauttamisen tulee olla mahdollista muttei liian helppoa, jottei palauttavuus mahdollisuutena houkuttele ydinmateriaalin vastuuttomiin palauttamisyrittäisiin tai ei-rauhanomaiseen käyttöön.

5.3.1 Ydinmateriaalivalvonta

Ydinmateriaalivalvonnalla tarkoitetaan kaikkia niitä useiden valtioiden hyväksymiä toimenpiteitä, joilla pyritään estämään ydinmateriaalin käyttö ei-rauhanomaisiin tarkoituksiin. Ydinmateriaalia energiantuotantoon käyttävä valtio joutuu huolehtimaan materiaalin turvallisesta varastoinnista, suojaamaan materiaalin fyysisesti tahattomalta tunkeutumiselta ja antamaan IAEA:lle (International Atomic Energy Agency) lupauksen siitä, että ydinmateriaalia käytetään vain rauhanomaisiin tarkoituksiin. Näillä toimenpiteillä pyritään huolehtimaan siitä, ettei energiantuotantoon käytettävä ydinpolttoaine pääse sotilaalliseen käyttöön.

Käytetyn ydinpolttoaineen ydinmateriaali on mahdollista saattaa uudelleen käytettäväksi polttoaineen ollessa varastoituna palauttamisen mahdollistavalla tavalla väliaikaisvarastossa tai avattavassa loppusijoitustilassa. Pitkällä aikavälillä, säteilyn vähentyessä merkittävästi, on plutoniumin erottaminen jopa helpommin toteutettavissa, ja siten ydinmateriaalia suojaavia toimia ei voida kokonaan poistaa.

IAEA:n näkemyksen mukaan suojoitimet käyvät tarpeettomaksi vain, mikäli materiaalia ei käytännöllisesti katsoen voida saada takaisin (practically irrecoverable) (KASAM 2001). Tällaiseen tilanteeseen saattaa olla vaikea päästä sellaisen loppusijoitustilan tapauksessa, jonka tulee olla avattavissa, kuten Suomen tilanteessa laki edellyttää.

P. J. Richardson (1999a) on kuitenkin todennut, että täytyy löytyä syy ydinmateriaalivalvonnan lopettamiseen tai ainakin suojoitimien keventämiseen. Päätymätöntä ydinmateriaalivalvontaa ei voida pitää (IAEA:n mukaan) järkevänä Skandinavian alueella, minne on tulevaisuudessa odotettavissa jääkausi. Kustannukset tällaisista toimista voivat olla kohtuuttomat, varsinkin jos ydinmateriaalivalvonta on lainsäädäntöön kiinnitetty. Tällaisen taakan siirtäminen eteenpäin on myös eettisesti ratkaisematon kysymys (Richardson 1999a).

Ydinmateriaalivalvonta (Posiva Oy, muistio 6.5.2002) toteutetaan seuraavilla erilaisilla visuaalisilla ja teknisillä mittaus-, valvonta- ja rekisteröintimenetelmillä:

- Kirjanpito materiaalista koko polttoainekierron ajan (Accountancy) ja valvonnan toimenpiteiden suunnittelu loppusijoituslaitoksen kehittämissä siten, että toimenpiteet täyttävät asetetut vaatimukset.
- Suunnittelutietojen, suunnitellun toiminnan sekä näiden toteutuksen vastaavuuden valvominen ydinmateriaalia käsittelevän laitoksen suunnittelussa (DIV, Design Information Verification).
- Ydinpolttoaineen jatkuva fyysinen suojeleminen ja valvonta häviämisen tai sekaantumisen estämiseksi (Containment and Surveillance, C/S).
- Polttoaineen määrän ja laadun todentaminen ainetta rikkomattomien määritysten avulla (Nondestructive Assay, NDA).
- Tiedon jatkuvuuden kontrollointi, tarkoituksena varmistaa tiedon säilyminen loppusijoituspaikasta ja loppusijoitustekniikasta (Continuity of Knowledge, CoK).

SAGOR (Development of Safeguards for Final Disposal of Spent Fuel in Geological Repositories) on IAEA:n käynnistämä ohjelma ydinmateriaalivalvonnan teknisten suojoitimien edistämiseksi (KASAM 2001). Ohjelman loppuraportit julkaistiin 1998 ja niissä esitettiin valvonnan näkökohtia ydinmateriaalin käyttövaiheessa, loppusijoituksen aikana ja tilojen sulkemisen jälkeen. Raporteissa eritellään eri mahdollisuudet polttoaineen katoamiselle eri tilanteissa ja erityistä valvontaa vaativat tilanteet ja lisäksi kuvaillaan tarvittavia kehityskohteita ydinmateriaalivalvonnan alueella (mm. monitorointi ydinmateriaalivalvonnan välineenä). SAGOR-ohjelman jälkeen Suomessa on alettu konkretisoimaan ydinmateriaalivalvonnan kehittämistä pitäen silmällä Olkiluotoon rakennettavia loppusijoitustiloja (Rautjärvi et al. 2002).

Suljetulle loppusijoitustilalle SAGORin määrittelemät ydinmateriaalin katoamistiet edellyttävät kaivauksia ja suuria maatöitä, joten suljetun loppusijoitustilan ydinmateriaalin valvonnaksi pitkällä aikavälillä riittääkin loppusijoitusalueen erilaiset visuaaliset ja seismiset valvontamenetelmät, joilla kyetään paljastamaan luvattomat kaivutyöt loppusijoitusalueella ja sen välittömässä läheisyydessä (KASAM 2001).

Ydinmateriaalivalvonta aiheuttaa kustannuksia, joista materiaalin käytön ja loppusijoituksen yhteydessä huolehtivat jätteiden tuottajat. Loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen kustannuksia aiheutuu loppusijoitusalueen valvonnasta ja tiedon säilyttämisestä.

5.3.2 Monitorointi

Monitoroinnilla (Grupa et al. 2000) tarkoitetaan valvovia ja tarkkailevia toimintoja loppusijoitusprosessin yhteydessä. Monitoroinnin tehtävänä on tarjota informaatiota käytettäväksi loppusijoitustilojen suunnitteluun, rakentamiseen ja turvallisuusanalyysien laatimiseen. Lisäksi monitorointia käytetään tutkittaessa loppusijoituksen vaikutuksia ympäristöön, yhteisöön ja työntekijöihin. Monitorointi on tärkeä osa ydinmateriaalivalvonnan toimenpiteitä, ja sen avulla saadaan myös tietoa yhteiskunnalliseen päätöksentekoon. Monitorointi on siis tärkeä osa loppusijoitusprosessia koko loppusijoituksen käyttövaiheen ajan.

Palautettavuuden yhteydessä voidaan monitoroida kapselien koskemattomuuteen ja kapselien saatavuuteen liittyviä parametreja. Monitorointia käytetään myös tilojen sulkemista koskevan päätöksenteon yhteydessä loppusijoituskonsepteissa, joissa palautettavuus mahdollistetaan sulkemalla tiloja osittain ja viivyttämällä tilojen lopullista sulkemista. Välillisesti monitorointi on myös osa palautettavuuden tekniikan havainnollistamisprosessia ja tarkoittaa lähinnä yksittäisten kapselien palauttamisdemonstraatioita.

Valvonta- ja mittaustoimet keskittyvät loppusijoitustilojen käyttövaiheeseen. Tilojen sulkemisen jälkeen monitoroinnilla on rooli lähinnä ydinmateriaalivalvonnan osana. Suoranaista loppusijoitettujen kapselien valvontaa ja tarkkailua ei turvallisuutta vaarantamatta voida tilojen sulkemisen jälkeen tehdä eikä siihen ole nähty tarvettakaan. Loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuudelle suoritettu turvallisuusanalyysi osoittaa radioaktiivisten aineiden vapautumisen säteilyvaikutuksen pessimistisillä oletuksillakin vähäiseksi (Vieno & Nordman 1999), joten suljettujen tilojen toimivuuden valvomiseen pitkäaikaisturvallisuuden kannalta ei nähdä tarvetta.

Kallioperää voidaan tarkkailla erilaisilla menetelmillä ja mittauksilla. Näistä tekniikoista loppusijoitukseen soveltuu akustinen monitorointi (Young 1999), joka on kaukovalvottua tekniikkaa kallio- ja betonirakenteille. Akustisella monitoroinnilla saadaan

tietoa värähtelyistä ja värinöistä kallioperässä. Mittaukset perustuvat akustisten, taajuusdeltaan korkeiden (30–250 kHz tai enemmän) ”taustäänien” analysointiin.

Sensorit asennetaan kallioon kapeisiin reikiin, ja samoja sensoreita voidaan käyttää passiiviseen valvontaan (kuunnellaan akustisia taustäänä kalliosta) tai aktiiviseen tutkimukseen (mitataan kallion ominaisuuksia lähettämällä ultraäänipulsseja). Tulokset saadaan aaltomuodossa. Menetelmät ovat parhaimmillaan vaurioiden arvioinnissa ja karakterisoinnissa sekä rasisuskenttien muutosten ja materiaalin heikkenemisen määrittämisessä.

Akustiseen monitorointiin käytettävien sensorien elinikä on ainakin 20 vuotta ja niiden arvioidaan kestävän jopa 50 vuotta. Parhaiten akustinen tekniikka toimii kovilla kivilaatuilla.

Monitorointi aiheuttaa kaikissa tapauksissa kustannuksia ja vaatii institutionaalista hallintaa. Mitä pidempään monitorointia halutaan jatkaa, sitä suuremmiksi nousevat kustannukset. Loppusijoitustilojen siirtyessä valtion haltuun sulkemisen jälkeen huolehtii valtio, ja siten veronmaksajat, näistä kustannuksista.

5.3.3 Tiedon säilyttäminen

Loppusijoitustilojen sulkemisen ja maisemoinnin jälkeen on huolehdittava tiedon säilymisestä. Loppusijoituspaikka on merkittävä, ja on kiinnitettävä huomiota osaamisen säilymiseen loppusijoituksen teknisistä ratkaisuista ja kykyyn käsitellä radioaktiivista säteilyä sekä toimia sen vallitessa. Tällä hetkellä ydinvoimaosaaminen on keskittynyt tutkimuslaitoksiin, yliopistoihin, turvallisuusviranomaisiin ja ydinvoimayhtiöihin. Mikäli mielenkiinto ydinvoimaan energiantuotantomuotona vähenee, on valtion mahdollisesti puututtava tilanteeseen ja huolehdittava riittävän tasoisen osaamisen jatkuvuudesta (NEA 2001).

