

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## **KORKEA-AKTIIVISTEN YDINJÄTTEIDEN HUOLTOSUUNNITELMAT MAAILMALLA**

Global review of high-level radioactive waste management plans

Työn tarkastaja: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki

Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri Juhani Vihavainen

Lappeenrannassa 13.4.2010

Maiju Ylikauppila

# SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| SYMBOLILUETTELO .....                                       | 3  |
| 1 JOHDANTO .....  | 4  |
| 2 YDINVOIMA MAAILMALLA .....                                | 4  |
| 3 POLTTOAINEKIERTO .....                                    | 5  |
| 3.1 Uraanin hankinta .....                                  | 6  |
| 3.2 Uraanin käsittely .....                                 | 7  |
| 3.2.1 Konversio .....                                       | 7  |
| 3.2.2 Rikastus .....  | 7  |
| 3.3 Polttoaineen valmistus .....                            | 8  |
| 3.4 Polttoaineen käyttö .....                               | 9  |
| 3.5 Välivarastointi .....                                   | 9  |
| 3.6 Loppusijoitus .....                                     | 10 |
| 3.7 Jälleenkäsittely .....                                  | 11 |
| 4 YDINJÄTTEIDEN LUOKITUKSET .....                           | 12 |
| 4.1 Matala- ja keskiaktiiviset jätteet .....                | 12 |
| 4.2 Korkea-aktiiviset jätteet .....                         | 13 |
| 5 KORKEA-AKTIIVISTEN YDINJÄTTEIDEN HUOLTOSUUNNITELMAT ..... | 13 |
| 5.1 Espanja .....   | 14 |
| 5.2 Iso-Britannia .....                                     | 14 |
| 5.3 Japani .....  | 15 |
| 5.4 Kanada .....  | 17 |
| 5.5 Kiina .....   | 17 |
| 5.6 Ranska .....  | 18 |
| 5.7 Ruotsi .....  | 19 |
| 5.8 Saksa .....   | 21 |
| 5.9 Suomi .....   | 22 |
| 5.10 Sveitsi .....  | 25 |
| 5.11 Tšekin tasavalta .....                                 | 26 |
| 5.12 Venäjä .....   | 27 |
| 5.13 Yhdysvallat .....                                      | 28 |
| 5.14 Muut maat .....  | 29 |

|   |                     |    |
|---|---------------------|----|
| 6 | YHTEENVETO.....     | 31 |
|   | LÄHDELUETTELO ..... | 33 |

**SYMBOLILUETTELO**

|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| $m^3$            | kuutiometri           |
| TBq              | terabecquerel         |
| U                | uraani                |
| UO <sub>2</sub>  | uraanidioksidi        |
| UF <sub>6</sub>  | uraaniheksafluoridi   |
| <sup>235</sup> U | uraanin isotooppi 235 |
| <sup>238</sup> U | uraanin isotooppi 238 |

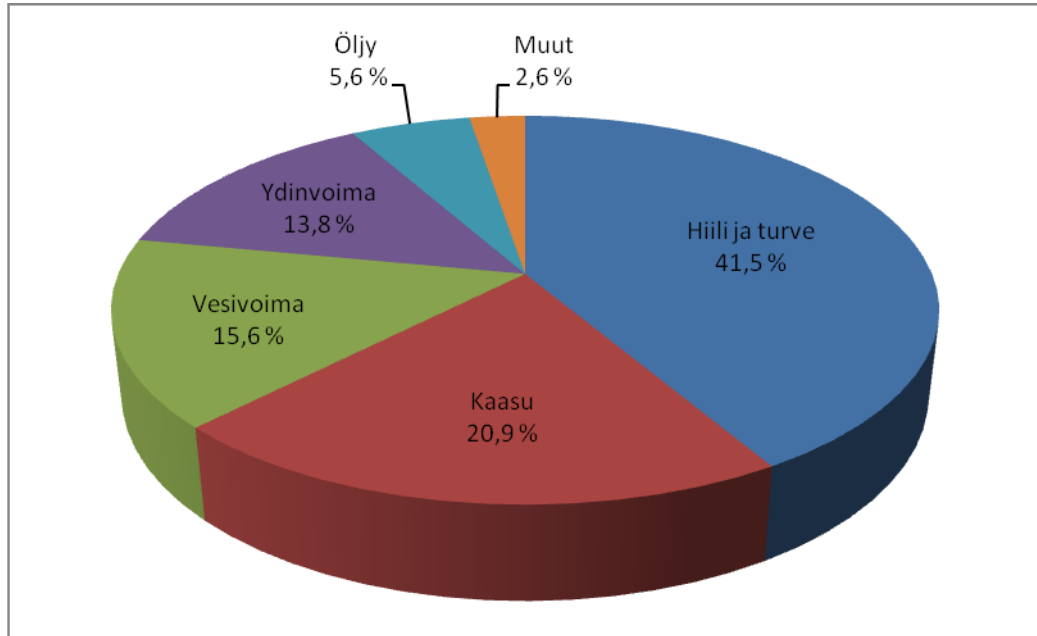
## 1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään eri maiden korkea-aktiivisten ydinjätteiden huoltosuunnitelmia. Pääpainona ovat maiden loppusijoitussuunnitelmat. Tarkoituksena on luoda yleiskuva korkea-aktiivisten jätteiden huollon nykytilasta ja suunnitelmien etenemisestä tulevaisuudessa.

## 2 YDINVOIMA MAAILMALLA

Ydinvoimalla on useita eri käyttötarkoituksia ja -mahdollisuuksia. Pääasiassa ydinvoimalla syntyvää energiaa käytetään kuitenkin sähköntuotantoon voimalaitoksissa. Lisäksi sitä käytetään muun muassa teollisuudessa, lääketieteellisiin tarkoituksiin sekä kulkuneuvojen voimanlähteenä. (WNA 2010a.)

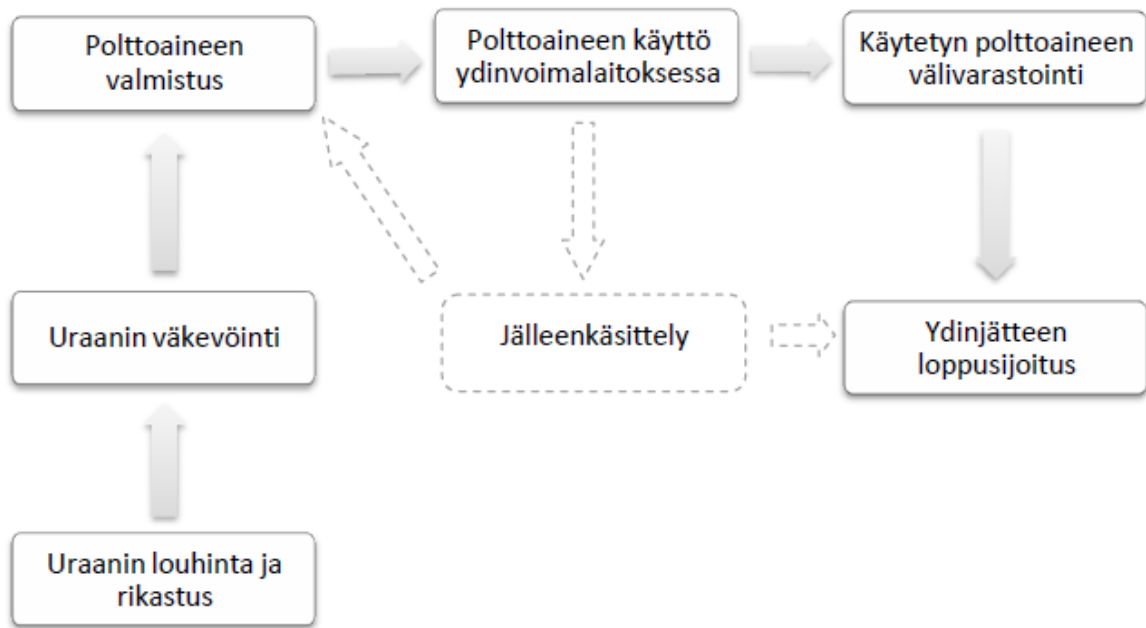
Ensimmäinen kaupallinen ydinvoimalaitos aloitti toimintansa 1950-luvulla ja nykyisin maailmalla toimii 438 reaktoria (IAEA 2010). Uusia ydinvoimalaitoksia on rakenteilla ja suunnitteilla runsaasti ympäri maailmaa. Kuvassa 1 on esitetty vuoden 2007 sähköntuotanto maailmalla polttoaineittain. Yhteensä sähköntuotanto oli 19771 terawattituntia, mistä 2719 terawattituntia, eli 13,8 %:a, tuotettiin ydinvoimalla. Ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä on kasvanut suhteessa enemmän kuin kapasiteettia on rakennettu. Tämä johtuu siitä, että ydinvoimalaitoksien käyttöä on pystytty tehostamaan huomattavasti. (WNA 2010a; IEA 2009, 16, 24.)



**Kuva 1.** Sähkön tuotanto maailmalla vuonna 2007. (IEA 2009, 24)

### 3 POLTTOAINEKIERTO

Polttoainekierrolla tarkoitetaan ydinpolttoaineen elinkaaren eri vaiheita. Polttoaineen käyttöä edeltäviä vaiheita kutsutaan usein polttoainekierron alkupääksi ja reaktorista poiston jälkeisiä vaiheita polttoainekierron loppupääksi. Polttoainekierto voidaan jaotella tyypiltään avoimeksi tai suljetuksi. Avoimessa polttoainekierrossa käytetty polttoaine loppusijoitetaan sellaisenaan. Suljetussa polttoainekierrossa taas käytetty polttoaine jälleenkäsittellään, jolloin polttoaineen uraani ja plutonium otetaan talteen ja käytetään edelleen polttoaineen valmistukseen. Kuvassa 2 on esitetty polttoainekierron vaiheet, jotka käydään tarkemmin läpi seuraavaksi. (Sandberg 2004, 78–79.)



Kuva 2. Polttoainekierto. (STUK 2009)

### 3.1 Uraanin hankinta

Uraania esiintyy kaikkialla maan kuorella. Sitä on suurimmassa osassa kivilajeista, maaperässä, joissa sekä merivedessä. Uraaniesiintymien pitoisuudet vaihtelevat huomattavasti. Uraania erotetaan vain esiintymistä, joissa sen pitoisuus on tarpeeksi korkea, jotta erottaminen on taloudellisesti kannattavaa. Uraani on vain hyvin lievästi radioaktiivista ennen käyttöä reaktorissa, joten säteily ei vaikeuta sen käsittelyä ja kuljetusta. (Sandberg 2004, 80; WNA 2009a.)

Uraania louhitaan sekä maanalaisissa että avolouhoksissa (Sandberg 2004, 80). Käytettävä louhintatapa riippuu esiintymän syvyydestä ja muodosta. Uraania voidaan myös erottaa esiintymästä in situ leach – menetelmällä (ISL), joka tunnetaan myös nimellä situ recovery (ISR). ISL:ssä uraani liuotetaan esiintymästä pohjavedellä, johon on lisätty happoa tai emästä ja yleensä hapetinta. Uraanin sisältävä liuos pumpataan takaisin maanpinnalle ja uraanioksidi otetaan talteen. Käytettävä menetelmä riippuu esiintymän ominaisuuksista. Uraania saadaan myös muiden malmien louhinnan sivutuotteena sekä laimentamalla aseuraania. (WNA 2009b; Energiateollisuus ry 2006, 4, 7.)

