



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EMMA-STINA PÖYHÖNEN
SELVITYS MATALA- JA KESKIAKTIIVISEN YDINJÄTTEEN HUOL-
LON KUSTANNUKSISTA JA UUSIEN JÄTTEENKÄSITTELYTEK-
NOLOGIOIDEN MAHDOLLISTAMASTA SÄÄSTÖPOTENTIALIS-
TA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 3. joulukuu-
ta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

PÖYHÖNEN, EMMA-STINA: Selvitys matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen huollon kustannuksista ja uusien jätteenkäsittelyteknologioiden mahdollistamista säästöpotentiaalista

Diplomityö, 86 sivua

Marraskuu 2015

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: radioaktiiviset jätteet, jätteiden käsittely, loppusijoitus, säteilyturvallisuus

Jäte, joka on ydinenergian käytön seurauksena rakenteiltaan tai pinnoiltaan aktivoitunut tai kontaminoitunut, luokitellaan ydinjätteeksi ja se on käsiteltävä, varastoitava ja loppusijoitettava säteilyturvallisuusvaatimuksia noudattaen. Radioaktiivisen jätteen käsittelyprosessi vaatii pitkälle vietyä turvallisuusperusteista prosessisuunnittelua ja valvontaa sekä vaatimukset täyttäviä laitteistoja ja tiloja. Tästä seuraa radioaktiivisen jätteen käsittelylle huomattavasti korkeammat investointi- ja käyttökustannukset verrattuna konventionaalisen, ei-radioaktiivisen jätteen käsittelyyn.

Olkiluodossa voimalaitosjätehuollon kustannuksia on selvitetty projektiluontoisesti viimeksi vuonna 2000. Sittenkin kustannusarvioita voimalaitosjätehuollon yksittäisille toiminnoille on tehty erilaisten investointi- ja projektiselvitysten yhteydessä. Tehtyjen selvitysten tuloksia ei ole kuitenkaan hyödynnetty voimalaitosjätehuollon kehittämisessä.

Työn toteutukselle asetettiin kaksi päätavoitetta. Ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää voimalaitosjätehuollon kustannusrakenne sekä kokonaiskustannukset käsittelystä loppusijoitukseen. Selvitystyön merkittävimpana tuloksena saatiin eri voimalaitosjätelajien loppusijoituskustannus tilavuusyksikköä kohden. Toisena tavoitteena oli tutustua markkinoilla tarjolla oleviin jätteenkäsittelyteknologioihin sekä palveluntarjoajiin. Tarkoituksena oli kartoittaa vaihtoehdot nykyisten laitteistojen ja järjestelmien korvaamiseksi uusilla, mahdollisuuksien mukaan tehokkaammilla ratkaisuilla. Jätteenkäsittelyratkaisujen tehokkuus arvioitiin tilavuustehokkuuden kautta säästettävissä olevana loppusijoitustilavuutena. Eri käsittelyratkaisujen mahdollistamaan tilavuussäästöpotentiaaliin ja voimalaitosjätehuollon kustannuksiin perustuen ratkaisuille määritettiin edelleen kustannussäästöpotentiaali sekä mahdollisen käsittelylaitosinvestoinnin maksimihankintakustannus. Arvioinnissa huomioitiin voimalaitosjätehuollon koko elinkaari voimalaitosten käytöstä sulkemiseen ja käytöstäpoistoon.

Selvitystyön ja tehtyjen laskelmien perusteella suositeltiin voimalaitosjätehuollon yleisen kehityssuunnan linjaamista konsernissa. On määritettävä, halutaanko voimalaitosjätehuoltoa lähteä kehittämään uusien jätteenkäsittelyratkaisujen kautta vai pitäytyä nykyisissä jätteenkäsittelyratkaisuissa ja -periaatteissa niitä mahdollisesti kehittäen. Voimalaitosjätehuollon kokonaisvaltainen uudistaminen vaatii selkeät tavoitteet, resurssit ja toteutussuunnitelman. Uusille menetelmille on määriteltävä tekniset suorituskyky- ja turvallisuusvaatimukset sekä tehtävä perusteellinen soveltuvuus- ja kustannusarvio investointiriskien minimoimiseksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

PÖYHÖNEN, EMMA-STINA: Costs of low and intermediate level active nuclear waste management and saving potential of new waste treatment technologies

Master of Science Thesis, 86 pages

November 2015

Major: Power Plants and Combustion Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: radioactive waste, waste treatment, final disposal, radiation safety

Waste, activated or contaminated as a result of nuclear energy production, is classified as nuclear waste and shall be treated, stored and disposed of according to radiation safety requirements. Treatment process of radioactive waste requires advanced safety based process design and control as well as suitable equipment and facilities. Because of the requirements operational and investment costs are significantly higher for radioactive waste than for conventional non-radioactive waste.

The costs of the operational waste management in Olkiluoto were studied on a project basis previously in 2000. Later on smaller cost estimations have been drawn for individual operations of waste management in context of various investment projects. Despite the executed studies of waste management costs, their results have not been utilized to guide development.

The study had two main goals. The first goal was to determine cost structure and overall costs of operational waste management all the way from treatment to disposal. The major result of this study was waste type specific treatment cost per volume unit. The second goal was to investigate new waste treatment technologies and service providers in order to find options to replace current waste treatment systems and equipment with new, possibly more efficient methods. Efficiency of a treatment technology was analyzed based on volume of the final waste to be disposed of. Based on the potential savings in the disposal volume and the determined waste management costs, potential cost savings were determined for each treatment technology. Additionally a maximum investment cost was determined for the different treatment plant investment cases. The analyses were done for the whole life cycle from power plant operation to decommissioning.

Based on the study and calculations, it was recommended to make a general decision on how to develop the operational waste management at the concern level. It is to be decided whether to develop the waste management concept by new waste treatment technologies or to keep the current technologies and principles and possibly improve them. Overall renewal of the waste management concept requires clear targets, resources and an action plan. Technical capacity and safety requirements have to be determined and suitability analyses and cost estimations shall be drawn up carefully in order to minimize investment related risks.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Teollisuuden Voima Oyj:n Tuotannon tuki -yksikön Polttoaineen ja jätteenkäsittely -tiimille, jossa toimin voimalaitosjätteen käsittelyn prosessi-insinöörinä. Työn tarkastajana toimi Tampereen teknillisen yliopiston puolesta professori Risto Raiko ja ohjaajana Teollisuuden Voima Oyj:n puolesta Polttoaineen ja jätteenkäsittely -tiimin esimies Jere Tammela. Kiitokset Ristolle ja Jerelle mahdollisuudesta työn tekemiseen sekä saamastani työn ohjauksesta, neuvoista ja avusta.

Toimenkuvani ja kokemukseni voimalaitosjätteen käsittelyssä antoivat hyvän perustan työn tekemiselle. Toisaalta työn tekeminen vahvisti ja laajensi ammatillista osaamistani. Näin opintojen ja työn yhteensovittaminen toimi parhaimmillaan toisiaan vahvistaen. Työssäni sain apua jo tutuksi tulleelta ammattilaisten verkostolta ympäri Olkiluodon saarta ja sopi joukkoon muutama uusikin yhteistyökumppani. Kiitokset kaikille matkan eri vaiheissa auttaneille.

Jatko-opinnot työn ohessa ovat haastaneet paitsi omaa kestävyyttäni ja organisointikykyäni myös perheeni sopeutumiskykyä, kärsivällisyyttä ja joustavuutta. Suurkiitokset rakkailleni saamastani tuesta, kannustuksesta sekä käytännön avusta aikataulujen yhteensovittamisessa.

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tausta.....	1
1.2	Aikaisemmat tutkimukset	3
1.3	Työn tarkoitus ja tavoitteet	3
1.4	Työn rakenne.....	5
1.5	Tutkimusmenetelmät	5
2	Voimalaitosjätehuolto	6
2.1	Radioaktiivisuus ydinjätteessä	6
2.2	Lainsäädäntö ja ydinvoimalaitosohjeet	8
2.2.1	Laindääsädäntö	9
2.2.2	Ydinvoimalaitosohjeet.....	10
2.3	Voimalaitosjätehuollon peruseriaatteet	11
3	Voimalaitosjätehuolto Olkiluodossa	13
3.1	Syntyvät voimalaitosjätteet ja niiden käsittely.....	14
3.1.1	Huoltojäte.....	15
3.1.2	Ioninvaihtohartsit.....	16
3.1.3	Metalli- ja sekaromu	18
3.1.4	Sekalaiset nesteet ja lietteet sekä jäteöljy	19
3.2	Voimalaitosjätteiden loppusijoitus	20
3.3	Voimalaitosjätehuollon tulevaisuuden haasteet	23
3.3.1	Jätteenkäsittelyteknologia ja vanhentuva laitekanta.....	23
3.3.2	Loppusijoitustilojen lisärakentaminen.....	27
3.3.3	OL3:n kuivatun jätteen loppusijoitus	28
3.3.4	Voimalaitosten käytöstäpoisto	29
3.3.5	Ydinvoiman lisärakentaminen ja toimintojen keskittäminen.....	31
4	Voimalaitosjätehuollon kustannukset	33
4.1	Voimalaitosjätteen käsittelykustannukset.....	34
4.2	Voimalaitosjätteen varastointi- ja kuljetuskustannukset	36
4.3	Voimalaitosjätteen loppusijoituskustannukset.....	38
4.4	Voimalaitosjätehuollon kustannukset jätelajeittain.....	40
5	Tulevaisuuden jätteenkäsittelyratkaisut	42
5.1	Lasitus.....	42
5.1.1	Lasitusprosessi.....	43
5.1.2	Lasitusprosessin luvitus	46
5.2	Plasmasulatus	47
5.3	NUWA.....	48
5.4	Jätteenkäsittelyn palveluiden ostaminen.....	50
5.4.1	Metallijätteen sulatuskäsittely	50
5.4.2	Orgaanisen jätteen polttokäsittely	52

5.5	Nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien uusinta ja toimintojen tehostaminen	53
5.5.1	Odotettu uusintatarve ja -kustannukset	53
5.5.2	Jätteen määrän minimointi ja lajittelun tehostaminen	55
5.5.3	Vanhentaminen	56
6	Uusien jätteenkäsittelyratkaisujen mahdollistama säästöpotentiaali	59
6.1	Säästöpotentiaali OL1:n ja OL2:n käytön aikana tuotetun jätteen loppusijoituskustannuksissa	59
6.2	Säästöpotentiaali OL3:n käytön aikana tuotetun jätteen loppusijoituskustannuksissa	63
6.3	Säästöpotentiaali OL1:n, OL2:n ja OL3:n käytöstäpoistojätteen loppusijoituskustannuksissa	68
6.4	Muu mahdollinen säästöpotentiaali ja syntyvä liiketoiminta	70
7	Tulosten arviointi	73
8	Yhteenveto ja johtopäätökset	77
	Lähteet	81