Tiedon säilyttäminen tuhansien vuosien aikavälillä herättää organisatoriseen jatkuvuuteen liittyviä kysymyksiä. Kenen vastuulla tiedon säilyvyys on? Millaisessa muodossa tietoa kannattaa säilyttää? Merkitäänkö loppusijoituspaikka ja miten?

Voidaan olettaa, ettei tiedon käsittely nykyisen kaltaisilla välineillä ole mahdollista tuhannen vuoden kuluttua, joten loppusijoitustiloista arkistoitua tietoa tulee päivittää ja pitää ajantasalla. Tämän kaltainen tiedon säilyttäminen vaatii jatkuvaa panostusta ja aiheuttaa kustannuksia.

Loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen Posiva Oy on täyttänyt lain vaatimukset käytetyn polttoaineen loppusijoituksesta: loppusijoitustila ja käytetyn polttoaineen omistus siirtyvät valtion haltuun. Tällöin valtio on vastuussa jatkossa kertyvistä kustannuksista.

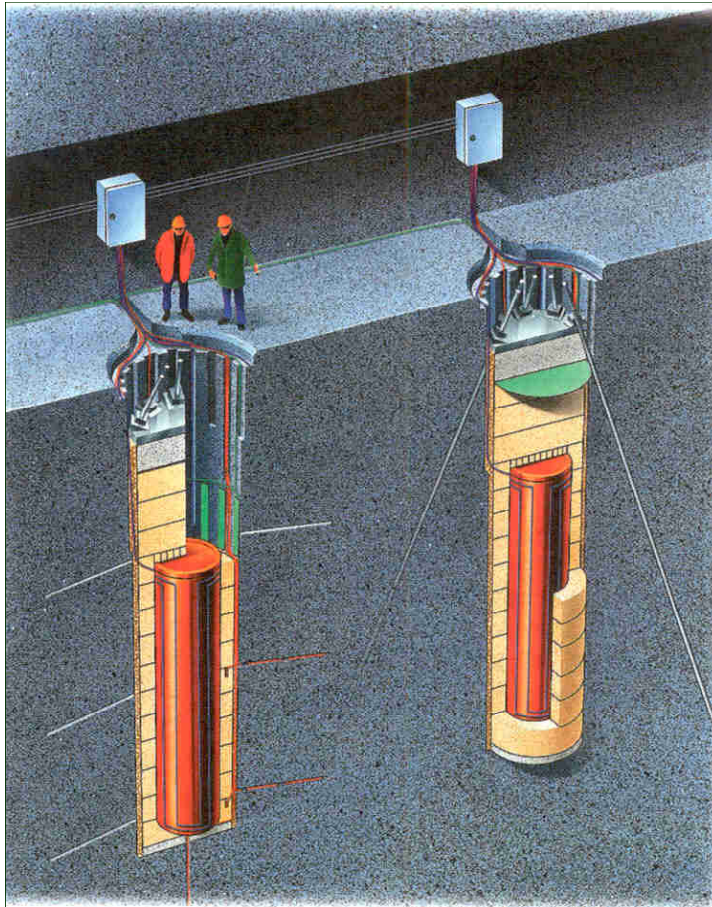
5.4 Kapselien palauttamiskoe Äspön kalliolaboratoriossa

Suomen kannalta kiinnostavia palautettavuutta tukevia tutkimuksia on tehty Ruotsissa Äspön kalliolaboratoriossa. Kalliolaboratorion tehtävänä on kehittää, testata, arvioida ja demonstroida keinoja loppusijoituksen suunnittelun ja toteutuksen kaikilla osa-alueilla.

Yksi käynnissä oleva koe on kapselien palauttamisen demonstrointi. Tarkemmin Äspössa tehtävään tutkimustyöhön voi tutustua viitteessä SKB (2001) tai Äspö (2000).

Vuonna 2000 Äspön kalliolaboratoriossa sijoitettiin kaksi luonnollisen kokoista kuparikapselia bentoniitilla vuorattuihin sijoitusreikiin. Kapselien sisällä on lämmittimet. Tarkoituksena on testata kanisterin palauttamista vedellä kyllästyneestä ja paisuneesta bentoniitista luonnollisissa olosuhteissa 420 metrin syvyydessä. Koejärjestely esitetään kuvassa 17.

Kapselien palauttamisen tutkimus Äspössa on edennyt neljässä vaiheessa. Aluksi on tutkittu alustavasti erilaisia tekniikoita pyrkien valitsemaan referenssitekniikka. Huomion kohteena oli erilaisia mekaanisia, hydrodynaamisia, lämpöön tai jäähdytykseen perustuvia sekä sähköisiä menetelmiä. Näitä on kuvattu tarkemmin viitteessä Kalbantner & Sjöblom (2000). Paisuntapaineen heikentämisessä todettiin käyttökelpoisimmaksi paineistetun suolaveden käyttö. Tämän jälkeen on kehitetty prosessia, ja nyt on siirrytty täyden mittakaavan kokeisiin kalliolaboratoriossa. Kokeiden avulla saadaan tutkittua tietoa bentoniitin poistamisen tekniikasta ja päästään kokeilemaan kapselin palauttamista todellisissa olosuhteissa, vaikkakaan kapselien sisällä ei ole radioaktiivista ainetta, vaan lämmittimet. Kokeiden jälkeen voidaan valita bentoniitin poistamiseen käyttökelpoiset tekniikat.



Kuva 17. Kapselien palauttamiskoetta varten sijoitetut sähkölämmittimillä varustetut koekapselit Äspön kalliolaboratoriossa. Ympäröivään kallioon ja kapselin pinnalle on asennettu sensoreita lämpötilan ja muiden ominaisuuksien monitorointia varten (SKB 2001).

Bentoniitin kyllästymisvaiheen aikana kerätään tietoa kyllästymisasteesta, lämpötilasta, paisuntapaineesta ja liikeyhdysistä bentoniittilohkoissa. Kallio on instrumentoitu lämpötilan, jännitystilojen ja liikeyhdysten monitorointia varten. Lisäksi mitataan kuparikouren muodonmuutoksia ja kanisterin lämpötilaa.

Bentoniitin ollessa täysin kyllästynyttä kokeillaan kapselin palauttamista. Bentoniitti pehmennetään suolapitoisella vedellä ja sen ote kapselistä löyhdytetään. Tämän jälkeen päästään kokeilemaan kapselin nostoa kauko-ohjatusti kapselinkuljetusajoneuvon säteilysuojan sisään (SKB 2001). Bentoniitin kyllästymisen on arvioitu kestävän 3–5 vuotta, eli koekapselien irrottamiseen ryhdytään aikaisintaan vuonna 2003.

6. Kirjallisuudessa käytettyjä kustannusten esitystapoja

Käytetyn ydinpolttoaineen palauttamisen kustannuksille ei juurikaan ole laskettu yksityiskohtaisia kustannusarvioita. Kansainvälisellä tasolla monet maat ovatkin vasta tekemässä päätöksiä lopullisesta ydinjätteen sijoituspaikasta ja sijoituskonseptista. Tällöin loppusijoitussuunnitelmia pohditaan lähinnä yleisesti ja tutkitaan, millainen mahdollisuus tehtyjen suunnitelmien pohjalta polttoaineen palauttamiseen on olemassa.

Luvun alussa etsitään vastausta kysymykseen jätteiden palauttamisen kustannusten maksajasta. Asiaa pohditaan palauttamiseen johtavien erilaisten syiden ja palauttamisen ajankohdan kannalta.

Useassa Euroopan maassa palautettavuus ajatellaan polttoaineen pitämisenä saatavilla. Tällöin loppusijoitussuunnitelmissa pidennetään sijoitusreikien, sijoitustunnelien ja kuilujen aukioloa. Tässä luvussa esitellään tämä pidennetyt aukiolon tapaus ja pohditaan siitä aiheutuvia kustannusvaikutuksia polttoaineen palauttamisen kannalta.

Luvun lopussa esitellään tapoja kustannusten arviointiin ja pohditaan kustannusten arviointiin liittyviä epävarmuustekijöitä.

6.1 Kenen vastuulla ydinjätteen palauttamisen kustannukset ovat?

Vastuu käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen kustannuksista on jätteen tuottajalla (ks. luku 2). Jossain vaiheessa tilojen sulkemisen jälkeen jätteen tuottajan katsotaan täyttäneen lain edellyttämät vaatimukset sijoittaa jätteet pysyväksi tarkoitetulla tavalla ja ydinmateriaalin omistus siirtyy valtiolle.

Eettisesti vastuukysymys on ongelmallinen. Ydinjätteestä keskusteltaessa pääperiaatteet ovat ”aiheuttaja maksaa” ja ”ei taakkaa tuleville sukupolville”. Palautettavuus antaa mahdollisuuden punnita päätöksen sopivuutta tulevaisuudessa, mutta toisaalta operaation toteuttaminen aiheuttaa huomattavan taloudellisen rasitteen. Suoraa ratkaisua tähän ongelmaan ei ole. Jätteen tuottajan ei voida olettaa varautuvan kustannuksiin mahdollisesti tapahtuvan polttoaineen palauttamisen osalta, koska todennäköisyys operaation toteuttamiseen on pieni. Loppusijoituksen turvallisuushan ei saa edellyttää jälkivalvontaa ja korjaavia toimenpiteitä tulevaisuudessa. Lisäksi palauttamisen kustannusten arvioiminen on hankalaa, kun ei tiedetä palauttamisen hetkellä käytössä olevaa tekniikkaa ja palauttamisen syytä.

Palauttamisen kustannukset riippuvat vahvasti ajankohdasta ja myös palauttamiseen johtavista syistä. Kustannukset kasvavat portaittain tiloja suljettaessa. Lopullisen sulkemisen jälkeen palauttaminen muuttuu sitä vaikeammaksi, mitä pidempi aika loppusijoitustilojen sulkemisesta on kulunut. Palauttamiseen johtavat syyt ja jätteen jälleenkäsittely uudella tekniikalla tms. aiheuttavat kustannuksia, jotka ainakin välillisesti liittyvät palauttamiseen.