## 3.2 Uraanin käsittely

Louhinnan jälkeen malmi murskataan ja jauhetaan. Uraani liuotetaan jauhetusta malmista vahvan happo- tai emäsliuoksen avulla. Tämän jälkeen se saostetaan ja syntynyt sakka erotetaan. Lopuksi se kuivataan ja yleensä myös kuumennetaan. Näin syntyy niin sanottu yellowcake, joka sisältää yleensä enemmän kuin 80 % uraania. (WNA 2009a; Energiateollisuus ry 2006, 7.)

### 3.2.1 Konversio

Erityyppisissä reaktoreissa käytetään erilaisia polttoaineita. Uraanirikasteen jatkokäsittely riippuukin reaktorityypistä, jossa polttoainetta tullaan käyttämään. Luonnonuraania hyödyntäviä reaktoreita varten uraania ei tarvitse väkevöidä. Tällöin uraani pelkistetään uraanidioksidiksi ( $\text{UO}_2$ ), jonka jälkeen sitä voidaan käyttää polttoainetehtaan raaka-aineena. Mikäli uraani väkevöidään, se on muutettava kaasumaiseen muotoon. Tätä varten uraani muunnetaan uraaniheksafluoridiksi ( $\text{UF}_6$ ) konversioprosessissa. Uraaniheksafluoridi muuttuu kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi suhteellisen alhaisessa lämpötilassa. Sitä säilytetään paineistetussa säiliössä kiinteässä olomuodossa, jollaisena se myös kuljetetaan väkevöitäväksi. (Energiateollisuus ry 2006, 12; WNA 2009a.)

### 3.2.2 Rikastus

Luonnonuraanissa on 99,27 % isotooppia 238, 0,72 % isotooppia 235 ja 0,01 % isotooppia 234. Joillekin reaktorityypeille tämä  $^{235}\text{U}$ -pitoisuus ei ole tarpeeksi suuri ylläpitämään ketjureaktiota. Rikastuksessa, jota kutsutaan myös väkevöinniksi, pitoisuutta kasvatetaan yleensä 3-5 %:iin. Rikastusprosessissa syntyy väkevöidyn uraanin lisäksi  $^{235}\text{U}$ :n suhteen laimennettua uraania, jonka hyötykäytöstä kerrotaan lisää jälleenkäsittelyn yhteydessä. (Energiateollisuus ry 2006, 12–14, 25.)

Rikastukseen käytetään yleensä diffuusio- tai sentrifugimenetelmää. Kaasudiffuusiossa  $^{235}\text{U}$ :n fluoriyhdiste kulkeutuu, eli diffundoituu, huokoisen seinämän läpi  $^{238}\text{U}$ -yhdistettä paremmin. Sentrifugimenetelmässä kaasumainen uraaniheksafluoridi johdetaan sylinteriin, jossa isotoopit erottuvat toisistaan pyörimisliikkeessä keskipakovoiman avulla. Yksittäisen



sentrifugin erotuskyky on pieni, joten korkean väkevöintiasteen saavuttamiseksi tarvitaan useita peräkkäisiä vaiheita. Sylinterit ovat myös kooltaan pieniä, joten prosessissa käytetään useita rinnakkaisia linjoja. Sentrifugimenetelmällä voidaan myös väkevöidä kaasudiffuusiolaitosten köyhdytettyä jäteuraania hyötykäyttöön. Sentrifugimenetelmä on korvaamassa diffuusiomenetelmää, sillä se kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa ja on kannattava pienemmällä kapasiteetilla. Rikastukseen on myös kehitteillä lasertekniikoita, jotka perustuvat uraaniatomien valikoivaan virittämiseen. Menetelmissä  $^{235}\text{U}$ :n perustila viritetään lasersäteellä pienien energiseen tilaan, jonka tuloksena syntyy elektroni ja positiivinen uraani-ioni. Tämän jälkeen ionisoitunut  $^{235}\text{U}$  kerätään talteen sähköisesti. (Energiateollisuus ry 2006, 12–13; Sandberg 2004, 81–82.)

### 3.3 Polttoaineen valmistus

Ydinpolttoaine on polttoainesauvoissa yleensä keraamisten pellettien muodossa (World Nuclear Association 2009a). Pellettien valmistusta varten kaasumainen uraaniheksafluoridi muunnetaan keraamiseksi uraanidioksidijauheeksi. Jauhe puristetaan pieniksi sylinterimäisiksi napeiksi, jotka ovat halkaisijaltaan noin senttimetrin. Napit tiivistetään käsittelemällä ne korkeassa lämpötilassa, eli sintraamalla. Seuraavaksi napit kasataan pinoiksi, jotka ladataan polttoainesauvoihin. Polttoainesauvat ovat yleensä zirkonium-pohjaisesta metalliseoksesta valmistettuja putkia, jotka esipaineistetaan ja suljetaan ilmatiiviisti. Polttoainesauvat kootaan edelleen polttoainenipuiksi, jotka kuljetetaan ydinvoimalaitoksille käyttöä varten. (Energiateollisuus ry 2006, 14; Sandberg 2004, 82–83.)

Tuore polttoaine on vain hieman radioaktiivista, joten sen kuljetukseen käytettäviltä pakkauksilta ei edellytetä säteilysojeluominaisuuksia. Tuoreen polttoaineen kriittiseksi tuleminen on kuitenkin estettävä sijoittamalla polttoaineniput riittävän etäälle toisistaan. Kriittisyyden vaara voisi ilmetä, mikäli tiheästi pakattu polttoaine joutuisi veden ympäröimäksi. Myös polttoaineen vahingoittuminen ja muut rasitukset on estettävä kuljetuksen aikana, jottei polttoaineen kestävyys reaktorissa heikkene. (Sandberg 2004, 84; Energiateollisuus ry 2006, 16.)

### 3.4 Polttoaineen käyttö

Ydinvoimalaitokset ovat lämpövoimalaitoksia, joissa tarvittava lämpöenergia tuotetaan reaktorissa hallitulla fissioiden ketjureaktiolla. Reaktorisydän muodostuu polttoainenuipista ja niitä ympäröivästä hidastimesta, eli moderaattorista, joka toimii yleensä myös jäähdytteenä. Fissiolla tarkoitetaan raskaan atomiytimien halkeamisreaktiota, joka tapahtuu kun  $^{235}\text{U}$ - tai muuta halkeamiskelpoista ydintä pommitetaan neutroneilla. Halkeamisesta syntyy kaksi haljennutta ydintä kevyempää alkuaineen ydintä, 2-3 neutronia ja gamma- sekä neutriinosäteilyä. Syntyneet neutronit pitävät yllä fissioiden ketjureaktiota. Yhdestä fissiosta vapautuu noin  $3,2 \cdot 10^{-1}$  joulea energiaa. Vapautuva energia kuumentaa polttoainetta, josta lämpö siirtyy jäähdytteen mukana pois reaktorista. Lämmön avulla muodostetaan höyryä, joka johdetaan turbiinille. Höyry pyörittää turbiinia ja edelleen siihen liitettyä generaattoria, joka tuottaa sähköä. (Sandberg 2004, 26–28.)

Reaktorissa käytettävä polttoaine täytyy vaihtaa aika ajoin. Yhtä polttoainenuippua käytetään reaktorissa 3-5 vuotta (Energiateollisuus ry 2007, 6). Polttoaineenvaihto tehdään yleensä 12–24 kuukauden välein (WNA 2009a). Yleensä osa käytetystä polttoaineesta vaihdetaan tuoreeseen ja reaktorisydämeen jäävät niput siirretään uusille paikoille (Sandberg 2004, 83–85; Energiateollisuus ry 2006, 14).

### 3.5 Välivarastointi

Polttoaineeseen syntyy käytön yhteydessä lukuisia uusia aineita, joista osa on radioaktiivisia. Radioaktiiviset aineet jatkavat hajoamistaan reaktorista poiston jälkeen tuottaen runsaasti lämpöä. Tämän vuoksi käytettyjä polttoainenuippuja on jäähdytettävä vielä käytön jälkeen. Radioaktiivisuus ja lämmöntuotto vähenevät ajan myötä. Käytettyä polttoainetta välivarastoidaan noin 40 vuotta ennen loppusijoitusta (WNA 2009c). Välivarastoinnin pituus vaihtelee maan jätehuoltostrategian mukaan ja varastointiaika voi joissakin tapauksissa olla huomattavasti pidempi. (Energiateollisuus ry 2006, 18; Sandberg 2004, 85.)

Käytetyn polttoaineen välivarastointiin käytetään vesiallasvarastoja, ilmajäähdytteisiä holvivarastoja sekä säiliövarastoja. Vesiallasvarastossa polttoainenippuja on helppo käsitellä ja valvoa. Nippuja voidaan säilyttää asianmukaisessa vesiallasvarastoissa ainakin 50 vuotta. Holvivarastossa polttoainenippuja säilytetään kaasutiiviissä kapseleissa typpi-atmosfäärissä. Kapseleita jäähdytetään ilman luonnonkierron avulla. Ennen kuivavarastoon siirtämistä polttoainenippuja säilytetään muutaman vuoden ajan vesialtaissa lämmönkehityksen vähentämiseksi. Kuivavarastot soveltuvat hyvin pitkäaikaiseen varastointiin. Säiliövarastossa polttoainenippuja taas varastoidaan kaasutäytteisissä säiliöissä betonirakennuksissa tai ulkona ilman suojarakennusta. Säiliöt valmistetaan sellaisiksi, että ne täyttävät kuljetusastioille asetetut vaatimukset, jolloin polttoainenippuja ei tarvitse siirtää kuljetuksen ja varastoinnin välissä. Säiliövarastoinnin kustannukset nousevat kuitenkin korkeiksi kun välivarastoitavaa polttoainetta on paljon. (Sandberg 2004, 287–289.)

Radioaktiivisten aineiden kuljetukset kuuluvat vaarallisten aineiden kuljetuksiin, joille on olemassa erityisiä määräyksiä. Radioaktiivisia kuljetuksia voidaan tehdä niin meri-, maa-, rauta- kuin ilmateitse. Käytetyn polttoaineen kuljetukset hoidetaan yleensä tarkoitusta varten valmistetuissa paksuseinäisissä kuljetussäiliöissä erityiskalustolla. Kuljetussäiliöillä on tiukat turvallisuusvaatimukset. Niiden on kestettävä mahdolliset onnettomuustilanteet ja vaimennettava tehokkaasti polttoaineen säteilyä, jotta kuljetuksista ei aiheudu säteilyaltistusta ihmisille kuljetusreitien varrella. (Energiateollisuus ry 2006, 17.)

### **3.6 Loppusijoitus**

Avoin polttoainekierto loppuu käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen. Polttoaineen lisäksi myös muut korkea-aktiiviset jätteet täytyy loppusijoittaa. Loppusijoitukseen on esitetty monia erilaisia ratkaisumalleja vuosikymmenien varrella. Parhaana ratkaisuna pidetään nykyään loppusijoitusta syvälle kallioperään rakennettaviin loppusijoitustiloihin. Useimpien ydinenergiamaiden loppusijoitussuunnitelmat perustuvatkin tähän periaatteeseen. Vaihtoehtoina ovat myös loppusijoitus merisedimentteihin tai syviin porareikiin. Nämä olisivat käytännössä peruuttamattomia loppusijoitusmuotoja. Yhtenä vaihtoehtona on myös odottaa tekniikan kehittymistä ja tulevaisuudessa mahdollisesti

kehitettäviä parempia menetelmiä jätehuollon toteuttamiseksi. (Sandberg 2004, 78–79, 290–292; WNA 2009c.)