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Annuiteettimenetelmä	Investointilaskentamenetelmä, jolla investoinnin poistokustannus määritetään vakioksi koko poistoajalle.
BAT	Parhaan käytettävissä olevan tekniikan periaate, Best Available Technology
Dekontaminointi	Laitteiden, rakenteiden tai huonetilojen puhdistaminen radioaktiivisista aineista.
DNA	Deoksiribonukleiinihappo, solun perimäaine
IAEA	Yhdistyneiden kansakuntien alainen Kansainvälinen atomienergiajärjestö, International Atomic Energy Agency, joka pyrkii edistämään ydinenergian rauhanomaista käyttöä
KAJ	Keskiaktiivinen jäte, ominaisaktiivisuus 1 MBq/kg–10 GBq/kg
KEPCO	Korea Electric Power Corporation, Etelä-Korealainen valtio-omisteinen energiakonserni
KHNP	Korea Hydro & Nuclear Power, Korealainen ydinvoimaoperaattori sekä ydinvoimaratkaisuiden toimittaja
KPA-varasto	Käytetyn polttoaineen varasto
KUPI	Kunnossapitotietokanta, jota käytetään muun muassa voimalaitoksen järjestelmien ja komponenttien ennakkohuollon, vikakorjausten sekä muutostöiden suunnitteluun ja seurantaan.
KYT	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma
Käytöstäpoistojäte	Suljetun ydinlaitoksen käytöstäpoiston ja purkamisen yhteydessä syntyvä matala- tai keskiaktiivinen käsittely- ja purkujäte
LJK	Laitosjätekirjanpito, jossa pidetään kirjaa tuotetun voimalaitosjätteen määrästä, fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista sekä sijainnista laitosalueen varastoissa ja loppusijoitusluolassa.
MAJ	Matala-aktiivinen jäte, ominaisaktiivisuus < 1 MBq/kg
NUWA	Volume Reduction of Organic Radioactive Nuclear Waste by Thermal Treatment, kehitysasteella oleva menetelmä orgaanisen radioaktiivisen jätteen termiseen käsittelyyn
OL1	Olkiluodon 1. ydinvoimalaitosyksikkö
OL2	Olkiluodon 2. ydinvoimalaitosyksikkö
OL3	Olkiluodon 3. rakenteilla oleva ydinvoimalaitosyksikkö
OL4	Olkiluodon 4. suunniteltu ydinvoimalaitosyksikkö
Purkujäte	Suljetulta ydinlaitokselta purettava matala- tai keskiaktiivinen komponentti- ja rakennusjäte
Sekundäärijäte	Jätteenkäsittelyprosessissa syntyvä jäte

SSM	Ruotsin ydinturvallisuus viranomainen - Strålsäkerhetsmyndigheten
STUK	Säteilyturvakeskus
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
TEQ	Toksisuusekvivalentti, jota käytetään dioksiinien ja furaanien kokonaispitoisuuden esittämiseen. Toksisuusekvivalentti huomioi suhdeluvun avulla eri yhdisteiden myrkyllisyysvaikutuksen.
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
Valvonnasta vapautus	Hyvin matala-aktiivisen ydinjätteen luokittelu ei-ydinjätteeksi, jolloin se voidaan käsitellä tavanomaisena jätteenä
Valvonta-alue	Alue, missä säteilyturvallisuus ja radioaktiivisen kontaminaation leviämisen estäminen on turvattu erityismenettelyin ja jonne pääsyä valvotaan
Vanhentaminen	Radioaktiivisen jätteen pitkäaikaisvarastointi, jonka tarkoituksena on aktiivisuuspitoisuuden laskeminen
WENRA	The Western European Nuclear Regulators' Association, Länsi-Euroopan turvallisuusviranomaisten muodostama ryhmä, jonka tavoitteena on kansallisten ydinturvallisuus-säännösten harmonisointi
VLJ-luola	Voimalaitosjäteluola, matala- ja keskiaktiivisen voimalaitosjätteen loppusijoitustila
Voimalaitosjäte	Ydinvoimalaitoksen käytön seurauksena suoraan tai välillisesti syntyvä matala- ja keskiaktiivinen radioaktiivinen jäte (termi ei kata käytettyä ydinpolttoainetta)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, teknologia- ja tutkimuspalveluja tarjoava asiantuntijaorganisaatio
YVL-ohjeet	Ydinvoimalaitosohjeet

1 JOHDANTO

Ydinenergian käytössä reaktorissa syntyy radioaktiivisia aineita kahden eri reaktiomekanismin; fission ja neutronikaappauksen kautta. Polttoaineessa radioaktiivisia aineita syntyy raskaan, fissiilin ytimen haljetessa siihen törmäävän neutronin vaikutuksesta kevyemmiksi tytärnuklideiksi tai raskaan ytimen kaapatessa neutronin sisälleen. Polttoaineen ulkopuolella, primääripiirissä radioaktiivisia aineita syntyy jäähdytteen, epäpuhauksien ja rakennemateriaalien ytimien kaapatessa neutronin sisälleen. Näin syntyneet radioaktiiviset nuklidit ovat epästabiileja ja pyrkivät saavuttamaan tasapainon radioaktiivisen hajoamisen kautta emittoimalla energiaa joko hiukkassäteilynä tai sähkömagneettisena säteilynä tai näiden yhdistelmänä.

Suurin osa polttoaineessa syntyvistä radioaktiivisista aineista pidättäytyy polttoaineen keraamisissa matriisissa ja sitä ympäröivässä polttoaineen suojakuoressa. Polttoainesuojakuoren vaurioituessa kaasumaiset ja hyvin liukoiset aineet vapautuvat primääripiiriin. Primääripiirissä syntyvät tai siihen vapautuvat radioaktiiviset nuklidit kulkeutuvat jäähdytteen mukana tai vastaavasti pidättäytyvät rakennemateriaalien pinnoille, kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksiensa ohjaamana.

Jäte, joka on ydinenergian käytön seurauksena rakenteiltaan tai pinnoiltaan aktivoitunut tai kontaminoitunut, luokitellaan ydinjätteeksi ja se on käsiteltävä, varastoitava ja loppusijoitettava säteilyturvallisuusvaatimuksia noudattaen. Jäte on eristettävä elollisesta luonnosta niin, ettei se aiheuta suoraa tai välillistä vaaraa ihmisille, eläimille, kasveille tai omaisuudelle. Radioaktiivisen jätteen käsittelyprosessi sen elinkaaren kaikissa vaiheissa vaatii pitkälle vietyä turvallisuusperusteista prosessisuunnittelua ja valvontaa sekä vaatimukset täyttäviä laitteistoja ja tiloja. Tästä seuraa radioaktiivisen jätteen käsittelylle huomattavasti korkeammat investointi- ja käyttökustannukset verrattuna konventionaalisen, ei-radioaktiivisen, jätteen käsittelyyn.

1.1 Työn tausta

Olkiluodon ydinvoimalaitoksella Olkiluodon 1. ja Olkiluodon 2. ydinvoimalaitosyksikön (OL1 ja OL2) vuonna 1979 alkaneen käyttöhistorian aikana matala-aktiivista jätettä on kertynyt yhteensä 4069 m³ ja keskiaktiivista jätettä 2048 m³ (tilanne 31.12.2013). Näistä loppusijoitettuna vuonna 1992 käyttöön otetun voimalaitosjäteluolan (VLJ-luola) matala-aktiivisen jätteen siiloon (MAJ-siilo) on vastaavasti 3842 m³ ja keskiaktiivisen jätteen siiloon (KAJ-siilo) 1839 m³ jätettä.

OL1:n ja OL2:n voimalaitosjätteenkäsittely perustuu pääasiassa suunnitteluvaiheessa 1970-luvulla valittuihin käsittelymenetelmiin. Jätteenkäsittelyn menettelyjä ja kalustoa on joiltakin osin kehitetty ja päivitetty voimalaitosten käytön aikana, esimerkiksi

radioaktiivisuudesta puhtaan tai vain hyvin vähän kontaminoituneen jätteen valvonnasta vapauttamisen ja loppusijoitettavan metalliromun pakkaamisen tilavuustäyttöasteen tehostamiseksi, mutta käytössä oleva tekniikka on kuitenkin pääosin vanhentunutta, eikä siten täytä parhaan hyödynnettävissä olevan tekniikan (BAT) periaatetta. Vuosikymmeniä palvelleiden laitteistojen tekninen käyttöikä on myös loppumassa ja laitteistojen uusiminen, ainakin jossakin laajuudessa, tulee välttämättömäksi tulevina vuosina.

Rakenteilla olevan Olkiluodon 3. ydinvoimalaitosyksikön (OL3) voimalaitosjätteenkäsittely konsepti perustuu toimittajan tarjoamiin ratkaisuihin, jotka poikkeavat pääasiassa ainoastaan nestemäisen kiinteän jätteen käsittelyn osalta käyville yksiköillä käytössä olevista ratkaisuista. Nestemäisen kiinteän jätteen käsittelyprosessin lopputuote on kuitenkin sellaisenaan kelpaamaton loppusijoitettavaksi VLJ-luolaan, ja käsittelyprosessia joudutaan täydentämään betonoinnilla tai muulla jätteen pidättyvyyttä parantavalla tekniikalla.

Ydinjätehuollon yhdeksi suunnittelulähtökohdaksi on valittu Olkiluodon yksiköiden voimalaitosjätteenkäsittelyn harmonisointi ja laitteistojen yhteiskäytön mahdollistaminen. Useamman ydinvoimalaitosyksikön jätteenkäsittelyn keskittäminen mahdollistaa investoinneille korkeamman käyttöasteen, jolloin investointiin ja laitteistojen ylläpitoon sidotut kiinteät kustannukset jakautuvat suuremman jätemäärän käsittelyyn ja käsittelyn yksikkökustannus alenee. Yhteiskäyttö tukee käyttö- ja suunnitteluorganisaation tehokkuutta ja asiantuntijuutta, kun monen erilaisen teknologian sijaan voidaan perehtyä yhteen teknologiaan. Lisäksi yhteiskäyttö rajaa radioaktiivisen jätteenkäsittelyn yhteen käsittelylaitokseen, jolloin radioaktiivisten aineiden leviäminen ja sekundaarijätteen määrä pystytään minimoimaan. Harmonisointi mahdollistaa osaltaan muun muassa yhteisen kuljetuskaluston käytön. Lisäydinvoimaa Olkiluotoon on suunniteltu rakennettavan ainakin yhden ydinvoimalaitosyksikön verran. Mahdollisen uuden 4. ydinvoimalaitosyksikön (OL4) jätteenkäsittelyprosessi tulee olemaan sidoksissa valittavan voimalaitostoimittajan tarjoamiin menetelmiin ja prosessien yhteensopivuuteen. Laitosyksiköiden yhteisellä keskitetyllä jätteenkäsittelyllä riippuvuus laitostoimittajan tarjoamista teknologioista poistuu ja laitosinvestoinnista voidaan jätteenkäsittely jättää pois. Tämä mahdollistaa osaltaan alentuneet investointikustannukset.