6.1.1 Palauttamisen ajankohdan ja syyn vaikutukset

O. Söderberg (KASAM) on pohtinut palautettavuuden kustannusvaikutuksia loppusijoituksen eri vaiheissa palauttamisen tapahtuessa eri syistä (Söderberg 2000). Söderbergin kustannusesimerkissä valitut ajankohdat palauttamiselle perustuvat ruotsalaiseen kaksivaiheiseen loppusijoitussysteemiin. Ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan loppusijoitustilat osittain ja demonstroidaan niiden käyttöä kymmenen vuotta. Tämän jälkeen arvioidaan saatuja kokemuksia ja tehdään erillinen päätös loppusijoituksen jatkamisesta. Suomen ja Ruotsin loppusijoituskonseptit ja yhteiskunnallinen suhtautuminen loppusijoitukseen ovat hyvin samankaltaiset, joten Söderbergin pohdinnat sopinevat pääosin myös Suomen tilanteeseen.

Palauttamiselle valitut ajankohdat ovat a) kymmenen vuoden demonstraatiovaiheen jälkeen, b) käyttövaiheen jälkeen mutta ennen tilojen lopullista sulkemista ja c) noin 50 vuotta tilojen sulkemisen jälkeen. Kaikkia tapauksia tarkasteltiin kolmen palauttamiseen johtaneen syyn valossa. Nämä syyt olivat 1) ratkaisu ei ole riittävän turvallinen, 2) ratkaisu on riittävän turvallinen, mutta jätteen käsittelyyn on olemassa parempi keino, ja 3) loppusijoitettu jäte on muuttunut arvokkaaksi raaka-aineeksi. Tapaukset ja syyt esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Palauttamisen syyt ja ajankohdat (Söderberg 2000).

Palauttamisen aika	Palauttamisen syy		
	Ei riittävän turvallinen	Riittävän turvallinen, mutta parempi ratkaisu on esitetty	Jäte on muuttunut arvokkaaksi raaka-aineeksi
a) 10 vuoden kuluttua	1a	2a	3a
b) Ennen tilojen sulkemista	1b	2b	3b
c) 50 vuotta sulkemisesta	1c	2c	3c

Kymmenen vuoden demonstraatiovaiheen jälkeen ydinvoimayhtiö omistaa jätteet edelleen ja mikäli turvallisuus todetaan riittämättömäksi (1a), vastaa ydinvoimayhtiö myös jätteiden palauttamisesta ja palauttamisen kustannuksista.

Mikäli loppusijoitusratkaisu todetaan turvalliseksi mutta kymmenen vuoden demonstraatiojakson aikana on kehitetty parempi keino jätteen käsittelyyn (2a), voi valtiolta määrätä ydinvoimayhtiön palauttamaan polttoainekapselit ja käyttämään uudempaa tekniikkaa. Söderbergin (2000) mukaan tulee noudattaa molempia peruseriaatteita: ”aiheuttaja maksaa” ja ”tämän sukupolven tulee huolehtia kustannuksista”. Kustannuksia tällaisessa tapauksessa on mahdotonta arvioida tarkasti etukäteen, koska ko. tekniikkaa ei ole vielä keksitty.

Jos ydinmateriaali todetaan taloudelliseksi hyödykkeeksi kymmenen vuoden jälkeen (3a), ei ydinvoimayhtiö jatka jätteen loppusijoitusta. Palauttamisen kustannuksen maksaa palautettava materiaali itse voitoilla, joita se palauttamisensa jälkeen tuottaa. Tässä tilanteessa voidaan kiistellä siitä, kenellä on oikeus materiaalin palauttamisesta aiheutuviin voittoihin ja välivarastoidun materiaalin (materiaalin, jota ei vielä ole ehditty loppusijoittaa) loppusijoitukseen tarkoitettuihin varoihin. Voidaanko rahastoidut, jätteen loppusijoitukseen tarkoitettut varat ohjata ydinvoimateollisuudelle, kun rahastoituja varoja ei enää käytetä aiottuun tarkoitukseen? Kenelle kuuluu rahallinen voitto operatiosta? Näihin kysymyksiin ei ole esitetty vastauksia.

Ennen tilojen sulkemista (ajankohta b) tapahtuvalla palauttamisella on suuret kustannusvaikutukset. Vastuu jätteistä on lain mukaan edelleen jätteen tuottajilla, ja siten jätteen tuottajat ovat vastuussa palauttamisen kustannuksista. Tämä periaate pätee seuraavissa tapauksissa: jätteen loppusijoitus ei ole turvallinen (1b), ja loppusijoitus on turvallinen, mutta on olemassa parempi keino jätteen käsittelyyn (2b). Tapauksessa 2b tilanne on ristiriitainen: ei löydy loppusijoituksen turvallisuutta vähentäviä tekijöitä, mutta parempi keino on olemassa. Jätteiden loppusijoittamiseen on ollut viranomaisen lupa, ja tässä tilanteessa jätteen omistaja on huolehtinut jätteistä asianmukaisella tavalla ja palauttamispäätös tulee todennäköisesti valtiovallalta. ”Aiheuttaja maksaa” -periaate on kuitenkin teoriassa voimassa.

Jätteen muuttuessa arvokkaaksi raaka-aineeksi (3b) maksaa jäte itse palauttamisensa. Tilanne käyttövaiheen jälkeen vastaa tilannetta kymmenen vuoden käytön jälkeen sillä erolla, ettei loppusijoituksen kulut kattavassa rahastossa ole enää jäljellä varoja, joiden mahdollisesta palauttamisesta ydinvoimateollisuudelle voitaisiin kiistellä. Palauttamisesta aiheutuvien rahallisten voittojen osalta tilanne on vähintäänkin yhtä mutkikas kuin edellä kuvatussa käyttövaiheen aikaisen palauttamisen tilanteessa.

50 vuotta loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen (ajankohta c) ovat vastuu loppusijoituksesta ja jätteen omistus siirtyneet valtiolle. Jätteen palauttamisen taloudelliset vaikutukset tässä tapauksessa ovat huomattavat.

Mikäli loppusijoituksen turvallisuudessa havaitaan aukkoja (1c), kustannukset punnitaan varmasti tarkasti niiden riskien kanssa, joita loppusijoituksen jatkamisesta aiheutuu. Tehtäessä päätös palauttamisesta on kustannusten maksaminen valtion ja siten veronmaksajien vastuulla.

Polttoaineen palauttaminen tilanteessa, jossa loppusijoituksen turvallisuudessa ei ole havaittuja ongelmia, mutta tarjolla olisi parempaa tekniikkaa (2c), on varsin epätodennäköinen. Samat argumentit ovat kuitenkin voimassa kuin edellisessä tilanteessa (1c).

Palauttaminen jätteen muuttuessa voimavaraksi (3c) ei tässäkään vaiheessa ole rahakysymys. Rahallinen materiaalista saatava voitto kuuluu tässä tapauksessa valtiolle.

6.2 Pidennetty loppusijoitustilojen aukiolo vai välitön tilojen sulkeminen?

Euroopan komission Concerted Action -hankkeessa valmistellussa raportissa (Grupa et al. 2000) on loppusijoituksen kulku jaettu aikavyöhykkeisiin, joita on 13 kappaletta. Palautettavuutta tarkastellaan kunkin aikavyöhykkeen aikana ja jälkeen. Aikavyöhykkeet esitetään taulukossa 3. Aikavyöhykkeiden kestojen vaihteluväli määritellään raportissa mukana olleiden Euroopan maiden (Belgian, Suomen, Ranskan, Saksan, Hollannin, Espanjan, Sveitsin, Ruotsin ja Ison-Britannian) loppusijoitussuunnitelmien kunkin aikavyöhykkeen keston mukaan. Aktiivisuus ja passiivisuus (taulukossa 3) katsotaan loppusijoitetun ydinpolttoaineen saatavuuden muutoksien mukaan. Aktiivisilla aikajaksoilla käytetyn ydinpolttoaineen saatavuudessa tapahtuu siis muutosta.

Taulukosta 3 voidaan havaita esimerkiksi aikavyöhykkeen 6 (täytetyn ja suljetun sijoituskammion pitäminen saatavilla ennen kuin sijoitustunneli täytetään) tyypillisen, suunnitellun keston vaihtelevan nollasta sataan vuoteen. Suomalaisessa ja myös mm. ruotsalaisessa loppusijoitusmallissa sijoitusreiät täytetään heti kapselin reikään laskemisen jälkeen. Sijoitustunnelit täytetään asennettujen kapselien osalta lähes välittömästi ja suljetaan, kun tunneliin on asennettu kaikki kapselit. Kun kaikki polttoaine on sijoitettu, loppusijoitustilat suljetaan ilman viivytyksiä. Kaikkialla ei ole suunniteltu vastaavalla tavalla toimimista. Mahdollisuutena on myös viivästää tilojen ja tunneleiden sulkemista.

Taulukko 3. Loppusijoituksen aikavyöhykkeet (EC 2000). Taulukossa käytettävä termi sijoituskammio on yleisnimitys tilasta, johon jätekapselit ensisijaisesti sijoitetaan. Suomalaisessa konseptissa sijoituskammiota vastaa sijoitusreikä.

Aikavyöhyke	Kuvaus	Tyypillinen kesto / a	Aktiivinen / Passiivinen
1	Väliaikaisvarastointi	0–100	P
2	Loppusijoitustilojen suunnittelu ja rakentaminen sekä ensimmäisen sijoituskammion valmistuminen	10–20	P
3	Yhden sijoituskammion täyttäminen jätekapseleilla	< 5	A
4	Jätekapselin pitäminen saatavilla ennen sijoituskammion sulkemista	0 -> 100	P
5	Sijoituskammion täyttäminen ja sulkeminen	< 1	A
6	Täytetyn ja suljetun sijoituskammion pitäminen saatavilla ennen kuin sijoitustunneli täytetään	0 -> 100	P
7	Sijoitustunnelin täyttäminen	1–5	A
8	Kulcutunnelin (keskustunnelin) auki pitäminen sijoitustunnelien täyttämisen jälkeen	0 -> 100	P
9	Kulcutunnelin täyttäminen	1–5	A
10	Kuilujen auki pitäminen kulcutunnelin täyttämisen jälkeen	0 -> 100	P
11	Kuilujen täyttäminen ja sulkeminen	1–5	A
12	Sulkemisen jälkeinen institutionaalisen tarkkailun jakso	0–500	P
13	Sulkemisen jälkeinen jakso ilman institutionaalista tarkkailua	rajoittamaton	P

Palautettavuus tilojen lopullisen sulkemisen jälkeen todetaan mahdolliseksi kaikkialla. Useissa maissa keskustellaan polttoaineen palauttamisen helpottamisesta viivyttämällä polttoaineen saatavuuteen vaikuttavien tunnelien täyttötöiden aloittamista. Samalla mahdollistetaan jätteen ja loppusijoitustilojen suunnitellun mukaisen toiminnan monitorointi.