Korkea-aktiivisten ydinjätteiden loppusijoitus taas ei ole edennyt toteutukseen asti vielä missään maailmalla. Käytetyn polttoaineen loppusijoituksen suhteen on edetty hitaasti osaksi myös sen vuoksi, että polttoaine sisältää energiaa, joka voidaan käyttää hyödyksi. Hyötykäytön mahdollistaa polttoaineen jälleenkäsittely. Kevytvesireaktoreiden käytettyä polttoainetta voitaisiin myös teoriassa käyttää polttoaineena CANDU-reaktoreissa (Canadian Deuterium Uranium), joiden polttoaineena käytetään luonnonuraania. Tätä kutsutaan DUPIC-menetelmäksi (direct use of used PWR fuel in Candu reactors), joka on kuitenkin vielä kehitysasteella. (WNA 2009a; WNA 2009d.)

### 3.7 Jälleenkäsittely

Käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely kuuluu suljettuun polttoainekiertoon, joka on käytössä useissa ydinenergiamaissa. Käytetystä polttoaineesta noin 95 % on  $^{238}\text{U}$ , 1 %  $^{235}\text{U}$ , 1 % plutoniumia sekä 3 % fissiotuotteita ja muita transuraaneja. Jälleenkäsittelyssä käytetystä polttoaineesta erotetaan uraani ja plutonium, jotka voidaan sen jälkeen käyttää uudelleen polttoaineen valmistukseen. Erotettua uraania voidaan käyttää konversion ja rikastuksen kautta polttoaineena. Talteen otettu plutonium taas sekoitetaan köyhdytettyyn uraaniin, jota saadaan väkevöinnin sivutuotteena, ja siitä valmistetaan mixed oxide - polttoainetta (MOX). Suljetussa polttoainekierrossa alkupään materiaalivirrat vähenevät, mutta kierron loppupäässä syntyy kuitenkin useita erilaisia jätemuotoja jälleenkäsittelyn yhteydessä. Jälleenkäsittelyn avulla polttoaineeseen jäljelle jäänyt energia saadaan hyödynnettyä ja loppusijoitettavan jätteen määrää saadaan pienennettyä. (WNA 2009a; WNA 2009d; Sandberg 2004, 79, 285.)

Nykyiset jälleenkäsittelylaitokset perustuvat PUREX-prosessiin (Plutonium URanium EXtraction). Prosessista syntyy keski- ja matala-aktiivista kiinteää ja nestemäistä jätettä sekä korkea-aktiivista nestemäistä jätettä. Yleensä kiinteät jätteet pakataan jäteastioihin betonin kanssa. Plutoniumin ja uraanin erottamisesta syntyvä korkea-aktiivinen nestemäinen jäte kiinteytetään lasimassaan, joka loppusijoitetaan käytetyn polttoaineen tapaan. (Sandberg 2004, 289–290.)

## 4 YDINJÄTTEIDEN LUOKITUKSET

Ydinjätteeksi nimitetään ydinenergian käytön seurauksena tai yhteydessä syntyneitä radioaktiivisia aineita, joilla ei ole suunniteltua jatkokäyttöä. Erilaisia ydinjätteitä syntyy polttoainekierron lähes kaikissa eri vaiheissa. Yleensä ydinjätteet jaotellaan matala-, keski- ja korkea-aktiivisiin niiden sisältämän radioaktiivisuuden määrän ja tyyppin perusteella. Jätteiden jaottelu vaihtelee jonkin verran maakohtaisesti. Ydinjätelajit vaativat erilaisia jätehuoltotoimenpiteitä, sillä ne sisältävät erilaisia radioaktiivisia isotooppeja, joiden puoliintumisajat vaihtelevat huomattavasti. Puoliintumisajalla tarkoitetaan aikaa, jonka kuluessa isotooppi menettää puolet sen radioaktiivisuudesta. Aine on sitä radioaktiivisempi mitä lyhyempi sen puoliintumisaika on. Aktiivisuudella taas tarkoitetaan aineen ytimissä tapahtuvien muutosten lukumäärää sekunnissa. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq). Säteilyä syntyy sitä enemmän, mitä enemmän ydinmuutoksia tapahtuu. (WNA 2010b; Energiateollisuus ry 2007, 3, 6.)

### 4.1 Matala- ja keskiaktiiviset jätteet

Matala-aktiivisia jätteitä syntyy teollisuudessa, sairaaloissa, laboratorioissa ja polttoainekierron eri vaiheissa. Niitä ovat esimerkiksi suodattimet ja työkalut, jotka sisältävät pieniä määriä lyhytaikaista radioaktiivisia aineita. Ydinjätteistä 90 %:a on matala-aktiivisia, mutta ne sisältävät vain 1 % ydinjätteiden yhteenlasketusta radioaktiivisuudesta. Matala-aktiiviset ydinjätteet eivät ole vaarallisia, mutta niiden hävittämisessä tulee noudattaa varovaisuutta. Yleensä jäte tiivistetään tai poltetaan sen tilavuuden pienentämiseksi ja viedään maakaatopaikalle. (WNA 2010b.)

Keskiaktiiviset ydinjätteet sisältävät enemmän radioaktiivisuutta, joten niiden käsittely vaatii suojautumista säteilyltä. Keskiaktiivisia ydinjätteitä ovat muun muassa kemialliset jäteliemet ja reaktorin osat. Keskiaktiivisia jätteitä on 7 % ydinjätteistä ja ne sisältävät noin 4 % ydinjätteiden radioaktiivisuuden kokonaismäärästä. Jätteet kiinteytetään yleensä betoniin tai bitumiin. Lyhytikäiset keskiaktiiviset jätteet haudataan ja pitkäikäiset loppusijoitetaan. Suurimmalla osalla maista on toteutuksessa oleva huoltosuunnitelma matala- ja keskiaktiivisille ydinjätteille. (WNA 2010b.)

## 4.2 Korkea-aktiiviset jätteet

Korkea-aktiivisia ydinjätteitä ovat käytetty polttoaine sekä osa jälleenkäsittelyssä syntyvästä jätteestä. Ne sisältävät erittäin radioaktiivisia fissiotuotteita sekä pitkäikäistä radioaktiivisuutta sisältäviä raskaita aineita. Korkea-aktiivisten ydinjätteiden aktiivisuuspitoisuus on luokkaa 10000–1000000 TBq/m<sup>3</sup> (IAEA 2009a, 15). Niiden käsittely vaatiikin erityistä suojausta säteilyltä ja jätteet käsitellään yleensä kauko-ohjatusti. Korkea-aktiiviset ydinjätteet tuottavat myös paljon lämpöä, joten niiden jäähditys on varmistettava. Korkea-aktiivista jätettä on vain 3 %:a ydinjätteistä, mutta ne sisältävät 95 %:a ydinjätteiden radioaktiivisuudesta. Jos käytetty polttoaine jälleenkäsitellään, loppusijoitettavan korkea-aktiivisen jätteen määrä pienenee huomattavasti. (WNA 2010b.)

## 5 KORKEA-AKTIIVISTEN YDINJÄTTEIDEN HUOLTOSUUNNITELMAT

Ydinjätehuolto koostuu ydinjätteiden käsittelystä, varastoinnista ja loppusijoituksesta. Jätteiden käsittelyllä ja varastoinnilla pyritään parantamaan ydinjätehuollon turvallisuutta sekä helpottamaan jätteiden jatkokäsittelyä. Loppusijoituksen periaatteena taas on eristää ydinjätteet elollisesta luonnosta. (Energiateollisuus ry 2007, 4.)

Maiden loppusijoituskonseptit perustuvat moninkertaisiin leviämiseesteisiin ja loppusijoitustilojen sijoittamiseen syvälle geologiseen muodostelmaan. Ensimmäisissä kappaleissa käsitellään maita, joissa korkea-aktiivisten ydinjätteiden huoltosuunnitelmat ovat edenneet pisimmälle sekä suunnittelun että toteutukseen pyrkivien toimien osalta. Useissa maissa huoltosuunnitelmat ovat kuitenkin vielä alustavassa vaiheessa, eikä lopullisia päätöksiä asiasta ole tehty. Alustavammassa vaiheessa olevista suunnitelmista käydään läpi esimerkkejä viimeisessä kappaleessa. Joidenkin maiden ydinjätehuollosta oli vaikea löytää luotettavaa tietoa, eikä niitä siksi käsitellä tässä työssä. Tällaisia maita olivat Intia ja Etelä-Korea.

## 5.1 Espanja

Espanjassa ydinvoiman kaupallinen tuottaminen aloitettiin 1960-luvun lopulla. Maassa on käytössä kahdeksan reaktoria, jotka tuottavat viidesosan sen sähköstä. Espanjassa ei ole tehty lopullista päätöstä ydinjätehuollon suhteen, vaan maassa odotetaan tutkimuksen ja kehityksen edistymistä eri vaihtoehtojen suhteen. Espanja on ollut avoimen polttoainekierron kannalla vuodesta 1983 lähtien. Pieni määrä polttoainetta on kuitenkin jälleenkäsitelty. (WNA 2010c.)

Valtion omistama ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos SA) perustettiin vuonna 1984 huolehtimaan ydinjätehuollosta ja ydinvoimalaitosten käytöstäpoistosta. ENRESA on laatinut ydinjätteiden huoltosuunnitelman, jossa on varauduttu myös käytetyn polttoaineen ja muun korkea-aktiivisen ydinjätteen huoltamiseen. Suunnitelma on maan parlamentin hyväksymä. Loppusijoituslaitoksen rakentaminen graniitti-, savi- tai suolamuodostelmaan on harkinnan alla. Korkea-aktiivisten ydinjätteiden loppusijoituslaitoksen käyttöönoton odotetaan tapahtuvan vuoden 2050 tienoilla. (WNA 2010c; IAEA 2009b.)

ENRESAn on tarkoitus rakentaa keskusvälivarasto ydinjätteille vuoteen 2010 mennessä. Välivarastossa on tarkoitus säilyttää käytettyä polttoainetta, keskiaktiivista jätettä ja korkea-aktiivista jälleenkäsittelyjätettä 100 vuoden ajan. Vuonna 2009 valtio etsi vapaaehtoisia paikkakuntia varaston sijoituspaikaksi ja on tarjoutunut maksamaan paikkakunnalle useiden miljoonien eurojen vuosittaista korvausta laitoksen käyttöajalta. Ascon kaupunki on ilmoittautunut vapaaehtoiseksi. (WNA 2010c; IAEA 2009b.)

## 5.2 Iso-Britannia

Iso-Britanniassa on 19 reaktoria, jotka tuottavat viidenneksen sähköstä. Lähes kaikki nykyisin käytössä olevista reaktoreista tullaan poistamaan käytöstä vuoteen 2023 mennessä, joten maahan tullaan rakentamaan paljon uusia reaktoreita lähitulevaisuudessa. Ensimmäinen maan kaupallinen ydinvoimalaitos aloitti toimintansa jo vuonna 1956. Iso-Britanniassa on päädytty suljettuun polttoainekiertoon ja maalla on jälleenkäsittelylaitos

Sellafield. Laitoksessa käsitellään myös monien muiden maiden ydinpolttoaineita, jotka palautetaan takaisin alkuperämaahan jatkotoimenpiteitä varten. (WNA 2010d.)