Olkiluodon VLJ-luola on suunniteltu palvelemaan OL1:n ja OL2:n käytön aikana syntyvän matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoitusta. Vuoden 2013 lopussa, kun käyvien ydinvoimalaitosyksiköiden voidaan olettaa saavuttaneen käyttöikänsä puolivälin, VLJ-luolan matala-aktiivisen jätteen siilon (MAJ-siilon) kokonaistilavuudesta oli käytetty 58 % ja keskiaktiivisen jätteen siilon (KAJ-siilon) kokonaistilavuudesta vastaavasti 50 %. Ydinvoimalaitoksen laajentuessa yhdellä tai mahdollisesti useammalla ydinvoimalaitosyksiköllä myös voimalaitosjätteen loppusijoitustiloja tulee laajentaa vastaavasti. Lisäksi voimalaitosjätehuollossa on valmistauduttava käytöstä poistettavien ydinvoimalaitosyksikköjen purkujätteen loppusijoittamiseen, mikä vaikuttaa osaltaan oleellisesti loppusijoitustilan tilan tarpeeseen. VLJ-luolan arvioidaan täyttyvän 2030-luvulla ja tulevaisuuden laajennustarve on yksi KAJ-siilo ja yksi MAJ-siilo OL3:n ja mahdollisen neljännen ydinvoimalaitosyksikön käytön aikana syntyvän voimalaitosjät-

teen loppusijoitukseen sekä yhteensä neljä siiloa näiden neljän ydinvoimalaitosyksikön käytöstäpoistojätteen loppusijoitukseen. Lisäksi suuret voimakkaasti aktivoituneet komponentit, kuten reaktoripainesäiliöt ja höyrytimet tullaan käytöstäpoiston jälkeen sijoittamaan erillisiin kairanreikiin siilotilojen ulkopuolelle.

Korkea-aktiivisen käytetyn polttoaineen loppusijoituksesta vastaa TVO:n ja Fortum Power and Heat Oy:n yhteisyritys Posiva Oy. Rakentamislupahakemus loppusijoituslaitoksen rakentamiseksi jätettiin Työ- ja elinkeinoministeriölle vuoden 2012 lopussa. Rakentamislupapäätöstä odotetaan vuoden 2015 loppuun mennessä. Loppusijoituslaitos koostuu maanpäällisestä kapselointilaitoksesta sekä syvällä kalliassa olevasta loppusijoitustilasta. Käytetty ydinpolttoaine tullaan sijoittamaan kuparikapseleissa Olkiluodon peruskallioon 400–450 metrin syvyyteen.

1.2 Aikaisemmat tutkimukset

Voimalaitosjätehuollon kustannuksia on selvitetty projektiluontoisesti viimeksi vuonna 2000, jolloin tarkastelun alaisena olivat kaikki silloisen *Polttoaineen ja jätteenkäsittely - jaoksen* toiminnot. Tutkimuksen tarkoituksena oli tunnistaa toimintojen kustannusrakenne toiminnan kehittämiseksi ja tehostamiseksi. Projektin tuloksena saatiin toimintokohtaiset kustannukset jaoksen eri toiminnoille (esimerkiksi kuljetus-, varastointi- ja pakkaustoiminnoille) huomioiden operatiiviset kustannukset ilman pääomakustannuksia tai niiden kanssa. Tutkimuksen tuloksia ei sellaisenaan voida käyttää taustamateriaalina tämän diplomityön tekemisessä puutteellisten taustatietojen, tutkimuksen erilaisen rajauksen sekä jo osittain vanhentuneen tiedon takia. Tutkimus toimii kuitenkin hyvänä apuna ja vertailupohjana analysoitaessa voimalaitosjätteen käsittelyn rakennetta ja tunnistettaessa osatoimintoja. [1]

Sittemmin kustannusarvioita voimalaitosjätehuollon yksittäisille toiminnoille on tehty erilaisten investointi- ja projektiselvitysten yhteydessä. Esimerkiksi suurikokoisten romujen varastointi- ja käsittelykustannuksia arvioitiin vuonna 2009, jolloin selvitettiin jatkotoimenpiteitä matalapaineturbiinien uusinnan yhteydessä käytöstä poistettaville komponenteille. Lisäksi tämän diplomityön aiheeseen liittyen on tehty alustavia arvioita uusien ja korvaavien investointien mahdollistamasta kustannussäästöpotentiaalista. Alustaviin arvioihin perustuen todettiin diplomityön tekeminen tarpeelliseksi yksityiskohtaisemman vertailuaineiston saamiseksi. [2, 3, 4]

1.3 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Työn tarkoitus on kaksitahoinen. Työn ensimmäisenä tavoitteena on selvittää voimalaitosjätehuollon kustannusrakenne sekä kokonaiskustannukset käsittelystä loppusijoitukseen. Loppusijoituksen kustannusten kulminoituessa jätteen vaatimaan loppusijoitustilavuuteen työn yhtenä päätavoitteena on selvittää eri voimalaitosjätelajien loppusijoituskustannus tilavuusyksikköä kohden.

Työn toisena tavoitteena on tutustua markkinoilla tarjolla oleviin jätteenkäsittely-tekniologioihin sekä palveluntarjoajiin. Tarkoituksena on kartoittaa vaihtoehdot nykyisten, lähes täyden käyttöikänsä saavuttaneiden, laitteistojen ja järjestelmien korvaamiseksi uusilla sekä mahdollisuuksien mukaan tehokkaammilla ratkaisuilla. Tilavuuden määrätessä loppusijoituskustannuksia myös ratkaisujen tehokkuus arvioidaan pitkälti tilavuustehokkuuden kautta. Osana työtä analysoidaan uusien ratkaisujen mahdollistama säästöpotentiaali. Näin saatuja tuloksia verrataan perusvaihtoehtoon, jonka toteutuessa jätteenkäsittelyä ei uudisteta, vaan toimintaa jatketaan nykyisin teknologioin uusimalla vanhentuvat laitteistot ja järjestelmät uusilla vastaavilla.

Työ on rajattu koskemaan ainoastaan radioaktiivista voimalaitosjätettä eli toisin sanoen voimalaitosjätettä, joka radioaktiivisen luonteensa vuoksi vaatii teknisin ja luonnollisin estein elollisesta ympäristöstä eristetyn loppusijoituksen. Käytännössä valittu rajaus jättää valvonnasta vapautettavan sekä valvomattoman alueen jätteen tutkimuksen ulkopuolelle. Työssä ei tarkastella radioaktiivisten jätevesien puhdistusta tai jätteiden keräilyä. Tarkasteluun sisällytetään ainoastaan prosessin lopullinen jäte, sen käsittely ja loppusijoitus; esimerkiksi vesienpuhdistuksessa syntyneiden haihduttimen pohjalietteiden ja ioninvaihtohartsien kiinteytyminen ja pakkaus loppusijoitusta varten sekä jätepakkauskelle kohdistettava osuus loppusijoitustoimintojen ja -tilojen kustannuksista. Vaikka valvonnasta vapautettava jäte jätetään rajauksen ulkopuolelle, saadaan selvitettyä voimalaitosjätteen tilavuusyksikkökohtainen loppusijoituskustannus arvo myös valvonnasta vapautuksen kautta saatavalle kustannussäästölle.

Vaikka voimalaitosjätteen käsittelyn kokonaiskustannukset koostuvat monista tekijöistä, kuten investointikustannuksista, työvoimakustannuksista sekä erilaisista materiaali- ja hyödykekustannuksista, tässä työssä on keskitytty tarkastelemaan investointikustannuksia ja suoraan loppusijoitukseen sidottuja materiaalikustannuksia, kuten loppusijoituspakkausten materiaalikustannuksia. Rajaukseen päädyttiin sen selkeyden ja vertailtavuuden vuoksi. Uusien jätteenkäsittelymenetelmien muuttuvien kulujen arviointi sisältäisi huomattavia epävarmuuksia varsinkin pidemmän aikavälin tarkastelussa. Toisaalta muuttuvien kulujen kohdistaminen loppusijoitustilavuudelle on hyvin hankalaa tilojen ylläpitokulujen ollessa likimain vakioita riippumatta käsiteltävän jätteen määrästä. Loppusijoitustoiminnan kustannusten painottuessa voimakkaasti investointikustannuksiin valitun rajauksen ei odoteta vaikuttavan merkittävästi työn tuloksiin ja niiden perusteella tehtyihin johtopäätöksiin.

Koska työ aloitettiin vuonna 2013 ja tutkimusdatan päivittäminen kesken työn olisi aiheuttanut huomattavaa lisätyötä, on numeeristen lähtötietojen tarkasteluajankohta kiinnitetty vuoteen 2013. Tutkimusdatan päivittäminen kesken työn olisi osaltaan vaarantanut myös aineiston eheyden ja yhtenäisyyden. Huolimatta siitä, että numeeriset lähtötiedot jäädytettiin vuoteen 2013, työssä on huomioitu muutokset ydinenergia-alalla ja sen toimintaympäristössä sekä jätteenkäsittelyratkaisujen kehityksessä aina työn valmistumisajankohtaan asti.

1.4 Työn rakenne

Työn rakenne on jaettu neljään pääosioon. Ensimmäisessä osiossa tutustutaan työn lähtökohtiin ja aiheen teoreettiseen taustaan. Osion tarkoituksena saada kattava kuva fyysisistä ilmiöistä, periaatteista ja vaatimuksista, jotka määräävät perustan toimivan voimalaitosjätehuollon suunnittelulle, toteutukselle ja käytölle. Toisessa osiossa paneudutaan voimalaitosjätehuollon kustannusrakenteeseen ja pyritään selvittämään voimalaitosjätehuollon kustannukset nykyisin käytössä olevin teknologioin. Voimalaitosjätehuollon kustannukset toimivat perustana työn seuraaville osioille, joissa pyritään tunnistamaan voimalaitosjätehuollon kehittämisen mahdollinen kustannussäästöpotentiaali.

Työn kolmannessa osiossa tutustutaan vaihtoehtoisiin jätteenkäsittelyteknologioihin sekä palveluntarjoajiin tarkoituksena löytää potentiaaliset, luvitettavissa olevat ja taloudelliset vaihtoehdot voimalaitosjätehuollon järjestämiseksi tulevaisuudessa. Neljännessä osiossa pyritään luomaan mahdollisimman neutraali vertailuasettelu nykyisen voimalaitosjätehuollon ja uusien jätteenkäsittelyteknologioiden sekä palveluntarjoajien välille. Vertailun tarkoituksena on toimia työkaluna jätteenkäsittelyn kehittämiseksi ja optimoinnille. Arvioinnissa pyritään huomioimaan myös vanhentuvan laitekannan vaatimat lisäinvestoinnit, VLJ-luolan kapasiteetti sekä ratkaisuihin liittyvät riskit.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Jätteenkäsittelyn ja loppusijoituksen kustannusten määrittämiseksi kerättiin laajasti lähtötietoja voimalaitosjätteiden kertymisestä jätelajeittain, käsittelyprosessin kustannuksista prosessin eri vaiheissa sekä investointi- ja ylläpitokustannusten osuudesta kokonaiskustannuksiin. Statistisen tietojen keruun mahdollisti jätemäärien osalta Voimalaitosjätekirjanpitosovellus (LJK-sovellus) ja kunnossapitokustannuksien osalta kunnossapitotietokanta (KUPI). Tietojen keräämisessä ja ryhmittelyssä hyödynnettiin SAP BusinessObjects -raportointityökalua.