Esimerkiksi Hollannin suunnitelmissa sijoituskammiot suljetaan välittömästi, mutta sijoitustunneleita pyritään pitämään auki vähintään 25 vuotta. Edellytyksenä on loppusijoitustilojen olosuhteiden pysyminen vakaana. Päätös tilojen sulkemisesta riippuu sosiaalisesta kehityksestä, loppusijoitustilan järjestelmien odotetusta eliniästä sekä ylläpidon ja monitoroinnin kustannuksista. CORA (Comissie Opberging Radioactief Afval) ennustaa jakson maksimipituuden olevan n. 200 vuotta (Richardson 1999b). Aikajaksojen pituuksista ja Euroopan maiden palautettavuusnäköyksiä löytyy lisätietoa viitteestä Grupa et al. (2000).

Loppusijoitustilan käyttövaiheen jälkeen on erotettavissa kaksi tapausta (Biurrun et al. 1999).

Tapaus 1: Maanalainen loppusijoitustila on pidetty avoinna viimeisten jätepakkausten sijoittamisen jälkeen. Loppusijoitustila on siis käyttövaiheen jälkeisessä vaiheessa mutta ei vielä sulkemisen jälkeisessä vaiheessa. Pääsy tiloihin on mahdollista kuilujen tai muiden kulkuteiden kautta maan pinnalta. Tässä tapauksessa suolaveden, pohjaveden ja jopa pintaveden on mahdollista päästä tiloihin kuilujen kautta. Hapen läsnäolo voi aiheuttaa ongelmia aerobisena korroosiona, ja toisaalta happi hapettaa kallioperää. Kallioperän lämpötilajakaumat riippuvat pitkälti loppusijoitustilan ilmastoinnista. Lisäksi ihmisen tunkeutuminen tiloihin ja asiaton ydinmateriaaliin kajoaminen on mahdollista. Tämän tapauksen etuna on polttoaineen helpompi ja taloudellisempi palauttavuus.

Tapaus 2: Maanalainen loppusijoitustila on suljettu, eli kaikki tunnelit, tilat ja pääsyreitit on täytetty ja suljettu. Loppusijoitustila on sulkemisen jälkeisessä vaiheessa. Polttoaineen palauttaminen vaatii uusien reittien louhintaa tai vanhojen pääsyteiden uudelleen auki kaivamista. Tässä tapauksessa pintavesien pääsy tilaan on mahdotonta ja pohjavesien sekä suolaisen veden liikkuvuus kalliotiloissa arvioitavissa. Ihmisen tunkeutuminen tiloihin on äärimmäisen epätodennäköistä ja ydinmateriaalin asiattomat palautusyritykset havaitaan ydinmateriaalivalvonnan edellyttämillä valvontakeinoilla. Polttoaineen palauttaminen vaatii suurta panostusta ja kustannukset toimista ovat huomattavat.

6.2.1 Kustannusvaikutuksia eri tapauksissa

Tapaus 1: Pidennetty tilojen aukiolo

Pidennetty käyttövaiheen jälkeinen ajanjakso ennen tilojen lopullista sulkemista vaatii loppusijoitustilojen ja loppusijoitusorganisaation ylläpitoa ja jatkuvuutta.

Ydinmateriaalivalvonta edellyttää ympärivuorokautista päivystystä ja kontrollointia paikan päällä. Loppusijoitustila on pidettävä turvallisessa kunnossa ja työskentelyolot asianmukaisina. Pitkällä aikavälillä kuilujen ja tunnelien lujitustarve tulee tarkastaa säännöllisesti. Järjestelmät tiloissa vaativat ylläpitoa ja huoltoa. Ilmastoinnilta vaaditaan tehokkuutta nousevan lämpötilan ja kosteuden vuoksi, jotta olosuhteet pysyvät jätteiden eristyksen kannalta edullisina. Käyttö- ja ylläpito henkilöstön säteilyaltistus kasvaa, mikäli tiloissa suoritetaan toimenpiteitä.

Kaikki ylläpito- ja valvontatoimet aiheuttavat kustannuksia. Kustannuksiin varautuminen on vaikeaa, mikäli ei ole määritelty aikajaksoa ennen lopullista sulkemista. Mikäli

pidennetyn aukiolon vaihe on pitkä, ilmenee kustannusten maksajan määrittelyssä ongelmia. Aukioloa pitkittävien maiden on pystyttävä ratkaisemaan, milloin ydinvoimayhtiö on täyttänyt velvollisuutensa ja jätteiden omistus siirtyy valtiolle. Selvänä rajapyykkinä pidetään tilojen sulkemista, mutta tässä tilanteessa ei välttämättä ole kohtuullista olettaa loppusijoitusorganisaatiolta jatkuvuutta ennalta määräämättömään ajankohtaan. Mikäli palauttamispäätös tehdään avoimena pidetystä tilasta, palauttamisen kustannukset eivät nouse kohtuuttomaksi. Organisatorinen rakenne on valmiina, kuilut ovat avoimet ja järjestelmät toimivat. Palauttamisen osalta pidennetty tilojen avoimena pitäminen on edullinen vaihtoehto. Tilojen ollessa auki saadaan myös konkreettisia tuloksia säteilytasoista tiloissa ja voidaan siten seurata asennettujen päästöesteiden toimintaa.

Tilojen lopullinen sulkeminen on ehdoton edellytys pitkäaikaisturvallisuuden kannalta. Yllättävät muutokset poliittisessa, sosiaalisessa tai ekologisessa ympäristössä (vallankaappaukset, sodat, luonnonkatastrofit) saattavat aiheuttaa avoimen loppusijoitustilan hylkäämisen. Tästä syystä loppusijoitustilan avoimena pitäminen palautettavuuden helpottamiseksi aiheuttaa suuren riskin ja avoimen ajanjakson pituutta tulee rajoittaa (De Preter 2000).

Tapaus 2: Tilojen välitön sulkeminen

Vastuu loppusijoitustiloista siirtyy sulkemisen jälkeen valtiolle. Kustannuksia tulee ydinmateriaalivalvonnan edellyttämistä suojaustoimista.

Polttoaineen palauttaminen on työläs prosessi. Palauttamiseen ja kustannuksiin vaikuttavia seikkoja tämän tapauksen osalta on käsitelty luvussa 5.

6.3 Kustannusten esitystapoja ja kustannusten arvioinnin vaikeuksia

Tässä ei esitetä laskelmia tai rahayksikkömääräisiä kustannusarvioita, ainoastaan tapoja, joilla kustannuksia arvioidaan, koska tarkkoja laskelmia ei läpikäydyssä kirjallisuudessa ole juurikaan esitetty. Lisäksi pohditaan tarkkojen laskelmien tekemistä rajoittavia seikkoja ja tehtyihin laskelmiin vaikuttavia epävarmuuksia. Rahayksikkömääräisiä esimerkkejä esitetään myöhemmin luvussa 7.

Kustannuksiin liittyvien pohdintojen tarkkuus riippuu loppusijoitussuunnitelmien yksityiskohtaisuuden tasosta. Mikäli loppusijoituksen suunnitelmia ei ole lyöty lopullisesti lukkoon, ei palautettavuutta ole kustannuksien osalta voitu pohtia tarkkaan. Palautettavuuden kustannusten yksityiskohtainen arvioiminen edellyttää loppusijoituksen kustan-

nusarviolta sellaista yksityiskohtaisuuden tasoa, että loppusijoituksen yksittäisten kustannustekijöiden (esim. yhden kapselin reikään laskun kustannus, tai yhden sijoitustunnelin vaatimien järjestelmien kustannus) arvioiminen käänteisessä toiminnassa on mahdollista.

Kustannusten arvioiminen on yleisesti ottaenkin hankalaa. Tarkkojen kustannusarvioiden tekeminen loppusijoitukselle, jonka toteutuksesta ei ole käytännön kokemuksia, on vaativaa ammattilaisten työtä. Kustannusten arvioiminen hyvällä tarkkuudella on tärkeää, koska loppusijoituksen kustannukset sisällytetään ydinsähkön hintaan. Loppusijoituksen kustannusten laskemisen metodiikkaa ja kustannuselementtejä esitellään viiteessä NEA (1993).

Palautettavuuden kustannusten arviointia vaikeuttaa erityisesti palauttamisen toteutumisen epätodennäköisyys ja mahdollisen tapahtuman sijoittuminen tulevaisuuteen ennalta määrittelemättömään ajankohtaan. Kustannusten arvioiminen edellyttää jonkinasteista toimintasuunnitelmaa ja, kun operaatiolle ei voida määritellä tarkkaa ajankohtaa, ovat kustannusarviot skenaariotyyppejä. Kustannuksia siis arvioidaan ennalta määritettyjen esimerkkitapausten puitteissa samaan tapaan kuin palautettavuuden toteutettavuutta eri vaiheissa loppusijoitusta.

Tehtyjä kustannusarvioita kaukana tulevaisuudessa tapahtuvalle toiminnalle ei voida pitää yksiselitteisinä tai tarkkoina. Tekniikan kehittyminen vaikuttaa kustannusten suuruuteen, ja poliittiset tai sosiaaliset muutokset voivat aiheuttaa kustannuksiin epävarmuutta. Esimerkiksi poliittisen luvanhakuprosessin muuttuminen voi aiheuttaa merkittäviä viivästymiä toiminnan toteuttamisessa. Tehtäville kustannusarvioille on siis jätettävä suurehkot virhemarginaalit.