Iso-Britanniassa on toiminut vuodesta 2004 CoRWM (Committee on Radioactive Waste Management), jonka tehtävänä on antaa hallitukselle neuvoja korkea-aktiivisten ydinjätteiden pitkäaikaisesta varastoinnista sekä loppusijoittamisesta. Tätä ennen tehtäviä hoiti Radioactive Waste Management Advisory Committee. Vuonna 2006 CoRWM suositteli korkea- ja keskiaktiivisten jätteiden sijoittamista syvään geologiseen muodostelmaan yhdistettynä pitkäaikaiseen varastointiin. Esityksessä myös sivuttiin mahdollisuutta luopua polttoaineen jälleenkäsittelystä. NDA (Nuclear Decommissioning Authority) on vastuussa korkea-aktiivisten ydinjätteiden varastoinnista ja loppusijoituksesta. NDA:n perustaman RWMD:n (Radioactive Waste Management Directorate) tehtävänä taas on suunnitella korkea-aktiivisille ydinjätteille turvallinen loppusijoitusratkaisu. (WNA 2010d.)

Suunnitelmien mukaan loppusijoitustilat rakennettaisiin geologiseen muodostelmaan noin 200–1000 metrin syvyyteen. Noin kolmasosan Iso-Britanniasta arvellaan sopivan geologisilta ominaisuuksiltaan loppusijoituspaikaksi. Paikanvalintaprosessi on laitettu käyntiin ja sopivia paikkakuntia etsitään parhaillaan. Loppusijoituspaikaksi tullaan valitsemaan jokin vapaaehtoinen paikkakunta. Cumbria, jossa myös Sellafield sijaitsee, on ilmoittautunut laitoksen sijoituspaikkaehdokkaaksi. Jälleenkäsittelystä syntyviä korkea-aktiivisia jätteitä säilytetään noin 50 vuotta ennen loppusijoitusta (WNA 2010d; CoRWM 2009, 10, 16.)

### **5.3 Japani**

Japanissa on 54 reaktoria, jotka tuottavat 30 %:a maan sähköstä. Kaupallinen sähköntuotanto ydinvoimalla aloitettiin vuonna 1966. Japanissa on päädytty suljettuun polttoainekiertoon energiavarmuuden säilyttämiseksi. Lähtökohtana on, että käytetty polttoaine jälleenkäsitellään Japanissa. Aiemmin polttoainetta on viety jälleenkäsiteltäväksi Ranskaan ja Iso-Britanniaan. (WNA 2010e.)



Vuonna 2000 Japanissa säädettiin loppusijoitusta koskeva laki, jossa edellytetään, että jälleenkäsittelyssä syntyvä korkea-aktiivinen jäte loppusijoitetaan syvälle geologiseen muodostelmaan. Samana vuonna yksityinen sektori perusti NUMO:n (Nuclear Waste Management Organization of Japan), jonka tehtävänä on viedä loppusijoitusta koskevia suunnitelmia eteenpäin ja tulevaisuudessa myös toteuttaa loppusijoitus. Tällä hetkellä NUMO etsii sopivaa vapaaehtoista loppusijoituspaikkaa. Tarkemmat paikkatutkimukset on tarkoitus aloittaa vuonna 2012 ja sijoituspaikka valitaan vuonna 2030. Tällä aikataululla loppusijoitus voisi alkaa noin vuonna 2035. (WNA 2010e.)

JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute), eli nykyinen JAEA (Japan Atomic Energy Agency), on kehittänyt etusijalla olevaa loppusijoituskonseptia kahden vuosikymmen ajan. Konseptisuunnitelmassa noin 20 korkea-aktiivista jälleenkäsittelyjätettä sisältävää pakkausta kapseloitaisiin suureen teräksestä valmistettuun säiliöön. Säiliön ympärille asetettaisiin bentoniittisavea puskurimateriaaliksi. NUMO on tehnyt myös vaihtoehtoisia suunnitelmia, joissa jätteen pitkäaikainen tarkkailu olisi mahdollista. Erityisesti esiin on noussut CARE-konsepti (Cavern Retrievable), jossa loppusijoitustilat suljettaisiin vasta 300 vuoden päästä. Konseptia voitaisiin soveltaa myös tarvittaessa käytettyyn polttoaineeseen. (WNA 2010e.)

Vuonna 2005 Horonobe Underground Research Centre aloitti maanalaisten kuilujen ja tunnelien rakentamisen Hokkaidoon. Tarkoituksena on tutkia sedimenttikivilajeja 500 metrin syvyydessä. Myös Tokiin ollaan rakentamassa Mizunami Underground Research Laboratorya, joka tulee ulottumaan noin 1000 metrin syvyyteen magmakivessä. (WNA 2010e.)

Vuonna 1995 Rokkasho-muraan avattiin Japanin ensimmäinen korkea-aktiivisten jätteiden välivarasto, jonne lasitettu jälleenkäsittelyjäte Euroopasta tuodaan. Ranskassa syntyneiden jätteiden toimitukset on saatu päätökseen, mutta toimitukset Iso-Britanniasta jatkuvat yhä. Myös käytettyä polttoainetta varten ollaan rakentamassa välivarastoa Mutsuun. Varaston toiminnan on tarkoitus alkaa 2010 ja siellä tullaan säilyttämään polttoainetta jopa 50 vuotta ennen niiden jälleenkäsittelyä. (WNA 2010e.)

## 5.4 Kanada

Kanadan sähköstä 15 % tuotetaan ydinvoimalla 18 reaktorin voimin. Ensimmäinen kaupallinen reaktori aloitti toimintansa 1971. Kanadassa ei ole vielä tehty päätöksiä korkea-aktiivisten ydinjätteiden huollon suhteen. Vuonna 2002 perustettiin NWMO (Nuclear Waste Management Organization), jonka tehtävänä on tutkia ydinjätteiden erilaisia varastointi- ja loppusijoitusvaihtoehtoja. NWMO:n tulee tehdä tutkimustensa perusteella hallitukselle ehdotus jätehuollon järjestämisestä ja toteuttaa myöhemmin asiasta tehtävät päätökset. (WNA 2010f.)

Vuonna 2005 NWMO julkaisi korkea-aktiivisille jätteille kolme konseptisuunnitelmaa. Yhtenä vaihtoehtona on jätteiden pitkäaikainen säilytys reaktorien seitsemällä eri sijoituspaikalla kuivavarastoissa. Toisena vaihtoehtona taas on jätteiden keskitetty pitkäaikainen varastointi kuivavarastoissa. Varastointi voisi tapahtua maanpinnalla tai maan alla. Kolmantena vaihtoehtona on loppusijoitus syvälle geologiseen muodostelmaan, mikä voitaisiin tarvittaessa toteuttaa niin, että jätteiden palauttaminen olisi mahdollista. (WNA 2010f.)

Loppusijoitusvaihtoehtoa tarkasteltiin maassa tarkemmin jo 1990-luvulla. Loppusijoitus tehtäisiin 500–1000 metrin syvyyteen Kanadan kilven kallioperään. Loppusijoitettavia korkea-aktiivisia jätteitä voisivat olla käytetyt polttoaineniput sekä jälleenkäsittelyjäte. Jätteet sijoitettaisiin kallioperään vedenpinnan alapuolelle kuparista tai titaanista valmistetuissa säiliöissä, jotka ympäröitäisiin bentoniittisavella. Loppusijoituslaitos sijoitettaisiin todennäköisimmin Ontarioon, Quebeciin, New Brunswickiin tai Saskatchewaniin. Loppusijoituspaikan valintaprosessin odotetaan käynnistyvän vuonna 2012. (WNA 2010f.)

## 5.5 Kiina

Kiinassa on 11 kaupallisessa käytössä olevaa reaktoria ja niitä ollaan rakentamassa runsaasti lisää. Ensimmäinen kaupallinen reaktori aloitti toimintansa jo vuonna 1953. Kiinassa on päädytty suljettuun polttoainekiertoon ja maan jälleenkäsittely perustuu

PUREX-prosessiin. CNNC (China National Nuclear Corporation) vastaa muiden tehtäviensä ohella myös ydinjätehuollosta. (WNA 2010g; WNA 2010h.)

Käytettyä polttoainetta varastoidaan keskitetysti. Jälleenkäsittelystä syntyvä korkea-aktiivinen jäte lasitetaan, kapseloidaan ja loppusijoitetaan geologiseen muodostelmaan noin 500 metrin syvyyteen. Loppusijoituspaikan valinta on ollut käynnissä vuodesta 1986 lähtien. Valintaprosessissa on keskitytty kolmeen paikkaan Beishan alueella, joissa kaikissa loppusijoitus tehtäisiin graniittimuodostelmaan. Loppusijoituspaikka tullaan valitsemaan vuoteen 2020 mennessä ja paikalle tullaan rakentamaan maanalainen tutkimuslaboratorio. Suunnitelmien mukaan loppusijoitus voitaisiin aloittaa vuoden 2050 tienoilla. (WNA 2010h.)

## **5.6 Ranska**

Ranska tuottaa yli 75 %:a sähköstään ydinvoimalla 59 reaktorin voimin. Ranskassa päädyttiin suljettuun polttoainekiertoon jo maan ydinohjelman alussa. Polttoaine jälleenkäsitellään La Hagen laitoksella, jossa jälleenkäsitellään myös muiden maiden polttoaineita. Maan ydinjätehuollon hoitaa ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). (WNA 2010i; Andra 2009.)

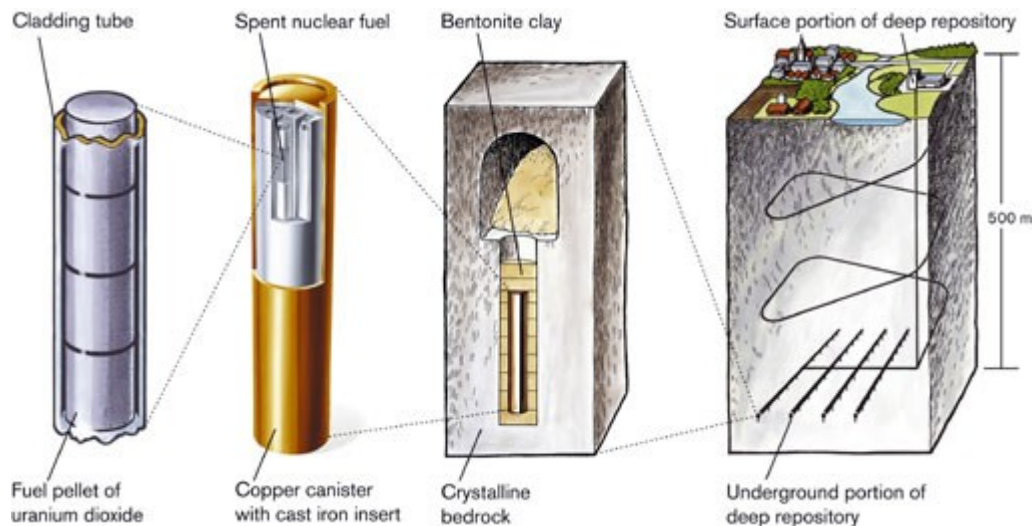
Ranskan ydinjätehuoltoa ohjaa Waste Management Act, joka päivitettiin vuonna 2006. Periaatteena on, että korkea-aktiivisten jätteiden määrää ja aktiivisuutta vähennetään jälleenkäsittelyllä ja välivarastoinnilla ja tämän jälkeen jätteet loppusijoitetaan. Vuonna 2006 tehtiin päätös korkea-aktiivisten jälleenkäsittelyjätteiden loppusijoituksen eteenpäin viemisestä. Tavoitteeksi asetettiin, että loppusijoituslaitoksen luvittaminen aloitettaisiin vuonna 2015 ja että loppusijoituslaitos otettaisiin käyttöön vuonna 2025. (WNA 2010i; Andra 2009.)