Investointikustannusten vuosittainen vakioitu poistokustannus määritettiin annuiteettiperiaatteella käyttäen 5 % korkokantaa ja investointityyppikohtaisesti, joko 10, 20, 30, 40 tai 60 vuoden poistoaikaa. Jättemäärien arvioinnissa ja pakkauskohtaisten kustannusten määrittämisessä käytettiin viimeisen viiden tai vastaavasti viimeisen kymmenen täyden kalenterivuoden kertyneiden jätemäärien keskiarvoa. Useamman vuoden ajanjakson huomioimista laskennassa puoltaa voimalaitoksen huoltotöiden ja jätteenkäsittelyn toimintojen jaksottaisuus, jolloin peräkkäiset vuodet voivat jätekirjanpidon mukaan poiketa jätemääriltään merkittävästi, vaikka pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna jätteiden kertyminen on perusvoimana tuotettavan ydinvoiman luonteenomaisesti tasaisempaa. Yksinkertaistettuihin laskentamalleihin perustuva laskenta suoritettiin Microsoft Office Excel -taulukkolaskentaohjelmistoa käyttäen, jota hyödynnettiin myös tulosten graafiseen raportointiin.

2 VOIMALAITOSJÄTEHUOLTO

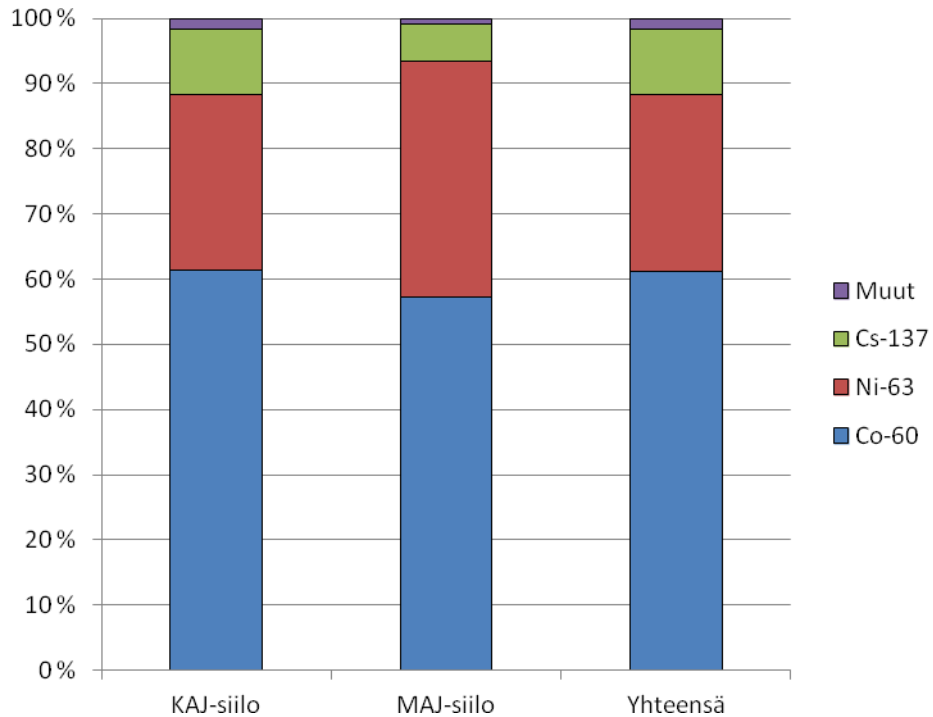
Radioaktiivisella jätteellä tarkoitetaan radioaktiivisia aineita sisältävää jätettä, jonka käsittely radioaktiivisuuden takia vaatii erityisiä toimenpiteitä. Radioaktiivisuus jätteissä vähenee radioaktiivisen hajoamisprosessin kautta. Fysikaalista prosessia ei voi nopeuttaa, minkä takia jätteet on eristettävä elinympäristöstä. Vaatimukset jätteiden eristämisen pysyvyydelle määräytyvät jätteen aktiivisuustason ja sen sisältämien radionuklidien puoliintumisaikojen perusteella. Ydinenergian käytössä ja ydinasetuotannossa syntyvää radioaktiivisia jätteitä kutsutaan alkuperän mukaan ydinjätteeksi. Ydinjätteet ovat ydinenergiain (11.12.1987/990) alaisia.

Ydinreaktorista poistettu käytetty polttoaine sekä reaktorisydänalueella voimakkaasti aktivoitunut materiaali ovat korkea-aktiivista jätettä. Ydinvoimalaitosten käytön aikana prosessin käyttö- ja huoltotoimenpiteiden seurauksena sekä voimalaitosten käytöstäpoiston yhteydessä syntyy myös merkittäviä määriä matala- ja keskiaktiivista jätettä. Tätä keski- ja matala-aktiivista jätettä kutsutaan yhteisnimityksellä voimalaitosjätteeksi. Voimalaitosjäte ei sisällä ydinpolttoainetta eikä sitä luokitella ydinmateriaaliksi.

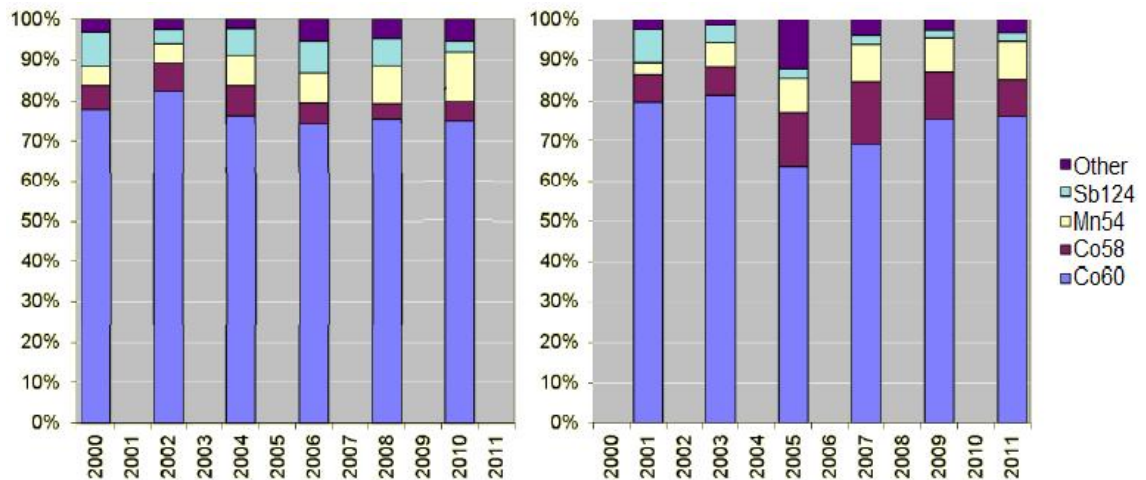
Ydinlaitoksen valvonta-alueella syntyvä jäte luokitellaan lähtökohtaisesti ydinjätteeksi. Ydinjäte, jonka aktiivisuus todetaan vähäiseksi, voidaan luokitella ei-ydinjätteeksi ja vapauttaa ydinenergiain soveltamisalasta. Menettelyä kutsutaan valvonnasta vapauttamiseksi. Valvonnasta vapautettua jäte käsitellään edelleen tavanomaisena jätteenä.

2.1 Radioaktiivisuus ydinjätteessä

Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla merkittävimmät voimalaitosjätteen säteilyturvallisuuden vaikuttavat nuklidit ovat koboltti-60 (Co-60) ja Cesium-137 (Cs-137) (*Kuva 1*). Koboltti-60 syntyy metallien seostuksessa käytetyn koboltin inaktiivisen koboltti-59 -isotoopin aktivoituessa reaktorin neutronivuossa. Aktivoitunut koboltti saostuu uudelleen prosessijärjestelmien pinnoille aiheuttaen primääripiirin ja primäärijäähdytteen käsittelyjärjestelmien kontaminoitumisen (*Kuva 2*). Cesium-137 syntyy puolestaan reaktorissa polttoaine uraanin fissiona. Voimalaitosjätteen nuklidijakaumaan vaikuttavat voimalaitostyyppi, järjestelmissä käytetyt materiaalit sekä käytettävä vesikemia.



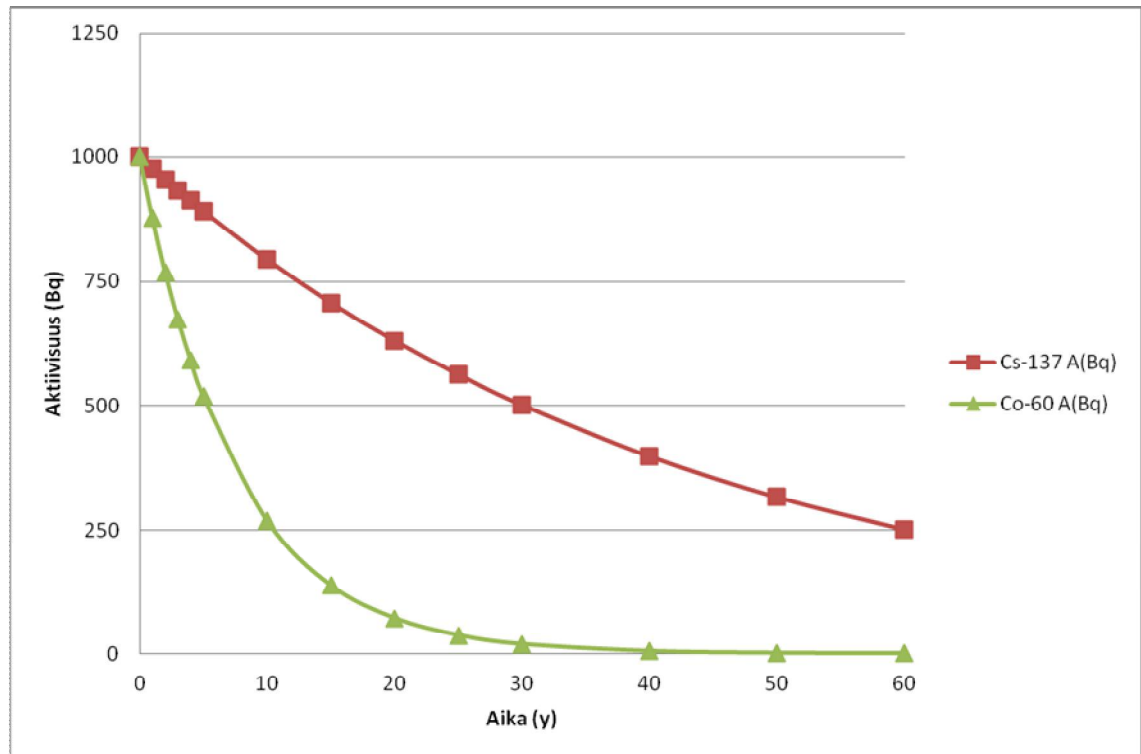
Kuva 1. Loppusijoitetun voimalaitosjätteen nuklidijakauma. [5, s. 4]



Kuva 2. Aktiivisten prosessijärjestelmien kontaminaatiomittausten nuklidijakauma perustuen lähteeseen [6].