Palauttamisen kustannuksia ovat muun muassa kapselin maan pinnalle nostamisesta aiheutuvat kulut. Näiden kulujen kustannustekijät riippuvat siitä, milloin palauttaminen tehdään. Lisäksi palautettavuuden mahdollistamisesta aiheutuu tutkimus- ja kehitystyön kuluja. Rahayksikkömääräisten arvioiden lisäksi palautettavuutta arvioidaan loppusijoituksen viivästymänä vuosina, miestyötunteina, prosentteina loppusijoituksen kokonaiskustannuksista tai muilla epäsuorilla keinoilla.

Suomessa on arvioitu palauttamiseen kuluvaan aikaan Posivan palautettavuutta käsittelevässä työmuistiossa (Saanio & Raiko 1999). Mikäli kapseli päätetään palauttaa maan pinnalle ennen sijoitusreiän sulkemista, kestää työ muutamia tunteja. Yhden täytetyn sijoitustunnelin avaamisen ja siinä olevien kapselien palauttamisen on arvioitu vievän muutamia kuukausia. Mikäli päätetään avata suljetut loppusijoitustilat, palauttaa kaikki kapselit ja täyttää tilat uudelleen, vie projekti arviolta kymmenen vuotta. Kahdelle ensimmäiselle näistä tapauksista on laskettu karkea rahallinen arvio, mutta suljettujen ti-

lojen avaamiselle ja kaikkien kapselien palauttamiselle on tehty vain prosentuaalinen arvio (% loppusijoituksen kustannuksista). Nämä arviot esitetään kohdassa 7.1.1.

Ruotsissa 400 polttoainekapselin palauttamisen ja uudelleen sijoittamisen arvioitiin demonstraatiovaiheen (ks. kohta 7.1.2) jälkeen aiheuttavan 25 vuoden viivästymän loppusijoitusprojektiin (Söderberg 2000).

Tutkimus- ja kehitystyön kustannusten arvioiminen on yleisempää, mutta näiden kustannusten kohdistaminen suoranaisesti palautettavuudelle vaihtelee. Osa tutkimusprojekteista on suunnattu loppusijoituksen turvallisuuden arviointiin, mutta niistä on hyötyä myös palautettavuuden kannalta. Tällaisia ovat esimerkiksi monitorointiin liittyvät koeket, joilla suoranaisesti on merkitystä ydinmateriaalivalvonnan kannalta, mutta tutkimustuloksia voidaan hyödyntää myös palautettavuutta pohdittaessa. Tutkimus- ja kehitystyön kustannuksia ohjataan myös suoraan palautettavuudelle. Esimerkiksi Äspön kalliolaboratoriossa tehtävät bentoniitin poistamiseen liittyvät tutkimukset ovat palautettavuuteen suoraan liittyvää tutkimustyötä.

7. Arvioituja kustannuksia

Käytetyn ydinpolttoaineen palauttamisen syistä, seurauksista ja vaikutuksista loppusijoitus suunnitelmiin on kerrottu edellä. Kaikkeen toteutettavuuden suunnitteluun kuuluu myös olennaiselta osin kustannusten arviointi. Palautettavuuden kustannuksille onkin pyritty esittämään erilaisia arvioita, ja joissain maissa on tehty myös tarkempia laskelmia, joita tässä luvussa esitetään.

7.1 Palauttamisen kustannus KBS-3-konseptin maissa

KBS-3-konseptin maiksi tässä yhteydessä lasketaan Suomi ja Ruotsi.

7.1.1 Suomi

Suomessa palautettavuuden kustannukset on arvioitu suuntaa antavasti Posiva Oy:n työraportissa (Saanio & Raiko 1999).

Palauttaminen ennen sijoitusreiän sulkemista ei aiheuta merkittäviä lisäkustannuksia.

Yhteen loppusijoitustunneliin sijoitettujen kapselien palauttaminen sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen tulisi maksamaan arviolta 850 000 euroa (5 miljoonaa markkaa). Yhdessä sijoitustunnelissa on sijoitusreiän paikkoja 24 (Riekkola et al. 1999). Tällöin palauttamisen kapselikohtainen kustannus olisi noin 35 400 euroa.

Kaikkien tilojen sulkemisen jälkeen palauttamisen kustannukset nousevat huomattavasti, ja niiden on arvioitu olevan $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{2}$ loppusijoitustilojen rakentamis-, käyttö ja sulkemiskustannuksista (Saanio & Raiko 1999).

Mitään muutoksia palautettavuuden edistämiseksi ei vuonna 1999 annetun, tilojen avattavuutta vaativan päätöksen (VN 478/99) jälkeen ole loppusijoitus suunnitelmaan tehty, joten palauttamisvaatimuksen ei voida katsoa aiheuttavan mitään lisäkustannuksia. Palautettavuus ei edellytä tilojen sulkemisen jälkeistä monitorointia. Mikäli sulkemisen jälkeistä monitorointia toteutetaan, kyseessä ei ole turvallisuuden valvonta eikä mahdolliseen palauttamispäätökseen liittyvä monitorointi. Posiva Oy seuraa palautettavuuden tekniikkaan liittyvää tutkimustyötä ja aikoo päivittää palauttamisoperaation teknisen kuvauksen ennen tilojen rakentamiseen liittyvää luvanhakuprosessia.

7.1.2 Ruotsi

Ruotsissa loppusijoitus toteutetaan kaksivaiheisena. Loppusijoitustilatkin rakennetaan kahdessa vaiheessa. Ensin louhitaan kuilut, yleiset tilat ja osa sijoitustunneleista, joihin louhitaan sijoitusreiät. Tämän jälkeen loppusijoitustilojen käyttöä demonstroidaan sijoittamalla n. 400 polttoainekapselia ja sulkemalla täyttyneet sijoitustunnelit ja ne osat yhdystunneleista, joita ei demonstraatiovaiheen jälkeen ole suunniteltu käytettäväksi (Grupa et al. 2000). Saatuja käyttökokemuksia arvioidaan ja loppusijoituksen jatkamisesta tehdään erillinen päätös.

Ruotsissakaan ei ole tehty erityisiä toimenpiteitä palautettavuuden lisäämiseksi. Ruotsissa vaaditaan kuitenkin esitettäväksi palauttamiseen vaadittava tekniikka ja ensimmäisen vaiheen jälkeisen palauttamisen taloudelliset vaikutukset.

Palauttamisen tekniikkaan liittyviin, Äspön kalliolaboratoriossa tehtäviin bentoniitin poistokokeisiin on arvioitu menevän 20 miljoonaa SEK (Grupa et al. 2000) eli noin 2,1 miljoonaa euroa.

Loppusijoituksen ensimmäisen vaiheen jälkeen polttoainekapselit voidaan päättää palauttaa, mikäli havaitaan loppusijoituksen toimivan riittämättömällä tavalla. Tämän, suunnitelmaan kuuluvan, mahdollisen palauttamisen kustannukset on arvioitu lähteessä Söderberg (2000). Arvioituihin kustannuksiin kuuluvat demonstraatiovaiheessa sijoitettujen kapselien palauttaminen ja väliaikaisvarastointi. Lisäksi mukana on yksityiskohtainen karakterisointi ja rakentamiskustannukset loppusijoitustiloille vaihtoehtoiseen paikkaan. Arvioidut kustannukset ovat 10 700 miljoonaa SEK eli 1 140 miljoonaa euroa. Kustannus kullekin kapselille on siis noin 2,9 miljoonaa euroa. Kapselikohtaiset kustannukset tilojen sulkemisen jälkeen ovat suuremmat kuin Suomen vastaava arvio, koska mukana ovat uusien loppusijoitustilojen suunnittelun ja rakentamisen sekä palautettujen kapselien väliaikaisvarastoinnin kustannukset.

7.2 Pidentetyn aukioloajan ylläpitokustannukset

Loppusijoitustilojen avoimena pitäminen palautettavuuden edistämiseksi aiheuttaa vuosittaisia ylläpito- yms. kustannuksia, joita on esitelty tarkemmin luvussa 6. Seuraavassa on suuntaa antava esimerkki Hollannin tilanteesta.

Hollannissa loppusijoituksen luvallisuudesta päätettiin 1993. Edellytyksenä oli jätteiden pysyminen palautettavina pitkällä aikavälillä. Pian tämän jälkeen valtio aloitti tutkimusprojekin palautettavasta ydinjätteen loppusijoituksesta. Projektin koordinoi CORA (The

Comission for Radioactive Waste Disposal). Tutkimusprojekti toteutettiin vuosina 1996–2000, ja projektin kustannukset olivat 3,5 miljoonaa euroa.

Projektin tutkimuskohteena olivat erilaiset loppusijoituskonseptit ja niiden palautettavuutta edistävät seikat. Vaihtoehtoista keskityttiin loppusijoitustiloihin suolassa ja savessa. Lisäksi tutkittiin maanpäällisen väliaikaisvarastoinnin aikajakson pidentämistä sadasta vuodesta 300 vuoteen. Loppusijoituskonsepteille laskettiin kustannusarviot ja arvioitiin vuotuiset kustannukset loppusijoitustilan pitämisestä avoimena. Tutkimusprojektista ja loppusijoituskonsepteista on enemmän viitteessä TNO-NITG (2001).

Maanalaisen loppusijoitustilan pitämisestä avoimena mahdollista polttoaineen palauttamista varten laskettiin aiheutuvan 1,8 miljoonan euron vuotuiset kustannukset. Näissä kustannuksissa ovat mukana ylläpidon, hallinnon ja tarkastusten kustannukset (TNO-NITG 2001). Hollannissa loppusijoitustiloja pyritään pitämään avoimena vähintään 25 vuotta (Grupa et al. 2000). Tällöin kustannukset palautettavuuden mahdollistamisesta olisivat noin 45 miljoonaa euroa. Nämä kustannukset eivät sisällä varsinaista polttoaineen palauttamista, ainoastaan loppusijoitustilojen palautettavuutta edistävän avoimena pitämisen.

Avoimena pitämisellä Hollannin konseptissa tarkoitetaan kuilujen ja tunnelien pitämistä avoimena. Kapselit on sijoitettu vaakasuorassa sijoitusreikiin, jotka on tiivistetty hienorakenteisella, murskatulla suolalla ja suljettu suolakivilohkoilla tai vastaavasti savirakaisissa savella ja bentoniitilla. Kapseleiden palauttaminen on toteutettavissa, ja tunnelien ollessa auki eivät varsinaiset palauttamisen kustannukset nouse kohtuuttomiksi.