Pitkien tutkimusten tuloksena Buressa sijaitseva savimuodostelma on todettu sopivaksi loppusijoituspaikaksi korkea-aktiivisille ja pitkäikäisille keskiaktiivisille ydinjätteille. Maanalaisen tutkimuslaboratorion rakentaminen muodostelmaan aloitettiin vuonna 1999. Maassa on myös toinen tutkimuslaboratorio, joka sijaitsee graniittimuodostelmassa. (WNA 2010i; Andra 2009.)

## 5.7 Ruotsi

Ruotsissa on kymmenen kaupallisessa käytössä olevaa reaktoria, jotka tuottavat 40 % maan sähköstä. Ruotsissa on päädytty ydinpolttoaineen suoraan loppusijoitukseen. Pieni määrä polttoainetta on myös jälleenkäsitelty. Ruotsin ydinvoimayhtiöt perustivat 1970-luvulla SKB:n (Svensk Kärnbränslehantering AB), jonka tehtävänä on käsitellä ja loppusijoittaa ruotsalaisten ydinvoimalaitosten radioaktiiviset jätteet. SKB on tutkinut käytetyn polttoaineen loppusijoitusta 30 vuoden ajan ja siihen liittyvää tutkimustoimintaa tehdään Oskarshamnissa kapselilaboratoriossa ja Äspön kalliolaboratoriossa. (SKB 2009a; WNA 2010j.)

Ruotsissa käytetään loppusijoitukseen KBS-3-menetelmää (Kärnbränsle Säkerhet), joka perustuu kolmeen vapautumisesteeseen. Vapautumisesteet on esitetty kuvassa 3. Käytettyä polttoainetta säilytetään välivaraston vesialtaissa 30–40 vuotta, jonka jälkeen se siirretään kapselointilaitokselle. SKB:lla on Oskarshamnissa keskusvälivarasto käytetylle polttoaineelle ja kapselointilaitos on tarkoitus rakentaa sen yhteyteen. Radioaktiivisten jätteiden kuljetukset tehdään meriteitse M/S Sigyn aluksella. (SKB 2009a; SKB 2009b.)



**Kuva 3.** Vapautumisesteet. (SKB 2009b)

Käytetty polttoaine kapseloidaan kuparikapseliin, jossa on valurautainen sisus. Kuparinen ulkokuori on 5 senttimetriä paksu ja sen tehtävänä on suojata kapselia korroosiolta. Kapselin valurautainen sisus taas tuo sille kestävyyttä. Kapselit ovat noin viiden metrin

pituisia ja metrin halkaisijaltaan. Ne on tehty kestäväksi ääriolosuhteita, kuten maanjäristyksiä ja jääkausia. (SKB 2009c.)

Loppusijoitustunnelit louhitaan kallioon graniittimuodostelmaan 400–700 metrin syvyyteen. Kallio eristää ydinjätteen ympäristöstä ja antaa loppusijoitustiloille stabiilin ympäristön. Loppusijoitustilojen sijoittaminen monen sadan metrin syvyyteen pienentää myös tiloihin tunkeutumisen todennäköisyyttä. Peruskallio ei kuitenkaan ole läpäisemätöntä materiaalia vaan pohjavesi pääsee kulkemaan kallion halkeamissa. (SKB 2009c.)

Horisontaalisten loppusijoitustunneleiden pohjiin tehdään kuuden metrin välein reikiä, joihin kuparikapselit sijoitetaan. Ennen kuin kuparikapselit asetetaan reikiin, ne vuorataan bentoniittisavesta valmistetuilla renkailla ja blokeilla. Bentoniittisavi toimii suojana kapselin ja kallion välissä vaimentaen kallion mekaanisia liikkeitä ja kemiallisia muutoksia. Bentoniittisavi myös estää ja viivyyttää radioaktiivisen aineen leviämistä säiliöstä kapselin rikkoutuessa sekä veden pääsemistä kapseliin. Loppusijoituksen jälkeen tilat suljetaan savella tai sepelin ja saven sekoituksella. Polttoaine on palautettavissa loppusijoituksen kaikissa vaiheissa. (SKB 2009c; SKB 2009b.)

Loppusijoituspaikan valintaprosessi käynnistettiin noin 20 vuotta sitten. Soveltuvuustutkimuksia tehtiin kahdeksalla eri paikkakunnalla, josta siirryttiin tarkempaan paikkatutkimukseen Östhammarin Forsmarkissa ja Oskarshamnin Laxemarissa vuosina 2002–2007. Forsmarkin ja Oskarshamnin sijainnit Ruotsissa on esitetty kuvassa 4. Vuonna 2009 loppusijoituspaikaksi valittiin Forsmark, jonne ydinjätteet sijoitetaan kallioperään. Päätöstä perusteltiin sillä, että Forsmarkissa on loppusijoitukselle parhaiten sopivat olosuhteet (WNA 2010j). Hakemus loppusijoitustilojen rakentamiseksi jätetään vuoden 2010 aikana ja loppusijoitustilat on tarkoitus saada käyttöön vuoteen 2023 mennessä. (SKB 2009a; SKB 2009d.)



**Kuva 4.** Forsmarkin ja Oskarshamnin sijainnit. (SKB 2009a)

Loppusijoitustilojen ja maanpäällisten apurakennusten rakentaminen aloitetaan heti kun rakennuslupa saadaan. Rakentamisen odotetaan kestävän 7-10 vuotta ja alueen kalliosta hankitaan lisää tietoa rakentamisen ohessa. Loppusijoituslaitoksen käyttöönotto toteutetaan kahdessa vaiheessa. Ensin pieni määrä kapselleita loppusijoitetaan ja kokemusten perusteella päätetään toiminnan jatkamisesta. Loppusijoitus on tarkoitus saada päätökseen vuoden 2050 tienoilla. (SKB 2009e.)

## 5.8 Saksa

Saksassa on käytössä 17 reaktoria, joilla tuotetaan neljännes maan sähköstä. Saksa teki 1990-luvun lopulla päätöksen luopua ydinvoimasta vähitellen. Uuden hallituksen myötä ydinvoiman tulevaisuus on kuitenkin jälleen harkinnan alla. Nykyisin maassa ollaan käytetyn polttoaineen suoran loppusijoituksen kannalla. Aiemmin polttoainetta on lähetetty jälleenkäsiteltäväksi Ranskaan ja sitä on myös jälleenkäsitelty Saksan omalla pilottilaitoksella 1970–1990-luvuilla. Nykyisin käytetty polttoaine tulee varastoida voimalaitospaikoilla. Voimalaitostoimijat ovat myös perustaneet yrityksiä, jotka vastaisivat keskitetystä polttoaineen välivarastoinnista. (WNA 2010k; DBE 2010.)

Korkea-aktiiviset ydinjätteet tullaan loppusijoittamaan syväälle maankuoreen. Sekä kiinteät korkeasti aktiiviset jälleenkäsittelyjätteet että käytetty polttoaine tullaan loppusijoittamaan samaan laitokseen. Saksassa BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) vastaa korkeasti aktiivisten ydinjätteiden loppusijoituksesta, mutta DBE (Bundesanstalt für

Geowissenschaften und Rohstoffe) hoitaa loppusijoituslaitoksen rakentamisen ja käytön. (WNA 2010k; DBE 2010.)

Vuonna 1963 liittovaltio suositteli radioaktiivisten jätteiden loppusijoitusta suolakivimuodostelmiin ja loppusijoituksen suunnittelu aloitettiin vuonna 1973. Tämän seurauksena 1970-luvun lopulla Gorlebenissä sijaitsevaa suolakivimuodostelmaa päätettiin alkaa tutkia mahdollisena loppusijoituspaikkana maan kaikille radioaktiivisille jätteille. Paikalla tehtiin tutkimuksia 2000-luvulle saakka ja nykyisin se on ehdolla korkeaaktiivisten ydinjätteiden loppusijoituspaikaksi. Loppusijoitus kyseiselle paikalle olisi mahdollista vuoden 2025 jälkeen. Gorlebenin lisäksi halutaan tutkia myös muita vaihtoehtoja. Esillä on ollut loppusijoituslaitoksen rakentaminen Saksassa monin paikoin esiintyviin savikivimuodostelmiin. Loppusijoitusprojekti on saanut maassa paljon vastustusta ja eteneminen on myös tämän vuoksi ollut hidasta. (WNA 2010k; BfS 2009.)

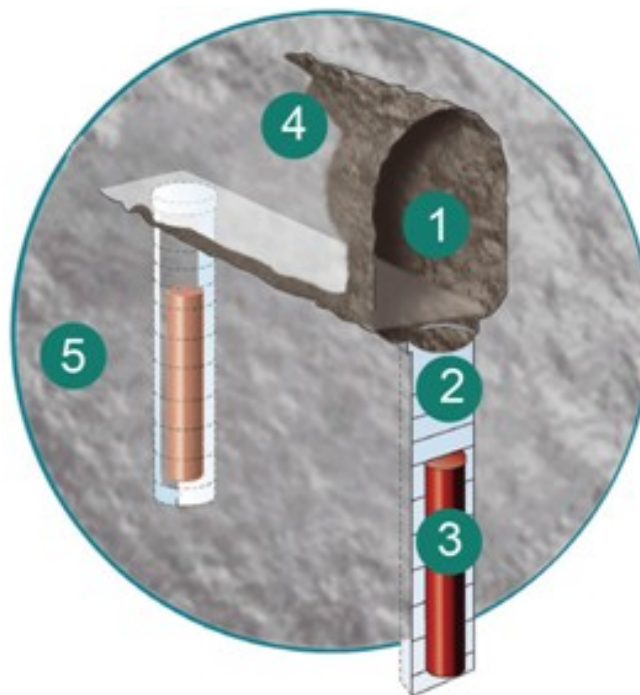
## 5.9 Suomi

Suomessa on neljä ydinreaktoria, jotka tuottavat 27 %:a maan sähköstä (WNA 2010l). Suomessa on päädytty suoraan loppusijoitukseen ja näillä näkymin se tulee olemaan ensimmäinen maa, jossa loppusijoitus toteutetaan. Loppusijoitusvalmistelut aloitettiin samaan aikaan ydinvoimalaitosten käyttöönoton kanssa 1970-luvulla. Aluksi käytetty ydinpolttoaine oli tarkoitus sijoittaa peruuttamattomasti ulkomaille. Valmisteluissa varauduttiin kuitenkin myös Suomessa tapahtuvaan loppusijoitukseen ja loppusijoitusta koskevat tutkimukset aloitettiin 1980-luvulla. Vuonna 1994 säädettiin laki, jonka mukaan Suomessa tuotettu ydinjäte pitää käsitellä, varastoida ja loppusijoittaa Suomessa. Tätä ennen osa käytetystä polttoaineesta vietiin Neuvostoliittoon, eli nykyiselle Venäjälle. Vuonna 1995 ydinvoimayhtiöt perustivat Posiva Oy:n, joka vastaa sekä loppusijoituksen toteutuksesta että siihen liittyvistä tutkimuksista (Posiva Oy 2008, 5). Käytettyä polttoainetta väliavarastoidaan voimalaitospaikoilla vesiallasvarastoissa. (Posiva Oy 2009a.)

Suomessa loppusijoitus toteutetaan SKB:n kehittämällä KBS-3-konseptilla, jonka pääperiaatteet kuvattiin jo Ruotsia käsittelevässä kappaleessa. Käytetyn polttoaineen loppusijoituspaikaksi on valittu Eurajoen Olkiluoto ja kapselit tullaan sijoittamaan peruskallioon 400 metrin syvyyteen. Kapselit sijoitetaan graniittiin tehtäviin

loppusijoitustunneleihin, jossa ne asetetaan pystysuoraan porattuihin reikiin. Posiva ja SKB tutkivat myös mahdollisuutta sijoittaa kapselit vaakasuoriin reikiin. Loppusijoittaminen tullaan toteuttamaan niin, ettei se vaadi minkäänlaista valvontaa tilojen sulkemisen jälkeen (Posiva Oy 2008, 8). (Posiva Oy 2009b.)