Radioaktiiviset nuklidit hajoavat spontaanisti. Yksittäisen nuklidin hajoaminen on täysin satunnaista, mutta suurelle joukolla radioaktiivisia nuklideja voidaan määrittää hajoamistodennäköisyys aikayksikköä kohden. Hajoamistodennäköisyys voidaan ilmaista myös puoliintumisaikana. Koboltti-60:n puoliintumisaika on 5,3 vuotta. Tämä tarkoittaa, että jätteen koboltti-60 -aktiivisuus laskee puoleen alkuperäisestä aktiivisuudesta 5 vuoden ja 4 kuukauden kuluessa. Cesium-137:n puoliintumisaika on vastavasti 30,1 vuotta. Puoliintumisaika on kullekin nuklidille ominainen. Mikäli lähteessä on useita eri nuklideja, niiden kaikkien puoliintumisaika on huomioitava erikseen. Ko-

boltti-60:n ja Cesium-137:n aktiivisuuden pienentyminen ajan funktiona on esitetty kuvassa 3. [7, 8]



Kuva 3. Cs-137 ja Co-60 -nuklidien aktiivisuuden pienentyminen ajan funktiona.

Radioaktiivinen hajoaminen vapauttaa energiaa ionisoivana säteilynä. Säteilylle voi altistua ulkoisesti, niin kutsutun suoran säteilyn kautta, jolloin altistuminen tapahtuu jouduttaessa säteilykentän vaikutusalueelle, tai sisäisesti, niin kutsutun sisäisen kontaminaation kautta, jolloin radioaktiiviset aineet kulkeutuvat kehon sisälle esimerkiksi ravinnon tai hengitysilman kautta. Ionisoivalle säteilylle luonteenomaista on sen kyky aiheuttaa atomien ionisaatiota ja virittymistä. Elävässä kudoksessa ionisaatio vaurioittaa solun makromolekyylejä. Biologisten vaikutusten kannalta vaarallisinta on, jos säteilyn kohdemolekyylinä on solun perimäaines - DNA. Vaurio DNA:ssa voi johtaa esimerkiksi perimän vaurioitumiseen, solukuolemaan tai solun muuntumiseen syöpäsoluksi. Mikäli solun korjausmekanismi pystyy korjaamaan vaurion virheettömästi, solu palautuu normaalitilaansa. Vauriomekanismi on vastaava kaikissa elollisissa soluissa, eläin- ja kasvikunnassa. Biologisilta haittavaikutuksilta voi suojautua vain välttämällä altistumisen. [9]

2.2 Lainsäädäntö ja ydinvoimalaitosohjeet

Ydinenergian käyttöä ja valvontaa säädellään kotimaisella lainsäädännöllä ja turvallisuusmääräyksillä, jotka on laadittu huomioiden kansainväliset sopimukset ja suositukset. Suomalaisen säädöshierarkian perusta on perustuslaki, jossa säädetään kansalaisen

perusoikeudet turvallisuuteen, omaisuuden turvaan sekä mahdollisuuteen vaikuttaa elinympäristöään koskevaan päätöksentekoon. Lisäksi perustuslaissa asetetaan vastuu luonnosta ja ympäristöstä huolehtimiseen. [10]

Ydinenergian käytöstä säädetään Ydinenergialaissa, Ydinenergia-asetuksessa sekä valtioneuvoston vahvistamissa yleisissä turvallisuusmääräyksissä, joita täydentävät valtioneuvoston ja tasavallan presidentin päätökset. Lainsäädäntöön kirjattujen valtuuksien nojalla *Säteilyturvakeskus* (STUK) julkaisee ydinvoimalaitosohjeita (YVL-ohjeet), joissa esitetään ydinenergian käyttöä koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset sekä *STUK:n* valvontamenettelyt. [11, 12] Ydinenergian käyttöä koskevan säännösten hierarkiaa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Ydinenergian käyttöä koskevan säännösten hierarkia.

2.2.1 Lainsäädäntö

Ydinenergian käyttö on luvanvaraista toimintaa ja luvanhaltijan velvollisuutena on pitää huolehtia ydinenergian käytön turvallisuudesta myös huolehtia toiminnan seurauksena syntyneistä ydinjätteistä ja ydinjätehuollon kaikista kustannuksista myös ydinenergian käytön päättymisen jälkeen. Ydinjätehuollon velvoitteet ja sen kustannusten kattamiseksi tarvittavat rahoitusjärjestelyt määritellään Ydinenergialaissa (11.12.1987/990). Jätehuoltovelvolliset maksavat vuosittain vahvistettavan summan valtion ydinjätehuoltorahastoon, joka toimii työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) alaisena. [11]

Erityisesti ydinjätehuoltoa koskevat Valtioneuvoston asetus ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuudesta (27.11.2008/736), jossa esitetään loppusijoituksessa noudatettavat turvallisuusperiaatteet ja raja-arvot loppusijoituksesta mahdollisesti aiheutuville säteilyannoksille, sekä Käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuudesta tehty yleissopimus (SopS 36/2001), jonka tavoitteena on kansainvälisen yhteistyön kautta saavuttaa ja ylläpitää käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen

huollossa korkea turvallisuustaso [13, 14]. Tähän *Kansainvälisen atomienergiajärjestön* (IAEA) alaisuudessa laadittuun yleissopimukseen on tähän mennessä (9. lokakuuta 2013) sitoutunut kaikkiaan 70 sopimusosapuolta, pääasiassa valtioita [15].

Kansallisesti ydinjätehuollosta on linjattu, että radioaktiivisten jätteiden loppusijoitus toteutetaan Suomessa geologisena loppusijoituksena kallioperään. Korkea-aktiivinen käytetty ydinpolttoaine on tarkoitus kapseloida ja sijoittaa noin 400–600 metrin syvyydelle. Matala- ja keskiaktiiviset jätteet loppusijoitetaan noin 60–100 metrin syvyyteen. Kallioperään louhitut matala- ja keskiaktiivisten voimalaitosjätteiden loppusijoitustilat voimalaitosten yhteydessä Loviisassa ja Eurajoen Olkiluodossa on otettu käyttöön 1990-luvulla. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus tullaan nykyisten luvanhaltijoiden osalta keskittämään Olkiluotoon, missä loppusijoitustoiminnan on tarkoitus alkaa 2020-luvun alkupuolella.

2.2.2 Ydinvoimalaitosohjeet

Ydinenergialain mukaisesti *Säteilyturvakeskuksen* tehtävänä on asettaa ydinenergialain vaatimukset täyttävän turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. *Säteilyturvakeskuksen* turvallisuusvaatimukset velvoittavat luvanhaltijaa. Luvanhaltijalla on kuitenkin oikeus esittää vaihtoehtoinen menettelytapa tai ratkaisu, mikäli tämä pystyy osoittamaan lain mukaisen turvallisuustason täyttymisen.

YVL-ohjeet on jaettu aihealueittaan viiteen pääryhmään. Ydinjätehuoltoa koskevat YVL-ohjeet kuuluvat ydinmateriaaleja ja jätteitä käsittelevään ohjeryhmään D, joka käsittää kaikkiaan 6 ohjetta liittyen ydinmateriaalien ja -jätteiden valvontaan, kuljetukseen, käsittelyyn, varastointiin, loppusijoitukseen sekä tuotantoon. Erityisesti voimalaitosjätehuollon suunnittelua ja toteutusta käsitellään ohjeessa *D.4 Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto* sekä loppusijoitusta ohjeessa *D.5 Ydinjätteiden loppusijoitus*. YVL-ohjeiston perusrakenne sekä ydinjätehuoltoa käsittelevät ohjeet on esitetty taulukossa 1. [16]

Taulukko 1. Ydinjätehuoltoa käsittelevät ohjeet YVL-ohjeistossa. [16]

A	Ydinlaitoksen turvallisuuden hallinta
B	Ydinlaitoksen ja sen järjestelmien suunnittelu
C	Ydinlaitoksen ja ympäristön säteilyturvallisuus
D	Ydinmateriaalit ja jätteet
	D.1 Ydinmateriaalivalvonta (15.11.2013)
	D.2 Ydinainesten ja ydinjätteiden kuljetus (15.11.2013)
	D.3 Ydinpolttoaineen käsittely ja varastointi (15.11.2013)
	D.4 Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto (15.11.2013)
	D.5 Ydinjätteiden loppusijoitus (15.11.2013)
	D.6 Uraanin ja toriumin tuotanto (julkaisematon)
E	Ydinlaitoksen rakenteet ja laitteet

Ohjeessa *D.4 Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto* asetetaan nimensä mukaisesti yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden eli toisin sanoen voimalaitosjätteiden käsittelylle sekä ydinlaitosten käytöstäpoistolle. Ohje esittää perustason voimalaitosjätteiden käsittelyn ja varastoinnin ydin- ja säteilyturvallisuudelle; järjestelmien, tilojen ja toimintojen suunnittelulle; käyttötoiminnalle sekä turvallisuusvaatimusten täyttymisen osoittamiselle ja viranomaisvalvonnalle. Ohje, paitsi määrittelee vaadittavat käsittely- ja varastointitilat, antaa peruseriaatteet voimalaitosjätteen käsittelyyn, kuten jätteiden kertymisen rajoittamisen, tilavuuden pienentämisen ja turvalliseen loppusijoitukseen tähtäävät käsittelytoiminnot. Ohjeessa määritellään lisäksi voimalaitosjätehuollon suunnitteluperusteet väestön ja henkilökunnan säteilyaltistuksen minimoimiseksi sekä velvollisuus häiriö- ja onnettomuustilanteisiin varautumiseen. [17]

Ohje *D.5 Ydinjätteiden loppusijoitus* esittää yksityiskohtaiset turvallisuusohjeet ydinjätteiden kallioperäloppusijoitukseen. Ohjeessa käsitellään voimalaitosjätteen loppusijoituksen lisäksi käytetyn polttoaineen loppusijoitusta. [18] Ydinenergialain ja Valtionneuvoston asetuksen mukaisesti ydinjätteiden loppusijoituksen suunnittelu perustuu siihen, ettei säteilyaltistus loppusijoituksen jälkeen ylitä loppusijoitusajankohtana hyväksyttävänä pidettyä tasoa, ja että pitkäaikaisturvallisuus varmennetaan toisiaan täydentävin vapautumisestein [11, 13].