7.3 Tutkimuksen ja tuotekehityksen kustannuksia

Monissa maissa palautettavuuden kuulumisesta valittuun loppusijoituskonseptiin ei ole vielä päätetty tai loppusijoituskonseptia, sijoituspaikkaa tms. juurikaan ole vielä valittu. Tällaisissa maissa ei varsinaisen palauttamisen kustannuksia ole arvioitu, vaan lähinnä määritellään palauttamisen tämänhetkisiä taloudellisia vaikutuksia eli niitä kuluja, jotka aiheutuvat tutkimus- ja kehitystyöstä palautettavuuden edistämiseksi. Radioaktiivisen jätteen palauttamisen tai tilojen pidennetyin aukioloajan kustannukset eivät ole vielä arvioitavissa, koska lopullisia päätöksiä ei ole tehty.

Seuraavassa on muutamia esimerkkejä kustannusnäkemyksistä eri valtioissa. Lähinnä kyseessä ovat sanalliset pohdinnat palautettavuuden tutkimuksen aiheuttamista kustannuksista. Loppusijoituksen suunnittelusta toteuttamisesta voi lukea lisää viitteistä Grupa et al. (2000) ja Witherspoon & Bodvarsson (2001).

Belgian loppusijoituskonseptissa (KASAM 2001) käytetty polttoaine ja korkea-aktiivinen jäte pakataan ruostumattomasta teräksestä valmistettuihin säiliöihin 230 metrin syvyyteen saviesiintymään. Sijoitustunneleiden seinissä sijaitsevat vaaka-asentoiset sijoitusreiät täytetään bentoniitin, hiekan ja grafiitin sekoituksella. Jätepakkausten elinikä on todettu pitkäksi. Palautettavuutta voidaan ratkaisussa edistää käyttämällä helposti poistettavia täyttömateriaaleja, jolloin palauttaminen on työlästä mutta kuitenkin toteutettavissa. Toinen vaihtoehto on tilojen ja kuilujen sulkemisen viivyttäminen.

Palautettavuus käyttövaiheessa ei merkittävästi lisää kustannuksia. Käyttövaiheen jälkeen palautettavuuden ylläpidon (tiedon säilyttämisen suljetusta loppusijoitustilasta) kustannusten todetaan olevan marginaaliset loppusijoituskustannuksiin nähden. Mikäli tilojen sulkemista viivytetään yli vuosisadalla, kustannukset nousevat merkittävästi (maanalaisen tilojen ylläpito, tunnelien seinämien kasvava lujitustarve). Näistä kustannuksista ei ole tällä hetkellä tietoa saatavilla (Grupa et al. 2000).

Ranskassa todetaan palautettavuuden kustannusten liittyvän palautettavuuden määrittelyyn ja määrittelyn palautettavuuden mahdollistamiseen. Käyttövaiheessa kaikki jätteet ovat palautettavissa ja sijoitustunnelin suulle asetetaan käyttövaiheessa tilapäinen sulkku. Pysyvän sulun ja tunnelien täyttämisen jälkeen palauttaminen perinteisillä kaivaustekniikoilla on mahdollista useiden vuosikymmenien ajan, kunnes tunnelien lujuusominaisuudet ovat huonontuneet ja tarvitaan suuria vahvistustöitä.

Kustannusten katsotaan jakautuvan palauttamista edistäviin investointeihin, potentiaaliin palauttamiseen ja monitorointiin. Varsinaisia päätöksiä ei ole tehty, joten rahallisia arvioita ei ole tarjolla. Tutkimuksia palautettavuuden osalta jatketaan (Grupa et al. 2000).

Espanjassa palautettavuuden kustannusten todetaan koostuvan erilaisista tutkimuksen ja kehityksen kuluista. Tutkimusta tarvitaan kaikilla palautettavuuteen liittyvillä osaluilla, mm. tarvittavien loppusijoituskonseptin muutosten määrittelyssä, palauttamisen tekniikoissa ja pitkäaikaisturvallisuuden arvioinnissa, kun palautettavuus on suunnitelmissa mukana (Grupa et al. 2000).

Isossa-Britanniassa, mikäli siellä päädytään tilojen aukioloajan pidentämiseen, vaikutukset pääoman käyttöön aukioloajan kasvaessa pidemmäksi kuin 100 vuotta saattavat olla merkittäviä. Tutkimus- ja kehityskuluja on tullut jätesäiliöiden korroosiotutkimuksesta, tunnelitäytteiden poistosta ja yleisesti palautettavuuden liittämistä loppusijoituskonseptiin.

NIREXin (ydinjätehuolto-yhtiö Isossa-Britanniassa) konseptissa kyseessä ovat ILW (keskiaktiivinen jäte) ja LLW (vähäaktiivinen jäte), jotka sijoitetaan holveihin laatikois-

sa tai sylinterimäisissä säiliöissä. Holvi täytetään, kun kaikki ko. holviin mahtuva jäte on sijoitettu. Tämä ajanjakso kestää noin kolme vuotta ja holviin mahtuu n. 7 000 jätesylinteriä. Isossa-Britanniassa on arvioitu yhden ylimääräisen holvin kaivamisesta aiheutuvien kulujen olevan noin 50 miljoonaa puntaa. Tämä tilanne voitaisiin olettaa, mikäli jossain holvissa on tehtävä parannustöitä ja sijoitetut jätteet tulee siirtää muualle töiden ajaksi. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää myös maanpäällistä väliaikaisvarastointia (Grupa et al. 2000).

8. Johtopäätökset

Loppusijoitetun ydinpolttoaineen palauttaminen maan pinnalle on teknisesti toteutettavissa loppusijoitustilojen käyttövaiheessa ja tilojen sulkemisen jälkeen. Teknisesti palauttaminen on mahdollista hyvin pitkälle tulevaisuuteen, mutta käytännössä tämän aikajakson pituutta saattavat rajoittaa tiedon säilyvyyteen liittyvät kysymykset. Mahdollisuus palauttamiseen ei Suomessa aiheuta lisäkustannuksia, koska loppusijoitussuunnitelmaan ei ole tehty palautettavuutta lisääviä muutoksia. Tutkimustyötä, joka tukee myös palautettavuutta, tehdään kuitenkin koko ajan, ja samalla seurataan kansainvälistä kehitystä tällä alueella.

Polttoaineen palauttamista pidetään äärimmäisen epätodennäköisenä vaihtoehtona, mutta viranomaismääräykset Suomessa edellyttävät loppusijoitustilojen olevan avattavissa, mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen tarkoituksenmukaiseksi. Tämä tilojen avattavuus on mukana suunnitelmissa vain mahdollisuutena, joka tulevaisuudessa antaa tilaisuuden harkita ydinpolttoaineen loppusijoitusta uudelleen. Loppusijoitus on turvallisuusanalyseissä osoitettu turvalliseksi, mutta poliittisesti ei ole haluttu tehdä peruuttamatonta päätöstä ja jatkuvalla tekniikan kehittymiselle on haluttu antaa mahdollisuus. Kehittyvän tekniikan oletetaan myös helpottavan palauttamista, mikäli palauttamiseen päätetään lähteä. Toisaalta palautettavuuden helpottuminen voisi heikentää pitkäaikais-turvallisuutta.

Polttoaineen palauttamiselle ei Suomessa eikä ulkomailla ole juuri laskettu tarkkoja kustannusarvioita. Loppusijoitustilojen käyttövaiheen aikainen palauttamisen kustannus yksittäiselle kapselille sekä täytetylle ja suljetulle sijoitustunnelille on arvioitu (kohta 7.1.1), mutta tilojen sulkemisen jälkeiselle palauttamisen kustannukselle on annettu vain karkea prosentuaalinen osuus itse loppusijoituksen kustannuksista.

On toisaalta varsin ymmärrettävää, ettei tilojen sulkemisen jälkeistä palautettavuutta ole kustannuksien osalta tarkemmin arvioitu. Tulevaisuudessa epätodennäköisesti tapahtuvaa palauttamista on hankala arvioida, kun ei tiedetä aikaa tai syytä palauttamiselle. Palauttaminen voidaan todeta mahdolliseksi, sillä mikäli palauttaminen on teknisesti toteutettavissa nykytekniikalla, on selvää, että toteutettavuus paranee tekniikan kehittymisen myötä. Kustannusten osalta tilanne ei ole näin yksinkertainen. Kehittyvä tekniikka varmastikin helpottaa ja nopeuttaa palauttamisprojektia ja siten laskee kustannuksia. Palauttaminen vaatii kuitenkin kokonaisvaltaista osaamista koko loppusijoitusprosessista, sillä työmenetelmien kehittymisestä ei välttämättä ole juurikaan hyötyä, mikäli esimerkiksi loppusijoitustilojen lämpötila on palauttamishetkellä niin korkea, ettei uusia menetelmiä voida käyttää.

Tilojen sulkemisen jälkeisten kustannusten maksaja on Suomessa todennäköisesti valtio tai jokin polttoaineen palauttamisesta taloudellisesti hyötyvä taho. Näin ollen tarkkojen kustannusarvioiden tekeminen ei tunnu mielekkäältä, kun ei oikeastaan ole selvyyttä siitä, kenelle kustannusarviot tehdään. Vastaava tilanne on havaittavissa muuallakin maailmassa. Ydinvoimayhtiöt, jotka ovat taloudellisesti vastuussa jätteen käsittelyn kustannuksista, laskevat arvioita tilojen käyttövaiheen aikaiselle palauttamiselle, mutta tilojen sulkemisen jälkeen tämä kustannusvastuu päättyy ja siirtyy valtiolle.

Palautettavuuden kannalta tulevaisuudessa ratkaistavia kysymyksiä ovat tiedon säilyttämisen liittyvät seikat. Palauttaminen on tuskin mahdollista, jos kukaan ei muista tai osaa lukea dokumenteista, minne ja miten ydinpolttoaine on haudattu. On ratkaistava, merkitäänkö loppusijoituspaikka ja jos merkitään, niin mikä on paras tapa. Myös tilojen sulkemisen jälkeinen ydinmateriaalivalvonta tulee toteuttaa asianmukaisesti, jotta vältetään ydinmateriaalin asiattomilta palauttamisyrityksiltä.