Loppusijoituskapseli on metallisäiliö, joka muodostuu kahdesta sisäkkäisestä osasta. Sisäosa on valmistettu pallografiittiraudasta ja 5 senttimetrin paksuinen ulkokuori kuparista. Loppusijoituslaitokseen tullaan sijoittamaan ainakin nykyisten neljän ja yhden rakenteilla olevan ydinvoimalan polttoaineet. Ydinvoimalaitosten erilaisten polttoaineryppujen vuoksi kapselityyppjä tullaan valmistamaan kolmea erilaista: Loviisa 1 ja 2:lle, Olkiluoto 1 ja 2:lle sekä Olkiluoto 3:lle omansa. Kapselin pituus vaihtelee tyypeittäin, mutta kaikkien halkaisija on 1,05 metriä. Loppusijoituskapselin ja kallion väliin sijoitetaan bentoniittisavesta valmistettu puskuri (Posiva Oy 2009d). Kuvasta 5 nähdään loppusijoitustunneli ja leviämisseet (1. Loppusijoitustunneli, 2. Bentoniitti, 3. Loppusijoituskapseli, 4. Tunnelitäyte, 5. Kallio). (Posiva Oy 2009c.)



**Kuva 5.** Loppusijoituksen periaate. (Posiva Oy 2009b)

Vuosina 1983–1985 tehtiin alueeulontatutkimuksia ympäri Suomea ja 1986–1992 alustavia paikkatutkimuksia. Vuosina 1993–2000 siirryttiin yksityiskohtaisiin



jatkotutkimuksiin sekä ympäristövaikutusten arviointimenettelyn toteuttamiseen Eurajoen Olkiluodossa, Loviisan Hästholmenissa, Kuhmon Romuvaarassa ja Äänekosken Kivetyssä. Paikkakuntien sijainnit Suomessa on esitetty kuvassa 6. Kaikki paikat todettiin soveltuviksi loppusijoitukseen ja vuonna 2001 loppusijoituspaikaksi valittiin Eurajoen Olkiluoto. Päätökseen vaikutti paikallisen hyväksyntä, käytettävissä olevan maa-alueen suuruus ja se että suuri osa käytetystä polttoaineesta sijaitsee jo valmiiksi alueella Olkiluodossa sijaitsevien ydinvoimalaitosten vuoksi. (Posiva Oy 2009a.)



**Kuva 6.** Loppusijoituksen paikkakuntavaihtoehdot. (Posiva Oy 2009a)

Olkiluodossa on tehty kattavia kallioperätutkimuksia ja sinne louhitaan parhaillaan loppusijoitussyvyyteen ulottuvaa tutkimustunneli ONKALOA. Tutkimuksilla hankitaan yksityiskohtaisempaa tietoa loppusijoituskallion ominaisuuksista ja olosuhteista. Käytetyn polttoaineen loppusijoitus on määrä aloittaa vuonna 2020. (Posiva Oy 2008, 5-6.)

Posiva on saanut myönteisen periaatepäätöksen nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosten ja rakenteilla olevan laitoksen polttoaineen loppusijoitukseen Olkiluotoon. Tämän lisäksi Posiva on jättänyt periaatepäätöshakemukset sen

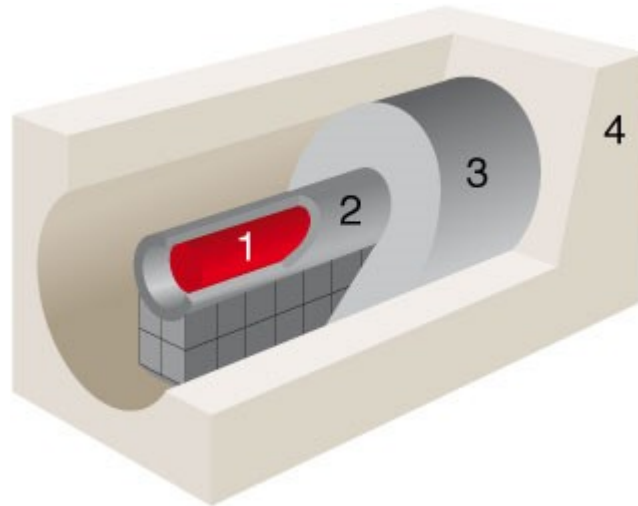
omistajayhtiöiden suunnitelmissa olevien voimalaitosten polttoaineiden loppusijoittamiseksi samaiseen loppusijoitustilaan. Posivan omistajayhtiöiden lisäksi ydinvoimalaa suunnittelee myös kolmas toimija, jonka tavoitteena on loppusijoittaa polttoaineensa Olkiluotoon. Toimijalla ei kuitenkaan ole sopimusta asiasta Posivan kanssa, eivätkä omistajayhtiöt ole olleet halukkaita neuvotteluihin. Suomen laki antaa kuitenkin mahdollisuuden pakottaa toimijat yhteistyöhön asiassa. Alueen kallioperää ei kuitenkaan ole tutkittu niin paljon, että voitaisiin olla varmoja mahdollisuudesta loppusijoitustilojen laajentamiseen. (Posiva 2010; Raunio 2009.)

## 5.10 Sveitsi

Sveitsissä on 5 reaktoria, jotka tuottavat 40 %:a maan sähköstä. Ydinvoiman tuotanto Sveitsissä aloitettiin vuonna 1969. Sveitsillä ei ole kansallista linjausta korkea-aktiivisten jätteiden huollon suhteen, mutta voimalaitostoimijat ovat lähettäneet polttoainetta ulkomaille jälleenkäsiteltäväksi. Polttoainetta jälleenkäsitellään sekä Ranskassa että Iso-Britanniassa. Jälleenkäsittelystä syntyvä korkea-aktiivinen jäte palautetaan Sveitsiin. Vuonna 2005 tämä kuitenkin päätettiin lopettaa seuraavan kymmenen vuoden ajaksi. Käytettyä polttoainetta välivarastoidaan ydinvoimalaitospaikoilla sekä keskitetysti kuivavarastossa Würenlingenissä. (WNA 2010m.)

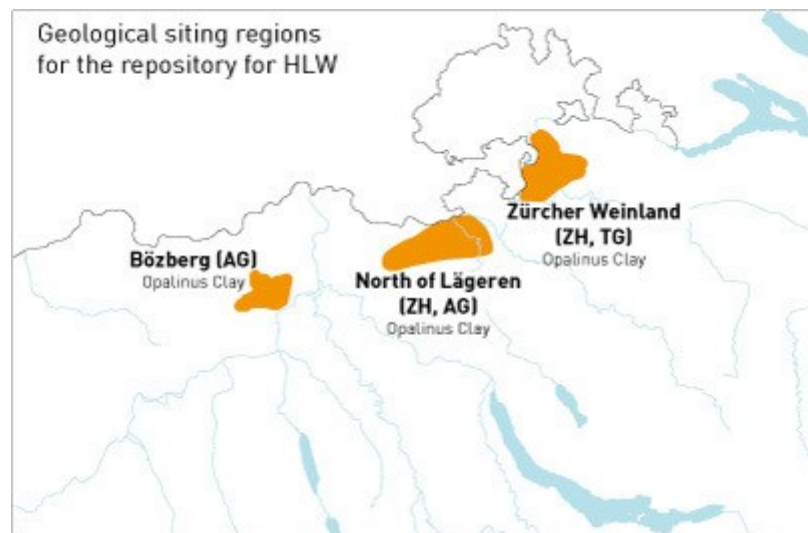
Vuonna 1972 valtio ja ydinvoimayhtiöt perustivat NAGRAn (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), jonka tehtävänä on huolehtia ydinjätteiden huollosta. Vuonna 2002 se luovutti valtiolle selvityksen, jossa todettiin, että käytetty polttoaine, korkea-aktiivinen jälleenkäsittelyjäte ja pitkäikäinen keskiaktiivinen jäte voidaan loppusijoittaa Sveitsiin turvallisesti. (WNA 2010m; NAGRA 2010a.)

Loppusijoitustilat tullaan rakentamaan geologiseen muodostelmaan 400–900 metrin syvyyteen. Käytetty polttoaine pakataan metallisiin säiliöihin, jotka ympäröidään bentoniitilla ja asetetaan peräkkäin loppusijoitustunneliin bentoniitista valmistetulle jalustalle. Lopuksi tunneli täytetään bentoniittirakeilla. Korkea-aktiiviset jälleenkäsittelyjätteet on kiinteytetty lasimassaan, joka kapseloidaan ja loppusijoitetaan samalla tavalla kuin polttoainekin. Jätteet ovat palautettavissa loppusijoitustilasta milloin tahansa. Kuvassa 7 on esitetty leviämisseet. (NAGRA 2010b.)



**Kuva 7.** Leviämissesteet. (NAGRA 2010b)

Loppusijoituspaikan valintaprosessi on käynnissä ja potentiaalisiksi loppusijoituspaikoiksi on tunnistettu kolme paikkaa. Mahdolliset sijoituspaikat ovat Bözberg, Zürcher Weinland sekä Pohjois-Lägeren ja niiden sijainti on esitetty kuvassa 8. Näissä kaikissa loppusijoitus tapahtuisi savikivimuodostelmaan. Loppusijoitus pyritään aloittamaan vuoden 2050 tienoilla. (NAGRA 2010c.)



**Kuva 8.** Mahdolliset loppusijoituspaikat. (NAGRA 2010c)

## 5.11 Tšekin tasavalta

Tšekin tasavallassa on 6 reaktoria, joista ensimmäinen aloitti toimintansa vuonna 1985. Ydinvoimalla tuotetaan noin kolmannes maan energiasta. Valtio ei ole ottanut

minkäänlaista linjaa ydinjätehuollon suhteen, vaan päätös tästä on jätetty ydinvoimalaitosten omistajalle CEZ:lle (the Czech Power Company). CEZ ei pidä jälleenkäsittelyä kannattavana, mutta päätöksiä asian suhteen ei kuitenkaan ole vielä tehty. Nykyisin käytettyä polttoainetta säilytetään välivarastoissa voimalaitospaikoilla. (WNA 2010n.)

Maan loppusijoituskonseptissa käytetty polttoaine kapseloidaan ja kapselit sijoitetaan 500 metrin syvyyteen louhittuihin tunneleihin. Kapselit asetetaan loppusijoitustunneleihin tehtyihin pystysuoriin reikiin, jotka vuorataan bentoniitilla. Kapseli muodostuu kahdesta sisäkkäisestä astiasta, joista ulompi valmistetaan ruostumattomasta teräksestä ja sisempi alumiiniseoksesta. Lisäksi ruostumattoman teräskuoren päälle asennetaan suojaava kerros. Loppusijoitustilat tullaan mitä luultavimmin rakentamaan graniittimuodostelmaan. (SÚRAO/RAWRA 2009.)

RAWRA (Radioactive Waste Repository Authority) vastaa maan loppusijoituksesta. Loppusijoituspaikan valinta on tarkoitus tehdä vuonna 2015 ja aloittaa loppusijoituslaitoksen rakentaminen vuoden 2050 jälkeen. Loppusijoitus taas voitaisiin aloittaa vuonna 2065 ja se jatkuisi aina 2100-luvulle saakka. (WNA 2010m; SÚRAO/RAWRA 2009.)