Uuden rakenteen mukaisesti täysin uudistetut YVL-ohjeet julkaistiin lähes koko ohjeistolaajuudessa marraskuussa 2013, ja ne astuivat voimaan tuotannossa olevilla ydinvoimalaitoksilla 1.9.2015. Uudet YVL ohjeet on laadittu *Länsi-Euroopan turvallisuusviranomaisten yhteistyöryhmän* (WENRA) suositusten pohjalta, ja uudistuksen yhtenä osatarkoituksena on saattaa Suomen YVL-ohjeisto paitsi rakenteeltaan myös turvallisuusvaatimuksiltaan Euroopassa yhteisesti hyväksytyille tasolle. Uudistettuja YVL-ohjeita sovelletaan sellaisinaan mahdollisten uusinvestointien yhteydessä. Jo käytössä tai rakenteilla olevien laitosten osalta uusia YVL-ohjeita tullaan soveltamaan mukaillen. Vuoden 2014 aikana luvanhaltijat toimittivat STUK:lle lausuntonsa uusien YVL-ohjeiden täyttymisestä ja täyttymisen tueksi toteutettavista parannuksista jo käytössä olevilla laitoksilla. Lausuntojen perusteella STUK esittää vaatimuksia korjaavien toimenpiteiden toteuttamisesta ja niiden aikataulusta. Kuitenkin esimerkiksi rakennusvaihetta tai rakenteellisia periaatteita koskevia vaatimuksia ei luonnollisesti voida soveltaa jo rakennettuihin ydinlaitoksiin. Vastaava lausunto uusien YVL-ohjeiden täyttymisestä rakenteilla olevan OL3:n osalta tullaan jättämään STUK:lle käyttö lupahakemuksen yhteydessä vuonna 2016. [19]

2.3 Voimalaitosjätehuollon peruseriaatteet

Ydinjätehuollon johtava periaate on, että ydinenergian käytössä syntyvän ydinjätteen määrä on pidettävä niin pienenä, sekä aktiivisuuden että määrän suhteen, kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Lisäksi ydinjätehuoltoa ohjaa periaate, jonka mu-

kaisesti Suomessa tapahtuneen ydinenergian käytön yhteydessä tai seurauksena syntyneet ydinjätteet, on käsiteltävä, varastoitava ja sijoitettava pysyväksi tarkoitettulla tavalla Suomeen. Vastaavasti muualla kuin Suomessa tapahtuneen ydinenergian käytön yhteydessä tai seurauksena syntyneitä ydinjätteitä, ei saa käsitellä, varastoida tai loppusijoittaa Suomessa.

Biologisten haittavaikutusten minimoimiseksi radioaktiivinen jäte on eristettävä ympäristöstään. Tämä tarkoittaa suoran lähikontaktin estämistä sekä radioaktiivisten aineiden eristämistä ravintoketjusta. Valtioneuvoston asetuksen 736/2008 mukaisesti loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden on perustuttava toisiaan täydentävien vapautumisesteiden aikaansaamiin turvallisuustoimintoihin siten, ettei yksittäisen toiminnon vajavuus tai ennustettavissa oleva geologinen muutos vaaranna pitkäaikaisturvallisuutta. Vapautumisesteet voidaan jakaa karkeasti kolmeen tasoon: 1. loppusijoituspaikka, 2. sijoitustilan rakenteelliset tekniset esteet ja 3. jätematriisin ominaisuudet. [13]

Ydinvoimalaitosohjeessa *D.5 Ydinjätteiden loppusijoitus* asetetaan toimintakykytaivoitteet teknisten vapautumisesteiden aikaansaamille turvallisuustoiminnoille. Kallioperään loppusijoitettavat lyhytikäiset jätteet, käytännössä matala- ja keskiaktiiviset voimalaitosjätteet, on eristettävä tehokkaasti teknisin vapautumisestein vähintään noin 500 vuoden ajaksi. Tavoitteena on oltava myös, etteivät teknisten vapautumisesteiden ominaisuudet loppusijoitustiloissa muutu ajan mittaan tavalla, joka voi vaikuttaa haitallisesti turvallisuustoimintoihin. Teknisinä vapautumisesteinä käsitetään jätematriisi, jätepakkaus ja sitä ympäröivä puskuri sekä loppusijoitustilojen täyttö ja sulkemirakenteet. Vapautumisesteiden turvallisuustoimintoina huomioidaan muun muassa radioaktiivisten aineiden sitoutuminen jätematriisiin, jätepakkausten korroosion ja mekaanisen rasituksen kestävyys, puskurin eristävyys sekä puskurin, täytön ja sulkemirakenteiden muita vapautumisesteitä ylläpitävät ja radioaktiivisten aineiden kulkeutumista rajoittavat ominaisuudet. Luonnollisena vapautumisesteenä käsitetään puolestaan loppusijoitustiloja ympäröivä kallioperä. Kallioperän aikaansaamina turvallisuustoimintoina huomioidaan kallion vakaus ja tiiviys, pohjaveden vähäinen virtaus ja suotuisa pohjavesikemia, radioaktiivisten aineiden pidättyminen kallioon sekä suoja luonnonilmiöitä vastaan. [18] Ydinjätteen loppusijoituksen väestölle aiheutuva säteilyannos on arvioitava vähintään usean tuhannen vuoden ajanjaksolla [13]. Loppusijoituksen turvallisuusarvioita laatiessa oletetaan, että tieto loppusijoitetusta jätteestä häviää 200 vuoden kuluessa loppusijoituslaitoksen sulkemisesta [18].

3 VOIMALAITOSJÄTEHUOLTO OLKILUODOS- SA

Ydinenergialain mukaisesti luvanhaltijalla on velvollisuus huolehtia ydinenergian käytössä suoraan tai välillisesti syntyvien radioaktiivisten jätteiden käsittelystä ja loppusijoituksesta. Olkiluodon ydinvoimalaitoksella voimalaitosjätehuolto on suunniteltu toteuttavaksi kokonaisuudessaan laitospaikalla käsittelystä loppusijoitukseen. Voimalaitosyksiköillä on kullakin oma jäterakennus, johon on sijoitettu radioaktiivisten jätevesien käsittelyjärjestelmien lisäksi tilat radioaktiivisten jätteiden käsittelyyn, pakkaamiseen ja varastointiin. Lisäksi laitosalueelle on myöhemmin rakennettu kaikkia yksiköitä palvelevia lisätiloja kiinteiden radioaktiivisten jätteiden keskitettyyn käsittelyyn ja varastointiin (matala-aktiivisen jätteen varasto, MAJ-varasto, sekä keskiaktiivisen jätteen varasto, KAJ-varasto). Ulkopuolista voimalaitosjätteen käsittelyä on hyödynnetty 2010-luvulla suurien komponenttien romutusprojekteissa. Ulkopuolisen palvelun hyödyntäminen mahdollistaa loppusijoitukselle merkittävästi paremman tilavuustehokkuuden suurien komponenttien käsittelyssä.

Radioaktiivisten jätteiden määrä pyritään minimoimaan huolto- ja korjaustöiden suunnittelulla, kontaminoituneiden komponenttien dekontaminoinnilla sekä hyvin vähän kontaminoituneen jätteen valvonnasta vapauttamisella. Tuotetut radioaktiiviset jätteet pyritään käsittelemään niin, että lopullinen jäte on tilavuudeltaan mahdollisimman pieni. Käytettyjä tilavuuden pienennysmenetelmiä ovat esimerkiksi haihdutus, puristus ja pilkkominen. Jätteet lajitellaan ja luokitellaan syntypaikalla jatkokäsittelyn, varastoinnin ja loppusijoituksen kannalta tarkoituksenmukaisella tavalla. Kemiallisilta, fyysisiltä tai aktiivisuusomaisuuksiltaan selvästi toisistaan eroavat jätteet käsitellään erikseen. Menettelyllä pyritään välttämään radioaktiivisuuden leviäminen sekä pyritään takaamaan kullekin jätelaadulle optimaalinen käsittely.

Ydinjätehuollosta Olkiluodon ydinvoimalaitoksella vastaa TVO:n johto. Organisaation sisällä jätteenkäsittelyjärjestelmien suunnittelusta ja muutostöistä sekä tutkimuksesta ja kehityksestä vastaa *Tekniset palvelut*, ydinturvallisuudesta vastaa *Turvallisuus* sekä operatiivisesta käyttötoiminnasta *Sähköntuotanto*. Voimalaitosjätteen käsittelyn käytännön toiminnoista vastaa *Sähköntuotannon Tuotannon tuki -yksikön Polttoaineen- ja jätteenkäsittely -tiimi*. TVO-konsernin organisaation toimintamalli on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. TVO:n organisaation toimintamalli [20].

3.1 Syntyvät voimalaitosjätteet ja niiden käsittely

Ydinvoiman tuotannossa syntyy erilaisia jätteitä, jotka luokitellaan jätejakeisiin paitsi jätteen ominaisuuksien myös niiden alkuperän ja aktiivisuuden perusteella. Voimalaitoksen apujärjestelmät, kuten jäähdytys-, lämmitys-, ja varavoimajärjestelmät, eivät sisällä radioaktiivisia aineita. Nämä järjestelmät voidaan sijoittaa erilleen radioaktiivisista järjestelmistä, niin kutsuttuihin puhtaisiin tiloihin valvomattomalle alueelle, jolloin tilojen käyttöä tarvitse rajoittaa ja valvoa. Näiden järjestelmien käytössä sekä huolto- ja ylläpitotöissä syntyvä jäte on alkuperältään ei-aktiivista, ja se käsitellään tavanomaisen teollisuusjätteen tavoin. Vastaavasti radioaktiivisia aineita sisältävät järjestelmät sijoitetaan valvottuihin tiloihin, niin kutsutulle valvotulle alueelle, jonne kulku on rajattu ja jossa työskentelevien henkilöiden säteilyaltistusta seurataan henkilökohtaisin annosmittauksin. Valvotulla alueella käyttötoiminnoissa sekä huolto- ja ylläpitotöissä syntyvä niin kutsuttu voimalaitosjäte oletetaan alkuperänsä perusteella olevan aktiivista ja se käsitellään noudattaen Ydinenergialaissa ja YVL-ohjeissa annettuja turvallisuusvaatimuksia.

Huolellisella lajittelulla pyritään takaamaan kullekin jätejakeelle soveltuvin jatkokäsittely sekä välttämään radioaktiivisen kontaminaation leviäminen aktiivisemmista jätteistä vähemmän aktiivisiin jätteisiin. Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla voimalaitosjäte käsitellään fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien mukaan seuraavissa jakeissa: huoltojäte, metalli- ja sekaromu, ioninvaihtohartsit, suodatinsauvat, jäteöljy sekä nesteet ja lietteet. Kuvassa 6 esitetään voimalaitosjätteiden lajittelu eri jätejakeisiin.