Suomessa on juuri tehty periaatepäätös viidennen ydinreaktorin rakentamisesta. Tulevaisuuden energiapoliittiset ratkaisut ja mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen vaikuttavat luonnollisesti loppusijoitettavan käytetyn ydinpolttoaineen määrään. Loppusijoitustilojen käyttövaihe on suunniteltu alkavaksi vuonna 2020, ja mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen pidentäisi suunniteltua käyttövaihetta. Käyttövaiheen piteneemisellä ei ole sinänsä vaikutusta palautettavuuteen, mutta tilojen sulkemisen jälkeisen palautettavuuden tarkemmalle arvioinnille sekä teknisen toteutettavuuden että kustannusten kannalta on enemmän aikaa.

Lähdeluettelo

Ahonen, L., Luukkonen, A., Pitkänen, P., Rasilainen, K. & Ruskeeniemi, T. 2002. Jääkaudet ja ydinjätteen loppusijoitus. Geologian Tutkimuskeskus, Ydinjätteiden sijoitus-tutkimukset. Tiedonanto YST-110. 45 s. ISBN 951-690-824-1.

Anttila, M. 1998. Radiation protection calculations for an encapsulation plant. Työraportti 98-81. Posiva Oy, Helsinki. 36 s.

Anttila, M. 2002. Muistio 18.4.2002. VTT Prosessit, Espoo.

Biurrun, E., Engelmann, H.-J., Brennecke, P. & Kranz H. 1999. Safety and safeguards Aspects on Retrievability: A German Study. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi, 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289.

Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187c.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Blomqvist, R., Ruskeeniemi, T., Kaija, J., Ahonen, L., Paananen, M., Smellie, J., Grundfelt, B., Pedersen, K., Bruno, J., Pérez del Villar, L., Cera, E., Rasilainen, K., Pitkänen, P., Suksi, J., Casanova, J., Read, D. & Frape, S. 2000. The Palmottu natural analogue project – Phase II: Transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu. Luxembourg: European Commission. 192 s. (Nuclear Science and Technology Series EUR 19611 EN.)

De Preter, P. 2000. Retrievability in the Belgian Concept in Clay. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi, 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187a.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Enarsson, Å., Landgren, A., Liljenzin, J.-O., Skålberg, M. & Spjuth, L. 1998. Partitioning and transmutation (P&T) 1997. Status report. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), May 1998, Technical Report TR-98-14.

González, A. J. 2000. Opening Address. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa:

<http://www.sou.gov.se/kasam/1187a.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Grupa, J. B., Dodd, D. H., Hoorelbeke, J.-M., Mouroux, B., Potier, J. M., Ziegenhagen, J., Santiago, J. L., Alonso, J., Fernández, J. J., Zuidema, P., Crossland, I. G., McKirdy, B., Vrijen, J., Vira, J., Volckaert, G., Papp, T. & Svemar, C. 2000. Concerted Action on the Retrievability of Long-lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories. European Commission Project Report EUR 19145 EN. 290 s. ISBN 92-828-9466-5.

Haaramo, M. 1999. Sijoitustunnelien sulkurakenteiden rakennesuunnittelu. Työraportti 99-71. Posiva Oy, Helsinki.

Hielt, A. 2000. Report from the UK Consensus Conference on Radioactive Waste Management, May 1999. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdod-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187a.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Johansson, E. & Rautakorpi, J. 2000. Rock mechanics stability at Olkiluoto, Hästholmen, Kivetty and Romuvaara. Raportti 2000-02. Posiva Oy, Helsinki. 101 s. ISBN 951-652-088-X.

Kalbantner, P. & Sjöblom, R. 2000. Techniques for freeing deposited canisters. Final report. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) June 2000, Technical Report TR-00-15.

Karland, O. 1998. Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation of model calculations to experimentally determined data. Raportti 98-01. Posiva Oy, Helsinki. 34 s. ISBN 951-652-039-1.

KASAM 2001. Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001. Rapport av Statens råd för kärnavfallsfrågor, Stockholm 2001. Statens offentliga utredningar, SOU 2001:35. Tryckt av Graphium/Norstedts AB, Stocholm 2001. 371 s. ISBN 91-38-21446-6.

Kirkkomäki, T. 1999. Loppusijoitustunnelien täyttötekniikka. Työraportti 99-75. Posiva Oy, Helsinki.

KOMMENTUS 1999. Ansvar, rättvisa och trovärdighet – etiska dilemman kring kärnavfall. KOMMENTUS förlag 117 99 Stockholm. Skriften är utgiven på initiativ av ”Nationelle samordnaren på kärnavfallsområdet”. Fingraf Tryckeri, Södertälje 1999. ISBN 91-7345-080-4.

KTM 1995. Pitkääikäisten radioaktiivisten jätteiden geologisen loppusijoituksen ympäristönsuojelulliset ja eettiset perusteet. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 133/1995. Julkaisu on käännös 1995 ilmestyneestä OECD/ NEA:n ydinjätekomitean julkaisusta The Environmental Basis of Geological Disposal. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto.

KTM 1998. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Valtion ydinjätehuoltorahasto, esite 1998. Kauppa ja Teollisuusministeriön julkaisu 1998. Oddball Graphics, helmikuu 1998.

KTM 2002. Kauppa- ja teollisuusministeriön tiedote 1.3.2002. Ydinjätehuoltorahaston tilinpäätös vahvistettu. [verkkodokumentti, viitattu 19.8.2002].
Saatavissa <http://www.ktm.fi/ajankohtaista/index.html>

Kukkola, T. 1999a. Loppusijoituslaitoksen maanpäällisten osien kuvaus. Työraportti 99-30. Posiva Oy, Helsinki.

Kukkola, T. 1999b. Kapselointilaitoksen ja -prosessin kuvaus. Työraportti 99-29. Posiva Oy, Helsinki.

Kukkola, T. 1999c. Loppusijoitustilan järjestelmät. Työraportti 99-67. Posiva Oy, Helsinki.

Kukkola, T. 1999d. Loppusijoitustilan normaalikäytön, käyttöhäiriöiden ja onnettomuustilanteiden määrittäminen päästö- ja annoslaskentaa varten. Työraportti 99-17. Posiva Oy, Helsinki.

Kukkola, T. 2000. Loppusijoitustilojen käyttövaiheen kuvaus. Työraportti 2000-04. Posiva Oy, Helsinki.

LaPointe, P. R. & Cladouhos T. 1999. An overview of a possible approach to calculate rock movements due to earthquakes at Finnish nuclear waste repository sites. Raportti 99-02. Posiva Oy, Helsinki. 27 s. ISBN 951-652-057-X.

Litmanen, T., Hokkanen, P. & Kojo, M. (toim.). 1999. Ydinjäte käsissämme. Suomen ydinjätehuolto ja suomalainen yhteiskunta. SoPhi 44. Jyväskylän yliopisto, yhteiskuntatieteiden ja filosofian laitos. Jyväskylän yliopistopaino, Jyväskylä 1999. 303 s. ISBN 951-39-0422-9.

NEA 1993. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development. The cost of High-level Waste Disposal in Geological Repositories, An Analysis of Factors Affecting Cost Estimates. ISBN 92-64-13913-3.

NEA 2000. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. På väg mot geologisk slutförvaring av radioaktivt avfall: Var står vi idag? En internationell bedömning. Originalet publicerat av OECD på engelska under titeln: Progress Towards Geologic Disposal: Where Do We Stand 1999. Elanders Gotab AB, Stockholm 2000. ISBN 91-7345-094-4.

NEA 2001. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. Radioactive waste management committee. Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Radioactive Waste. Reflections at the International level. ISBN 92-64-18471-6.

Papp, T. 1999. Stepwise Decision Making and Options for Retrieval in the Swedish KBS-3 Concept. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi, 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa:
<http://www.sou.gov.se/kasam/1187a.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Posiva Oy, 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitos. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Posiva Oy, Helsinki. 232 s.

Posiva Oy, muistio, 6.5.2002. Loppusijoituslaitoksen kuvaus. TS-M-11/02. 70 s.

Posiva Oy, websivu. www.posiva.fi

Raiko, H. & Salo, J.-P. 1999. Design report of the disposal canister for twelve fuel assemblies. Raportti 99-18. Posiva Oy, Helsinki. 64 s. ISBN 951-652-073-1.

Raiko, H. 2001. Loppusijoitustilan lämpötilat. Työraportti 2001-44. Posiva Oy, Helsinki.

Rasilainen, K. & Vuori, S. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Suomalaisen suunnitelman pääpiirteet. Espoo: VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1953. 50 s. + liitt. 7 s. ISBN 951-38-5423-X.

Rasilainen, K. (toim.). 2002. Nuclear Waste Management in Finland. Final Report of Public Sector's Research Programme JYT2001 (1997–2001). Ministry of Trade and Industry Finland, Studies and Reports 15/2002. 258 s. ISBN 951-739-672-4.

Rasilainen, K., Suolanen, V. & Vuori, S. 2001. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuusanalyysissä laskettujen säteilyvaikutusten havainnollistaminen. Espoo: VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2080. 58 s. + liitt. 5 s. ISBN 951-38-5793-X; 951-38-5794-8.

Rautjärvi, J., Tiitta, A. & Saarinen J. 2002. Preliminary concept for safeguarding spent fuel encapsulation plant in Olkiluoto, Finland. Phase III report on Task FIN A 1184 of the Finnish support program to IAEA Safeguards. Säteilyturvakeskus STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority. STUK-YTO-TR 187/June 2002.

Richardson, P. J. 1999a. Development of Retrievability Plans. by PJ Richardson BSc CGeol FGS, Geosciences for Development and the Environment. March 1999. Prepared for Dr Olof Söderberg, Swedish National Co-ordinator for Nuclear Waste disposal (M 1996:C). Saatavilla: <http://www.radgiv-karnavf.gov.se/publikat/rappfweb.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 16.7. 2002]

Richardson, P. J. 1999b. Retrievability: An International Overview. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi, 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187a.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Riekkola, R., Saanio, T., Autio, J., Raiko, H. & Kukkola, T. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustilojen kuvaus. Työraportti 99-46. Posiva Oy, Helsinki.