## 5.12 Venäjä

Venäjällä ensimmäinen sähköä tuottava reaktori aloitti toimintansa vuonna 1954 ja ensimmäiset kaupalliset reaktorit käynnistettiin vuosina 1963–1964. Venäjällä käytetyn polttoaineen huolto perustuu jälleenkäsittelyyn, joka toteutetaan Mayakin jälleenkäsittelylaitoksella. Venäjällä ydinjätehuoltoa hoitaa RosRAO, joka aloitti toimintansa vuonna 2009. Maan ydinjätehuoltoa koskevaa lainsäädäntöä ollaan uudistamassa, joten RosRAO toimii vielä väliaikaisten järjestelyjen mukaisesti. (WNA 2010o.)

Korkea- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden loppusijoituslaitoksen paikanvalinta on käynnissä ja loppusijoituslaitosta kaavailaan Kuolan niemimaalle graniittimuodostelmaan. Loppusijoituspaikaksi on ehdotettu Krasnoyarskin alueella olevaa Nizhnekanskya. Myös

Mayakin laitoksen läheisyydessä olevaa vulkaanista kallioperää on tutkittu mahdollisena vaihtoehtona. Loppusijoituslaitoksen suunnittelu ja maanalaisen tutkimuslaboratorion toiminta voitaisiin aloittaa vuoteen 2015 mennessä. Tällä aikataululla loppusijoituslaitoksen rakentaminen voitaisiin aloittaa vuoteen 2025 mennessä ja se saataisiin päätökseen 2035 mennessä. Venäjällä ei ole korkea-aktiivisten jätteiden suhteen takanaan kovin vastuullinen historia. 1950-luvulle saakka Mayakin laitoksen jätteet laskettiin läheiseen jokeen ja järveen, kunnes korkea-aktiivisille jätteille rakennettiin välivarasto. Venäjällä on tutkittu myös nestemäisen korkea-aktiivisen ydinjätteen pumppaamista syviin porareikiin. Siihen perustuvat loppusijoitusjärjestelmät poistetaan käytöstä seuraavan vuosikymmenen aikana. (WNA 2010o; Vuori ja Rasilainen 2009, 41–42.)

### **5.13 Yhdysvallat**

Yhdysvallat on maailman suurin ydinenergian tuottajamaa. Maassa on 104 reaktoria, jotka tuottavat 20 % sen sähköstä. Yhdysvaltojen hallitus on vastuussa polttoaineen loppusijoituksesta. Polttoainetta säilytetään voimalaitospaikoilla vesiallas- ja kuivavarastoissa, ennen kuin DOE (Department of Energy) ottaa sen haltuunsa loppusijoitusta varten. Suunnitelmana on sijoittaa käytetty polttoaine ja korkea-aktiiviset jätteet syvälle geologiseen muodostelmaan. Loppusijoituslaitosta on suunniteltu Nevadan Yucca Mountainiin, jossa jätteet sijoitettaisiin tuhkakivimuodostelmaan vähintään 200 metrin syvyyteen louhittuihin tunneleihin (DOE 2002). Kaupallisten reaktoreiden käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely oli kiellettyä Yhdysvalloissa vuosina 1977–2005. Viime vuosina Yhdysvalloissa on kuitenkin esitetty kiinnostusta myös jälleenkäsittelyä ja polttoainekierron kehittyneitä teknologioita kohtaan. (WNA 2010q; WNA 2010p.)

DOE:n oli tarkoitus aloittaa polttoaineen vastaanotto jo vuonna 1998. Näin ei kuitenkaan tapahtunut Yucca Mountainin loppusijoituslaitoksen rakentamisen rahoitusongelmien, juridisten ongelmien sekä poliittisen vastustuksen vuoksi. Vuoden 2009 hallinnon budjetissa projektille suunnattuja varoja vähennettiin huomattavasti, mikä vaikeuttaa projektin etenemistä entisestään. Tilat polttoaineen välivarastointiin ovat ylikuormittuneet viivästyksen vuoksi huomattavasti ja vesiallasvarastojen lisäksi suurimmalla osalla voimalaitospaikoista on otettu käyttöön kuivavarastoja. Polttoaineen vastaanoton

aloittamisen viivästyminen on aiheuttanut paljon oikeustoimia voimalaitostoimijoiden ja liittovaltion välillä. (WNA 2010q.)

Yhdysvalloissa on päätetty harkita uudelleen polttoainekierron loppupäätä koskevia päätöksiä ja tätä varten perustettiin vuonna 2010 Blue Ribbon Commission. Sen on tarkoitus esittää suosituksensa ydinjätehuollon järjestämisestä vuoden 2012 aikana. Mikäli Yucca Mountainin loppusijoitushanke päätetään kuopata, on mahdollista, että voimalaitostoimijat tulevat hakemaan korvauksia myös loppusijoituslaitoksen rakentamiseen kerätyistä varoista. Ydinvoimateollisuus on ilmaissut tyytymättömyytensä nykyistä tilannetta kohtaan ja vaatinut projektia hoitavien tahojen uudelleen järjestämistä. (WNA 2010q.)

Ennen vuotta 2009 loppusijoituslaitoksen käyttöönoton arvioitiin sijoittuvan vuosille 2020–2021. Laitoksen käytön arvioitiin kestävän 110 vuotta ja laitoksen käytöstäpoiston alkavan vuonna 2133. Nykyisen tilanteen valossa loppusijoituksen etenemistä on vaikea arvioida. (WNA 2010q.)

## **5.14 Muut maat**

Unkarissa käytetty polttoaine loppusijoitetaan ilman jälleenkäsittelyä. Tuore polttoaine tuodaan maahan Venäjältä ja ennen käytetty polttoaine myös palautettiin sinne jälleenkäsiteltäväksi. Jälleenkäsittelyjätteitä ei palauteta takaisin Unkariin. Maan ydinjätehuollosta vastaa PURAM (Public Agency for Radioactive Waste Management). Budapestin lähellä sijaitsevaa savikivimuodostelmaa tutkitaan korkea-aktiivisten jätteiden mahdolliseksi loppusijoituspaikaksi. Loppusijoituksesta on tehty alustava turvallisuusanalyysi. Käytettyä polttoainetta säilytetään vesialtaissa viisi vuotta, jonka jälkeen se siirretään kuivavarastoon. (WNA 2010r.)

Slovakiassa tehtiin vuonna 2008 päätös käytetyn polttoaineen jälleenkäsittelystä kotimaassa. Tätä ennen linjana oli suora loppusijoitus. Käytettyä polttoainetta on viety myös Venäjälle. Vuonna 1996 perustettiin käytöstäpoistosta ja radioaktiivisten jätteiden huollosta vastaava organisaatio, joka on nykyisin nimeltään Javys (Jadrova a vyradovacia

spolocnost). Korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoituslaitoksen paikanvalinta on aloitettu. (WNA 2010s.)

Alankomaissa päädyttiin 1970-luvulla käytetyn polttoaineen jälleenkäsittelyyn. Maan käytetty polttoaine jälleenkäsitellään Iso-Britanniassa sekä Ranskassa ja palautetaan takaisin Alankomaihin. Vuonna 1984 tehtiin päätös, jonka mukaan maan radioaktiivisia jätteitä välivarastoidaan 100 vuotta ennen kuin niitä käsitellään muutoin. Samana vuonna tehtiin myös loppusijoitukseen liittyvä tutkimusstrategia. Näiden päätösten seurauksena perustettiin COVRA (Central Organization for Radioactive Waste). COVRAlla on HABOG -niminen välivarasto korkea-aktiiviselle jätteelle. Korkea-aktiivinen jäte tullaan varastoimaan maanalaiseen laitokseen niin, että sen palautettavuus on mahdollista. Loppusijoituspaikka on tarkoitus valita vuoteen 2016 mennessä. (WNA 2010t.)

Ukrainassa ei ole sitouduttu suljettuun polttoainekiertoon, vaikka VVER-440 -reaktoreiden polttoaineet lähetetäänkin Venäjälle jälleenkäsiteltäväksi. Jälleenkäsittelyjätteiden palautus aloitetaan vuonna 2011. Itse käytettyä polttoainetta tullaan varastoimaan ainakin 50 vuotta ennen muita toimia. Korkea- ja keskiaktiiviset jätteet tullaan sijoittamaan samaan loppusijoituslaitokseen. Loppusijoituspaikan löytämiseksi on tehty alustavia tutkimuksia, joiden perusteella vaihtoehtojen määrää on saatu pienennettyä. (WNA 2010u.)

Belgia ei ole tehnyt lopullista ratkaisua korkea-aktiivisten jätteiden huollon suhteen. ONDRAF/NIRAS (the national agency for radioactive waste and fissile materials management) vastaa Belgiassa kaikesta radioaktiivisten materiaalien huollosta. Aiemmin käytetty polttoaine toimitettiin jälleenkäsiteltäväksi ja siitä syntyneitä lasitettua korkea-aktiivista jätettä varastoidaan Desselissä. Tutkimukset keski- ja korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoittamiseksi syvälle geologiseen muodostelmaan ovat käynnissä ja ne ovat keskittyneet pääasiassa Molissa sijaitsevaan savimuodostelmaan. Maanalainen laboratorio Hades rakennettiin vuosina 1980–1984 savimuodostelmaan 225 metrin syvyyteen. (WNA 2010v.)

## 6 YHTEENVETO

Kukin ydinenergiamaa tekee omat päätöksensä ydinjätteiden huollon suhteen ja tätä koskeva lainsäädäntö vaihtelee maittain. Mitään yhtenäistä käytäntöä ei ole luotu myöskään korkea-aktiivisten ydinjätteiden huollon tai loppusijoituksen suhteen. Loppusijoituskonseptit ovat kuitenkin pääperiaatteiltaan samanlaiset ja perustuvat peräkkäisiin leviämissesteisiin. Ydinenergiamaiden korkea-aktiivisten ydinjätteiden huoltosuunnitelmat ja niiden toteutus ovat hyvin eri vaiheissa. Pisimmälle loppusijoitukseen pyrkivissä toimissa ovat päässeet Suomi ja Ruotsi. Taulukkoon 1 on kerätty tässä työssä käsiteltyjen maiden loppusijoitussuunnitelmien tämänhetkinen tila.

**Taulukko 1.** Korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoitussuunnitelmat.

| Maa              | Jätelaji  | Loppusijoituspaikka          | Käyttöönotto tavoite |
|------------------|---|------------------------------|----------------------|
| Suomi            | käytetty polttoaine                             | Olkiluoto, graniitti         | 2020                 |
| Ruotsi           | käytetty polttoaine                             | Forsmark, graniitti          | 2023                 |
| Ranska           | jälleenkäsittelyjäte                            | ei valittu                   | 2025                 |
| Yhdysvallat      | käytetty polttoaine,<br>jälleenkäsittelyjäte    | Yucca Mountain,<br>tuhkakivi |                      |
| Japani           | jälleenkäsittelyjäte                            | ei valittu                   | 2035                 |
| Venäjä           | jälleenkäsittelyjäte                            | ei valittu                   | 2035                 |
| Espanja          | käytetty polttoaine                             | ei valittu                   | 2050                 |
| Kiina            | jälleenkäsittelyjäte                            | ei valittu                   | 2050                 |
| Sveitsi          | käytetty polttoaine,<br>jälleenkäsittelyjäte    | ei valittu                   | 2050                 |
| Tšekin tasavalta | käytetty polttoaine                             | ei valittu                   | 2065                 |
| Iso-Britannia    | jälleenkäsittelyjäte                            | ei valittu                   |                      |
| Kanada           | käytetty polttoaine tai<br>jälleenkäsittelyjäte | ei valittu                   |                      |
| Saksa            | käytetty polttoaine,<br>jälleenkäsittelyjäte    | ei valittu                   |                      |

Vaikka joidenkin maiden korkea-aktiivisten ydinjätteiden huoltosuunnitelmat ovatkin hyvin pitkällä, liittyy niihin vielä monia ratkaisemattomia ongelmia. Toimivan korkea-



aktiivisten ydinjätteiden huollon toteuttamiseksi tarvitaankin vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä. Osaltaan tästä kertoo myös se, että useat maat eivät ole tehneet lopullisia päätöksiä oman huoltosuunnitelmansa suhteen.