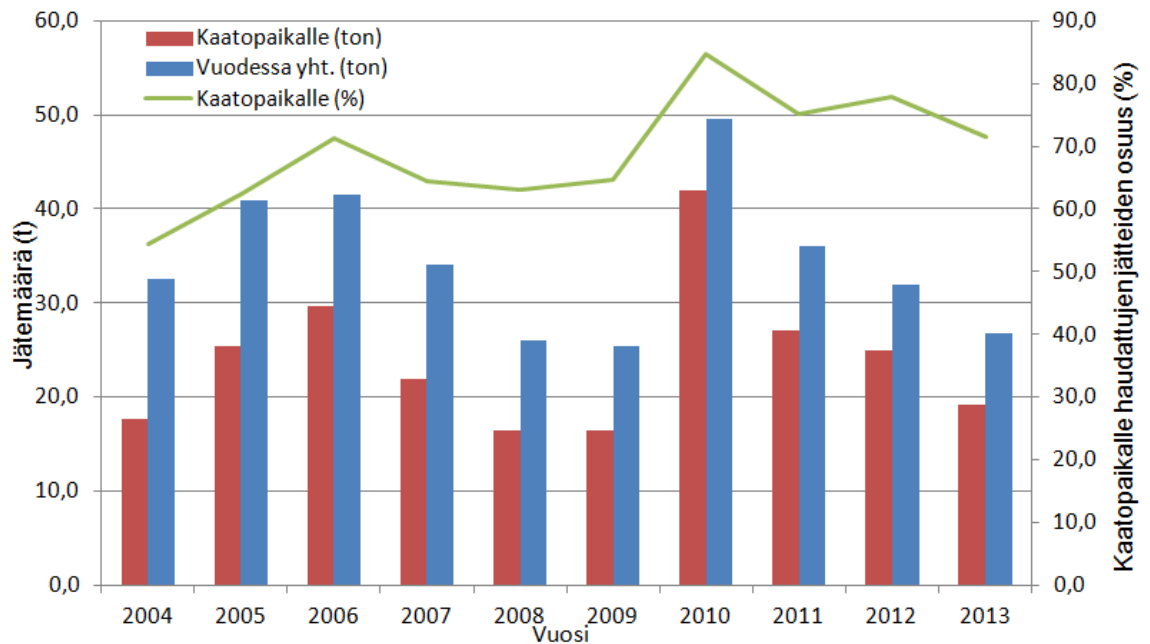
Kuva 6. Voimalaitosjätteiden lajittelu eri jätelajeisiin.

3.1.1 Huoltojäte

Huoltojäte on poikkeuksetta matala-aktiivista ja koostuu pääasiassa muovi-, kangas- ja paperijätteestä. Huoltojätettä syntyy puhtaanapidossa sekä normaalin tuotantoajon sekä huoltotöiden yhteydessä käytettäessä suojamateriaaleja ja suojaruusteita. Huoltojätteestä suurin osa on vain hyvin vähän kontaminoitunutta, ja se voidaan vapauttaa valvonnasta *YVL D.4* -ohjeen mukaisin menettelyin sijoitettavaksi konventionaaliselle kaatopaikalle. VLJ-luolaan loppusijoitettava jäte puristetaan 200 litran tynnyreihin, jotka voidaan edelleen puristaa puoleen alkuperäisestä tilavuudestaan ennen pakkaamista betoniin loppusijoituslaatikoihin. Käsitellyn huoltojätteen loppusijoitustiheys on noin 840 kg/m³. OL3:n huoltojätteet tullaan käsittelemään samoja menetelmiä käyttäen.

Huoltojätettä syntyy OL1:n ja OL2:n toiminnassa vuosittain yhteensä noin 34 tonnia. Tästä valvonnasta vapautettavaa jätettä on noin 24 tonnia ja VLJ-luolaan sijoitettavaa jätettä vain noin 10 tonnia. OL3:n toiminnasta odotetaan aiheutuvan 29 tonnia huoltojätettä, josta valvonnasta vapautettavaa huoltojätettä olisi 20 tonnia ja VLJ-luolaan loppusijoitettavaa vastaavasti 9 tonnia.

Valvonnasta vapautuksen suhteellista osuutta on pystytty kasvattamaan tehostamalla syntypaikkalajittelua. Kun viiden vuoden jaksolla vuosina 2004 - 2008 vapautettiin valvonnasta keskimäärin 63 % huoltojätteestä, vastaavalla jaksolla 2009 - 2013 osuus oli noin 75 %. Kuvassa 7 havainnollistetaan huoltojätteiden määrän sekä valvonnasta vapautetun huoltojätteen osuuden kehittymistä vuosina 2004 - 2013.



Kuva 7. Valvonnasta vapautettujen sekä kaikkien syntyneiden huoltojätteiden määrä sekä valvonnasta vapautettujen huoltojätteiden suhteellinen osuus vuosina 2004-2013.

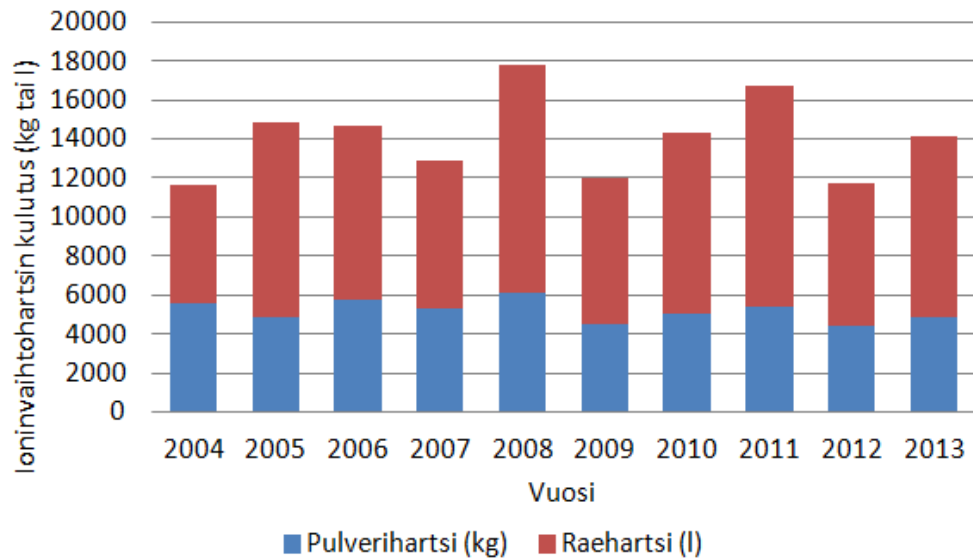
3.1.2 Ioninvaihtohartsit

Voimalaitosten ja käytetyn polttoaineen (KPA-)varaston radioaktiivisten vesien puhdistuksessa käytetään ioninvaihtohartseja. Prosessivesien epäpuhtaudet ovat pääasiassa prosessimateriaaleista peräisin olevia korroosiotuotteita, joista osa on aktivoitunut reaktoripiirissä sydämen neutronivuossa. Ioninvaihtohartsin sitoutuneiden aktivoituneiden korroosiotuotteiden vaikutuksesta ioninvaihtohartsien aktiivisuus nousee korkeaksi ja käytöstä poistettu ioninvaihtohartsi luokitellaan keskiaktiiviseksi jätteeksi.

Ioninvaihtohartsit on kiinteytettävä ennen loppusijoitusta. OL1:n, OL2:n ja KPA-varaston hartsijätteet kiinteytetään sekoittamalla bitumiin. Sekoituksen jälkeen homogeeninen tuote pakataan 200 litran tynnyriin, jotka loppusijoitetaan edelleen betonisessa loppusijoituslaatikossa. OL3:lla käytetyt ioninvaihtohartsit kuivataan yhdessä neste-mäisten prosessijätteiden kanssa alipaineen avulla suoraan loppusijoitustynnyriin. Pääasiassa kemiallisesti aggressiivisia epäorgaanisia suoloja sisältävä jäte tullaan edelleen käsittelemään riittävän pidättyvyyden varmistamiseksi. Loppusijoituksen mahdollistama käsittelykonsepti tullaan määrittelemään myöhemmin.

Prosessi- ja jätevesien puhdistushartsien käyttöä optimoidaan niin, että ioninvaihtohartsijätteen määrä pysyy mahdollisimman pienenä, mutta prosessivedet riittävän puhtaina turvallisen ja luotettavan käyttötoiminnan takaamiseksi. Vuosittain OL1:n ja OL2:n veden puhdistuksessa kuluu yhteensä keskimäärin 5200 kg pulverimaista (pulverihartsi) ja 8900 litraa raemaista ioninvaihtohartsia (raehartsi). Ioninvaihtohartsien vaihtotaajuus on suoraan riippuvainen puhdistettavan veden sisältämien epäpuhtauksien ja

ioninvaihtohartsien hajoamisen kautta syntyvien epäpuhtauksien määrästä. Prosessin epäpuhtaudet ja mahdolliset merivesivuodot johtavat tiheämpään vaihtotarpeeseen ja sitä kautta myös suurempaan määrään radioaktiivista hartsijätettä. Lisäksi suodattimilla käytetään pulverimaisen hartsin käytön yhteydessä neutraalia mekaanista massaa, jota kuluu noin puolet pulverimaisen ioninvaihtohartsin määrästä eli noin 2600 kg vuodessa. Käytetty neutraali massa käsitellään yhdessä käytetyn ioninvaihtohartsin kanssa. Kuvas-
sassa 8 on esitetty pulveri- ja raehartsin kulutus OL1:llä ja OL2:lla vuosina 2004 - 2013. [21]



Kuva 8. Pulveri- ja raehartsin kulutus OL1:llä ja OL2:lla vuosina 2004 - 2013. [21]

Ioninvaihtohartsin kiinteytyminen muuttaa oleellisesti loppusijoitettavan jätteen tilavuutta. Arvioitaessa jätemäärää loppusijoitustilavuutena on huomioitava käsittelyprosessin eri vaiheet, joita OL1:llä ja OL2:lla ovat kuivaus ja sekoitus bitumiin. Raehartsi sisältää prosessiin annosteltaessa huomattavasti enemmän vettä kuin pulverihartsi. Bitumointiaessa keskimäärin puolet tynnyriin tilavuudesta täytetään hartsilla ja puolet bitumilla. Kokemuspäisesti on arvioitu, että verrattuna alkuperäiseen annosteluun bitumointi käsittelyssä 200 litran tynnyriin kiinteytetään 80 kg pulverihartsia tai vastaavasti 200 litraa raehartsia. Vuosittaisilla keskimääräisillä ioninvaihtohartsin kulutusarvoilla tämä tarkoittaa noin 97 tynnyriä kiinteytettyä pulverihartsia ja 44 tynnyriä kiinteytettyä raehartsia. Kun verrataan ioninvaihtohartsin alkuperäistä tilavuutta (tilavuus ilman vapaata vettä), käsittelyssä syntyneen loppusijoitettavan jätteen tilavuuteen voidaan käsittelylle määrittää tilavuuden pienentymiskerroin. Bitumointikäsittelylle kerroin saa arvon 0,32, mikä tarkoittaa, että loppusijoitettava jäte vie noin kolme kertaa alkuperäisen ioninvaihtohartsin tilavuuden.