Riekkola, R., Saanio, T., Kukkola, T. & Raiko, H. 2000. Loppusijoitustilojen esisuunnitelma, yhteenvetoraportti. Työraportti 2000-10. Posiva Oy, Helsinki.

Rossi, J., Raiko, H., Suolanen, V. & Ilvonen, M. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen normaalikäytön, käyttöhäiriöiden ja onnettomuustilanteiden aiheuttamien säteilyvaikutusten arviointi. Raportti 99-16. Posiva Oy, Helsinki. 85 s. ISBN 951-652-071-5.

Saanio, T. & Kokko, M. 2000. Loppusijoitustilojen rakentaminen ja sulkeminen. Työraportti 2000-07. Posiva Oy, Helsinki.

Saanio, T. & Raiko, H. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskapselien palautettavuus. Työraportti 99-21. Posiva Oy, Helsinki.

SKB 2001. RD&D-Programme 2001. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. September 2001. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Technical Report TR-01-30.

Suolonen, V., Lautkaski, R. & Rossi, J. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen kuljetusten terveystarkkailun arviointi. Raportti 99-17. Posiva Oy, Helsinki. 139 s. ISBN 951-652-072-3.

Söderberg, O. 2000. Cost-related Implications of Retrieval: Who Should Pay? Who Should Assess the Cost/Benefit? Teoksessa: IAEA, International Atomic Energy Agency. 2000. Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. IAEA-Tecdoc-1187. Session 4, Long term monitoring and cost considerations. Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187b.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 25.6.2002]

TNO-NITG 2001. Retrievable disposal of radioactive waste in the Netherlands. TNO-NITG-Information, December 2001. Saatavilla www.nitg.tno.nl/eng/pubrels/information/nr8art4.pdf [Verkkodokumentti, viitattu 19.7.2002]

VN 478/99. Valtioneuvoston päätös käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuudesta (478/99) 25.3.1999. Saatavissa Säteilyturvakeskuksen määräyskokoelmasta [verkkodokumentti, viitattu 1.7.2002] <http://www.stuk.fi/saannosto/19990478.html>

Vieno, T. & Nordman, H. 1999. Safety assesment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99. Työraportti 99-07. Posiva Oy, Helsinki.

Witherspoon, P. A. & Bodvarsson, G. S. (eds). 2001. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ernest Orlando Lawrence, Berkeley National Laboratory, University of California, U.S.A. Prepared for the United States Department of Energy under Contract No. DE-AC03-76SF00098. LBLN-49767.

Young, R. P. 1999. Acoustic Remote Monitoring of Rock and Concrete Structures for Nuclear Waste Repositories. Teoksessa: Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Saltsjöbaden, Ruotsi 24.10.–27.10.1999. IAEA-Tecdoc-1187. Joulukuu 2000. ISSN 1011-4289. Saatavissa: <http://www.sou.gov.se/kasam/1187b.pdf> [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2002]

Äspö 2000. Äspö Hard Rock Laboratory, Annual Report 2000. Svensk Kärnbränslehantering AB, June 2001. SKB, Technical Report TR-01-10.

Julkaisija



Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
Puh. (09) 4561
Faksi (09) 456 4374

Julkaisun sarja, numero ja
raporttikoodi

VTT Tiedotteita 2187
VTT-TIED-2187

Tekijä(t) Siltanen, Satu			
Nimeke Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuudesta Kirjallisuusselvitys			
Tiivistelmä Kirjallisuustutkimukseen on koottu käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuuden tekniisiä ja kustannusnäkökohtia. Suomalainen käytetyn polttoaineen loppusijoitussuunnitelma sisältää palautettavuutta edistäviä piirteitä, kuten loppusijoituksen vaiheittaisen etenemisen, kuparikapselien hyvän korroosionkeston ja graniittiin louhittavien loppusijoitustunnelien pitkäikäisyyden. Mahdollisia teknisiä ja poliittisia motiiveja käytetyn polttoaineen palauttamiseen kerättiin kirjallisuudesta. Toimintaa mahdollisen palauttamisen jälkeen tarkastellaan polttoainekapselien kuljetusten, avaamisen ja väliavarastoinnin osalta. Palauttaminen on mahdollista loppusijoituksen elinkaaren kaikissa vaiheissa, ja palauttamisen tekninen toteutus esitetään ennen sijoitusreiän sulkemista, sijoitustunnelin sulkemisen jälkeen ja kaikkien tilojen sulkemisen jälkeen. Kallioperän olosuhteita, polttoainekapselien lämmöntuottoa, säteilyä ja bentoniitin ominaisuuksia tarkastellaan palautettavuuden kannalta. Ydinmateriaalivalvonnan, monitoroinnin ja tiedon säilyttämisen kysymyksiin otetaan kantaa palautettavuuden yhteydessä. Erilaisia tapoja kustannusten ilmaisemiseen ovat rahamäärä, prosenttiosuus koko loppusijoituksen kustannuksesta ja viivästymä loppusijoituksen suunnitellusta aikataulusta. Laskettuja kustannuksia koottiin Suomen mallin mukaiselle välittömästi suljettavalle loppusijoitustilalle ja vertailuna eräissä Euroopan maissa suunnitellulle, pidennetyn aukiolon tapaukselle. Suomessa kustannuksia on arvioitu melko karkeasti, mutta Suomen kannalta kiinnostava on Ruotsissa laskettu kustannusesimerkki 400:n loppusijoituskapselin palauttamisesta sijoitustunnelien sulkemisen jälkeen. Palautettavuuden kustannuksista löydettiin vain muutama tarkempi laskelma, koska palauttaminen on varsin epätodennäköistä ja ajoittuu toteutuessaan pitkälle tulevaisuuteen.			
Avainsanat nuclear wastes, spent fuel, retrievability, costs, feasibility, final disposal canisters, reopening, tunnels, temperature, radiation			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Otakaari 3 A, PL 1608, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6122-8 (nid.) 951-38-6123-6 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero C2SU00048	
Julkaisuaika Helmikuu 2003	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 72 s.	Hinta B
Projektin nimi Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma (KYT); ydinjätehuollon teknistieteelliset perusteet (TEPE)		Toimeksiantaja(t) Kauppa- ja teollisuusministeriö KTM	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404, Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2187
VTT-TIED-2187

Author(s) Siltanen, Satu			
Title Technical and economic aspects of retrievability in spent nuclear fuel disposal A literature survey			
Abstract The literature research collects cost and feasibility aspects of retrievability of spent nuclear fuel disposal. The Finnish plan for the final disposal of spent nuclear fuel includes some features favouring retrievability, like modularity of disposal plan, good corrosion resistance of copper canisters and long estimated lifetime of disposal shafts and tunnels. Possible political and technical arguments for retrievability are collected and the possible actions taken after retrieving (opening of copper canisters, transportations and interim storage) are looked into. In the Finnish disposal plan retrieving is possible in each stage of repository development. Technical feasibility of retrieving is presented before sealing of a disposal hole, after filling and sealing of a disposal tunnel and after final closure of the repository. Many features of the disposal concept (hydrogeological conditions, radioactive radiation and heat generation of the spent fuel, and properties of bentonite) affect the feasibility and cost of retrieving. Questions dealing with nuclear material safeguards, monitoring and continuity of knowledge should be taken into account when retrievability is being considered. Different ways used for expressing the cost of retrieving, are currency unit, delay of the scheduled disposal project and percentages of the actual disposal cost. Estimated costs for two different cases of retrievability, immediate closure and postponed closure of repository, are presented. Cost estimates, made in Finland, are quite rough, but the Swedish cost calculation example of immediate closure case is interesting because of similarity of Finnish and Swedish disposal concepts. There are also examples of cost, based on research and development work enhancing retrievability. It is noticed that there are only few exact cost estimations relating to retrievability. The reasons might be the improbability of actual retrieving and the fact that retrieving, if materialised, will take place far in the future.			
Keywords nuclear wastes, spent fuel, retrievability, costs, feasibility, final disposal canisters, reopening, tunnels, temperature, radiation			
Activity unit VTT Processes, Otakaari 3 A, P.O.Box 1608, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6122-8 (soft back ed.) 951-38-6123-6 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)			Project number C2SU00048
Date February 2003	Language Finnish, Engl. abstract	Pages 72 p.	Price B
Name of project Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma (KYT); ydinjätehuollon teknistieteelliset perusteet (TEPE)		Commissioned by Ministry of Trade and Industry KTM	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Ydinjätteiden loppusijoitus kallioperään ajatellaan nimensä mukaisesti kertakaikkiseksi ydinjätehuollon ratkaisuksi. Valtioneuvoston päätöksessä käytetyn ydinpolttoaineen turvallisuudesta on kuitenkin maininta loppusijoitustilojen avattavuudesta, ”mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen taroituksenmukaiseksi”.

Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellaan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuuden tekniikkaa ja mahdollisen palauttamisen kustannuksia. Julkaisussa kuvataan käytetyn polttoaineen loppusijoitusta Suomessa niiden tekijöiden osalta, jotka vaikuttavat polttoaineen palauttamisen tekniikkaan ja kustannuksiin. Mahdollisia kirjallisuudessa esitettyjä syitä polttoaineen palauttamiselle ja mahdollisia toimenpiteitä palauttamisen jälkeen tarkastellaan. Kirjallisuudessa käytettyjä kustannusten esitystapoja ja laskettuja kustannuksia käydään läpi.

Käytetyn ydinpolttoaineen palauttaminen maan pinnalle on teknisesti toteutettavissa loppusijoituksen kaikissa vaiheissa, mutta tilojen sulkemisen jälkeen kustannukset ovat merkittävät. Kustannusten arvioinnissa ei Suomessa eikä muissakaan maissa ole vielä päästy kovinkaan yksityiskohtaiselle tasolle. Suomen kannalta kiinnostavaa on Ruotsissa tehty tutkimustyö tällä alueella, koska Suomen ja Ruotsin käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskonseptit ovat hyvin samankaltaiset.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FIN-02044 VTT, Finland
Puh. (09) 456 4404	Tel. (09) 456 4404	Phone internat. + 358 9 456 4404
Faksi (09) 456 4374	Fax (09) 456 4374	Fax + 358 9 456 4374