Korkea-aktiivisten ydinjätteiden huoltosuunnitelmista oli yllättävän vaikea löytää luotettavaa ja ajantasaista tietoa. Tämän vuoksi joitakin maita jouduttiin jättämään työn ulkopuolelle. Myös käsiteltävistä maista kerrotun tiedon rajaaminen osoittautui haasteelliseksi.

## LÄHDELUETTELO

Andra. 2009. High-level waste and intermediate-level long-lived waste. [www-sivut]. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.andra.fr/international/pages/en/menu21/waste-management/waste-management-issues-at-national-level/high-level-waste-and-long-lived-intermediate-level-waste-1618.html>

BfS. 2009. Search for a Repository Site in Germany. [www-sivut]. Päivitetty 18.12.2009. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: [http://www.bfs.de/en/endlager/Standortfindung.html/endlagersuche\\_deutschland.html](http://www.bfs.de/en/endlager/Standortfindung.html/endlagersuche_deutschland.html)

CoRWM. 2009. CoRWM report to government geological disposal of higher activity radioactive wastes. [pdf-dokumentti] Heinäkuu 2009. 74 s. Saatavissa: [http://www.corwm.org.uk/Pages/Lnk\\_pages/rad\\_waste\\_man.aspx#geological](http://www.corwm.org.uk/Pages/Lnk_pages/rad_waste_man.aspx#geological)

DBE. 2010. Disposal of Radioactive Waste in Germany. [www-sivut]. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.dbe.de/en/final-disposal/final-disposal-of-waste/index.php>

Energiateollisuus ry. 2006. Hyvä tietää uraanista. Erweko Painotuote Oy. 27 s.

Energiateollisuus ry. 2007. Hyvä tietää ydinjätteestä. Helsinki, MIKTOR. 23 s. ISBN 978-952-5615-11-1.

IAEA. 2009a. Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide. [pdf-dokumentti]. 48 s. ISBN 978-92-0-109209-0. [viitattu 13.4.2010]. Saatavissa: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf)

IAEA. 2009b. Spain. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2009. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2009/countryprofiles/Spain/Spain2008.htm>

IAEA. 2010. Latest news related to pris and the status of nuclear power plants. [www-sivut]. [viitattu 7.4.2010]. Saatavissa: <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>

IEA. 2009. Key world energy statistics 2009. [pdf-dokumentti]. Saatavissa: [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key\\_stats\\_2009.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf)

NAGRA. 2010a. About Nagra. [www-sivut]. [viitattu 21.3.2010]. Saatavissa: [http://www.nagra.ch/g3.cms/s\\_page/77680/s\\_name/aboutnagra](http://www.nagra.ch/g3.cms/s_page/77680/s_name/aboutnagra)

NAGRA. 2010b. Geological repository for high-level waste. [www-sivut]. [viitattu 21.3.2010]. Saatavissa: [http://www.nagra.ch/g3.cms/s\\_page/83430/s\\_name/tlhaae](http://www.nagra.ch/g3.cms/s_page/83430/s_name/tlhaae)

NAGRA. 2010c. Siting regions for the repository for HLW. [www-sivut]. [viitattu 21.3.2010]. Saatavissa: [http://www.nagra.ch/g3.cms/s\\_page/84870/s\\_name/standortehaae](http://www.nagra.ch/g3.cms/s_page/84870/s_name/standortehaae)

Posiva Oy. 2008. Kapseleissa kalliioon, käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus Olkiluodossa. [pdf-dokumentti]. Julkaistu 11.1.2008. 23 s. [viitattu 11.11.2009]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/files/430/Posiva\\_yleisesite\\_110108.pdf](http://www.posiva.fi/files/430/Posiva_yleisesite_110108.pdf)

Posiva Oy. 2009a. Paikanvalinta: loppusijoitus Olkiluotoon. [www-sivut]. [viitattu 19.11.2009]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/ydinjatehuolto/paikanvalinta\\_loppusijoitus\\_olkiluotoon](http://www.posiva.fi/ydinjatehuolto/paikanvalinta_loppusijoitus_olkiluotoon)

Posiva Oy. 2009b. Loppusijoituksen perusteet. [www-sivut]. [viitattu 19.11.2009]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen\\_perusteet](http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet)

Posiva Oy. 2009c. Loppusijoituskapseli. [www-sivut]. [viitattu 19.11.2009]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen\\_perusteet/loppusijoituskapseli](http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/loppusijoituskapseli)

Posiva Oy. 2009d. Bentoniittipuskuri. [www-sivut]. [viitattu 19.11.2009]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen\\_perusteet/bentoniittipuskuri](http://www.posiva.fi/loppusijoitus/loppusijoituksen_perusteet/bentoniittipuskuri)

Posiva Oy. 2010. Periaatepäätös. [www-sivut]. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: [http://www.posiva.fi/ydinjatehuolto/tarvittavat\\_luvat\\_ja\\_menettelyt/periaatepaatos](http://www.posiva.fi/ydinjatehuolto/tarvittavat_luvat_ja_menettelyt/periaatepaatos)

Raunio Helena. 2009. Fortum ja TVO kilpailijalleen: teidän ydinjätteenne ei mahdu Olkiluotoon. [www-sivut]. Tekniikka ja talous 11.9.2009. [viitattu 9.4.2010]. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article325897.ece>

Sandberg Jorma. 2004. Ydinturvallisuus. Hämeenlinna: Karisto Oy:n kirjapaino. 418 s. ISBN 951-712-500-3.

SKB. 2009a. About SKB. [www-sivut]. [viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: [http://www.skb.se/Templates/Standard\\_\\_\\_\\_23240.aspx](http://www.skb.se/Templates/Standard____23240.aspx)

SKB. 2009b. Our method of final disposal. [www-sivut]. [viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: [http://www.skb.se/Templates/Standard\\_\\_\\_\\_24109.aspx](http://www.skb.se/Templates/Standard____24109.aspx)

SKB. 2009c. The barriers. [www-sivut]. [viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: [http://www.skb.se/Templates/Standard\\_\\_\\_\\_24110.aspx](http://www.skb.se/Templates/Standard____24110.aspx)

SKB. 2009d. A site is selected. [www-sivut]. [viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: [http://www.skb.se/Templates/Standard\\_\\_\\_\\_23875.aspx](http://www.skb.se/Templates/Standard____23875.aspx)

SKB. 2009e. The construction phase. [www-sivut]. [viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: [http://www.skb.se/Templates/Standard\\_\\_\\_\\_23893.aspx](http://www.skb.se/Templates/Standard____23893.aspx)

STUK. 2009. Polttoainekierto. [www-sivut]. Päivitetty 5.6.2009. [viitattu 20.10.2009]. Saatavissa: [http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinjatteen/fi\\_FI/polttoainekierto/](http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinjatteen/fi_FI/polttoainekierto/)

SÚRAO/RAWRA. 2009. Geological repository. [www-sivut]. Päivitetty 31.8.2009. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa. <http://www.rawra.cz/>

U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management. 2002. Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. [www-sivut]. Julkaistu helmikuussa 2002. [viitattu 1.2.2010]. Saatavissa: [http://www.ocrwm.doe.gov/feis\\_2/summary/indexsum.htm](http://www.ocrwm.doe.gov/feis_2/summary/indexsum.htm)

Vuori Seppo ja Rasilainen Kari. 2009. Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa. [pdf-dokumentti]. Helsinki: Edita Prima Oy. 95 s. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: [www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2515.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2515.pdf)

WNA. 2009a. The Nuclear Fuel Cycle. [www-sivut]. Päivitetty joulukuussa 2009. [viitattu 22.1.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf03.html>

WNA. 2009b. In Situ Leach (ISL) Mining of Uranium. [www-sivut]. Päivitetty kesäkuussa 2009. [viitattu 1.2.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf27.html>

WNA. 2009c. Radioactive Waste Management. [www-sivut]. Päivitetty kesäkuussa 2009. [viitattu 4.2.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf04.html>

WNA. 2009d. Processing of Used Nuclear Fuel. [www-sivut]. Päivitetty lokakuussa 2009. [viitattu 4.2.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html>

WNA. 2010a. Nuclear Power in the World Today. [www-sivut]. [viitattu 17.2.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>

WNA. 2010b. Waste Management. [www-sivut]. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/how/wastemanag.html>

WNA. 2010c. Nuclear Power in Spain. [www-sivut]. Päivitetty 26.2.2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf85.html>

WNA. 2010d. Nuclear Power in the United Kingdom. [www-sivut]. Päivitetty 19.3.2010. [viitattu 21.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf84.html>

WNA. 2010e. Nuclear Power in Japan. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html>

WNA. 2010f. Nuclear Power in Canada. [www-sivut]. Päivitetty 18.2.2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear.org/info/inf49a\\_Nuclear\\_Power\\_in\\_Canada.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf49a_Nuclear_Power_in_Canada.html)

WNA. 2010g. Nuclear Power in China. [www-sivut]. Päivitetty 15.2.2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html>

WNA. 2010h. China's Nuclear Fuel Cycle. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear.org/info/inf63b\\_china\\_nuclearfuelcycle.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf63b_china_nuclearfuelcycle.html)

WNA. 2010i. Nuclear Power in France. [www-sivut]. Päivitetty 26.2.2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>

WNA. 2010j. Nuclear Power in Sweden. [www-sivut]. Päivitetty helmikuussa 2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf42.html>

WNA. 2010k. Nuclear Power in Germany. [www-sivut]. Päivitetty 22.1.2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf43.html>

WNA. 2010l. Nuclear Power in Finland. [www-sivut]. Päivitetty 15.2.2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf76.html>

WNA. 2010m. Nuclear Power in Switzerland. [www-sivut]. Päivitetty tammikuussa 2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf86.html>

WNA. 2010n. Nuclear Power in Czech Republic. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf90.html>

WNA. 2010o. Nuclear Power in Russia. [www-sivut]. Päivitetty 12.3.2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html>

WNA. 2010p. Nuclear Power in the USA. [www-sivut]. Päivitetty helmikuussa 2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf41.html>

WNA. 2010q. US Nuclear Fuel Cycle. [www-sivut]. Päivitetty 1.3.2010. [viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear.org/info/inf41\\_US\\_nuclear\\_fuel\\_cycle.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf41_US_nuclear_fuel_cycle.html)

WNA. 2010r. Nuclear Power in Hungary. [www-sivut]. Päivitetty helmikuussa 2010. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf92.html>

WNA. 2010s. Nuclear Power in Slovakia. [www-sivut]. Päivitetty 30.1.2010. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf91.html>

WNA. 2010t. Nuclear Power in the Netherlands. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2010. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf107.html>

WNA. 2010u. Nuclear Power in Ukraine. [www-sivut]. Päivitetty maaliskuussa 2010. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf46.html>

WNA. 2010v. Nuclear Power in Belgium. [www-sivut]. Päivitetty lokakuussa 2009. [viitattu 18.2.2010]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf94.html>