OL3:n prosessivesien puhdistuksessa odotetaan syntyvän noin 2 m³ käytettyjä ioninvaihtohartseja vuodessa. Ioninvaihtohartsin ja muiden nestemäisten jätteiden yhteiskuivauksessa, hartsia annostellaan kuivaukseen 125 litraa, ja se varaa 200 litran tynnyristä 90 litran tilan. Hartsin kuivauksen tilavuuden pienentymiskerroin on siis noin 1,4

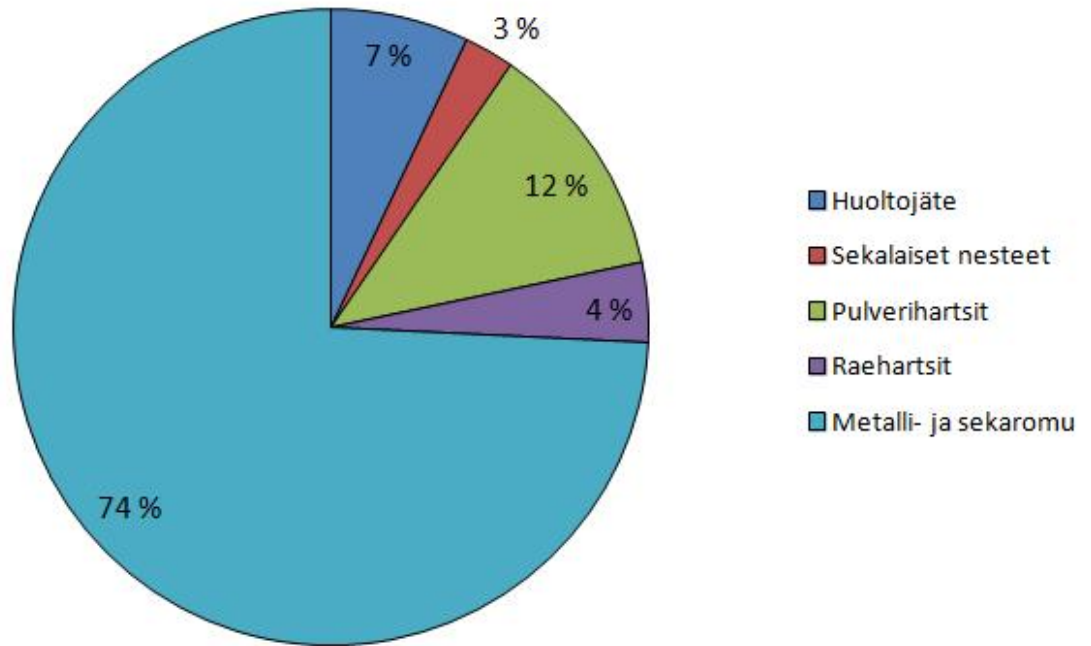
ja vuosittaisen kuivatun ionivaihtohartsijätteen tilavuus vastaa noin seitsemää 200 litran tynnyriä. [22] Kuivatun hartsijätteen kemiallinen koostumus poikkeaa kuitenkin merkittävästi OL1:n ja OL2:n bitumoidun hartsijätteen koostumuksesta, jota on käytetty suunnitteluperusteena keskiaktiivisen jätteen loppusijoitustilojen suunnittelussa, eikä kuivatun hartsijätteen loppusijoitus VLJ-luolaan nykyisin käytössä olevin menetelmin ole mahdollista. Valittava loppusijoituskonsepti voi vaikuttaa merkittävästi loppusijoituksen lopulliseen tilavuustehokkuuteen.

3.1.3 Metall- ja sekaromu

Metalli- ja sekaromua syntyy laitosten huoltotöiden yhteydessä prosessijärjestelmistä poistetuista komponenteista sekä muissa prosessin tai prosessitilojen kunnossapitoon ja uusintaan liittyvissä töissä. Lisäksi metalliromua ovat prosessivesien puhdistuksen mekaanisten suodattimien käytöstä poistetut rakenteet. Loppusijoitettava romu käsitellään tilavuustehokkuuden parantamiseksi mahdollisuuksien mukaan katkomalla, kokoon puristamalla, murskaamalla tai muita mekaanisia menetelmiä käyttäen. Mikäli se on työntekijöiden säteilyaltistuksen ja jätteenkäsittelyn kokonaistyömäärän ja vaativuuden kannalta perusteltua, kontaminoituneet metallijätteet voidaan myös dekontaminoida helposti irtoavista radioaktiivisista aineista ennen jatkokäsittelyä. VLJ-luolaan sijoitettava tiivistetty romu pakataan suoraan betonisiin loppusijoituslaatikoihin. Pakatun romun tiheys on loppusijoitettaessa noin 770 kg/m^3 .

Reaktorin sisäosien sekä polttoaine- ja säätösauvarakenteiden romutettavat voimakkaasti aktivoituneet komponentit välivarastoidaan reaktorihallin tai OL3:n tapauksessa polttoainerakennuksen vesialtaissa. Lievästi aktivoitunut tai kontaminoitunut sisäosien romu poistetaan altaasta loppusijoitukseen jo käytön aikana. Voimakkaasti kontaminoitunut romu loppusijoitetaan käytöstäpoiston yhteydessä yhdessä reaktoripaineastian kanssa.

Metalli- ja sekaromua kertyy pääasiassa suurien muutos- ja korjaustöiden yhteydessä, joten voimalaitosten ikääntyessä ja muutos- ja korjaustöiden yleistyessä myös metalli- ja sekaromua kertyy enemmän. OL1 ja OL2 ovat nyt yli kolmenkymmenen tuotantovuoden jälkeen siinä vaiheessa, että suurin osa syntyvästä jätteestä on metalli- ja sekaromua. Vuosina 2004–2013 radioaktiivista metalli- ja sekaromua on OL1:n ja OL2:n toiminnan yhteydessä syntynyt keskimäärin 135 m^3 vuodessa, mikä vastaa tilavuuksina vertailtuna 74 prosenttia kaikesta tuotetusta VLJ-luolaan loppusijoitettavasta voimalaitosjätteestä (Kuva 9). 90 prosenttia tuotetusta romusta on luokiteltu matala-aktiiviseksi ja 10 prosenttia keskiaktiiviseksi jätteeksi. Tarkasteluajanjakson aikana hyödynnettiin lisäksi ulkopuolista romutuspalvelua suurten komponenttien romutuksessa, minkä ansiosta alun perin tilavuudeltaan 1040 m^3 :n komponenttien loppusijoitustilavuus saatiin pienentymään 75 m^3 :iin. Olkiluodossa käytettävissä olleiden käsittelymenetelmin toteutettu romutus olisi johtanut huomattavasti suurempaan loppusijoitustilavuuteen. OL3:n toiminnassa odotetaan syntyvän tuotantokäytön alkuvuosina korkeintaan vain noin 10 m^3 metalli- ja sekaromua vuodessa.



Kuva 9. Eri voimalaitosjätelajien osuus tuotetusta kokonaisjättemäärästä vuosina 2004–2013.

Myös metalli- ja sekaromusta suuri osa on vain hyvin vähän kontaminoitunutta, ja se voidaan vapauttaa valvonnasta *YVL D.4* -ohjeen mukaisin menettelyin uudelleen käytettäväksi tai kierrätykseen. Valvonnasta vapautettava romu on peräisin pääasiassa prosessitilojen tai radioaktiivisuudesta puhtaiden apuprosessien muutos- ja korjaustöistä. Vuosina 2004–2013 metalli- ja sekaromua on vapautettu valvonnasta keskimäärin noin 71 000 kg, joka vastaa noin 41 prosenttia kaikesta samalla aikavälillä tuotetusta romusta. Myös metalli- ja sekaromun valvonnasta vapautusastetta on pyritty parantamaan tehostamalla syntypaikkalajittelua, ja keskimääräinen vuosittainen valvonnasta vapautetun romun määrä onkin noussut viimeisen viiden vuoden ajanjaksolla 74 000 kg:aan. [23]

3.1.4 Sekalaiset nesteet ja lietteet sekä jäteöljy

Nestemäistä jätettä syntyy lähinnä erilaisten liuotin- ja happopesujen ja dekontaminointien yhteydessä. Luonteeltaan nestemäiset jätteet voivat olla esimerkiksi orgaanisia liuottimia tai dekontaminoinnissa käytettyjä happoja. Lietteitä syntyy pumppukaivojen ja säiliöiden pohjalle laskeutuvasta kiintoaineesta, jätevesien separoinnista, dekontaminoinnin märkäpuhalluksesta sekä haihduttimien tyhjennysvesistä. OL1:llä ja OL2:lla nesteet ja lietteet käsitellään alipainehaihduttimella, jonka jälkeen väkevöitynyt konsentraatti kiinteytetään suoraan 200 litran tynnyriin käyttäen jätteen kemiallisista ominaisuuksista riippuen joko betonia tai tarkoituksen mukaista erikoisementtiä. Lietteitä voidaan myös bitumoida yhdessä käytettyjen ioninvaitohartsien kanssa.

Jäteöljyä syntyy öljynvaihtohuoltojen yhteydessä sekä öljyjärjestelmien vuodoista. Kaikki tuotettu jäteöljy käsitellään keskitetysti KPA-varastolla. Jäteöljy puhdistetaan

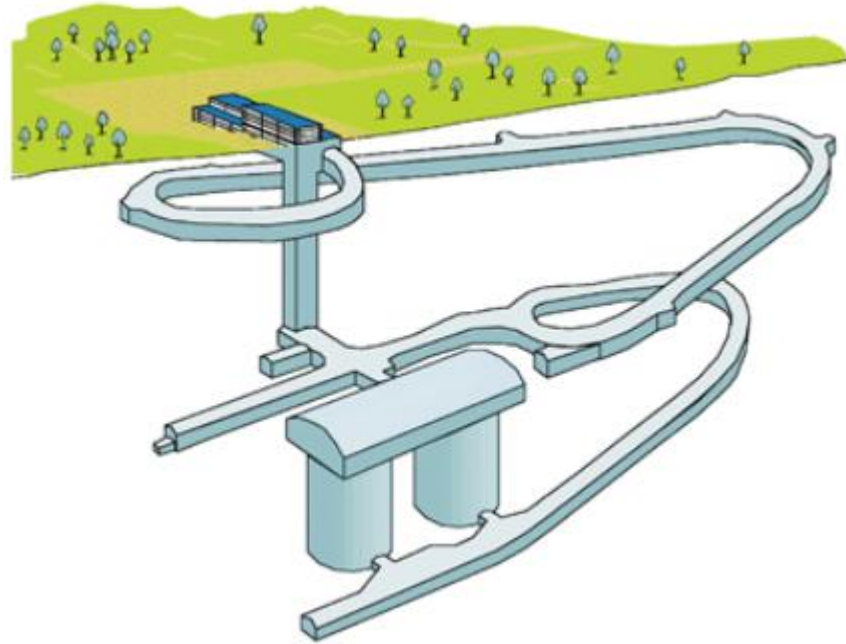
kiintoaineista laskeuttamalla ja suodattamalla. Puhdistukseen on mahdollista käyttää myös separointia. Puhdistettu vain hyvin vähän radioaktiivisuutta sisältävä öljy vapautetaan valvonnasta *YVL D.4* -ohjeen mukaisin menettelyin uudelleen käytettäväksi. Öljyiset lietteet ja sakat kiinteitetään suoraan 200 litran tynnyriin käyttäen öljyisille jätteille soveltuvia erikoisementtejä. Kiinteät öljyiset huoltojätteet puristetaan kuivaksi ja pakataan kuivan huoltojätteen tavoin.

Sekalaisia nesteitä ja lietteitä sekä loppusijoitusta vaativia jäteöljyjä syntyy voimalaitosten toiminnan yhteydessä hyvin vähän verrattuna muihin jätelajeihin. Kuten luvun 3.1.3 kuvasta 9 nähdään, on kiinteitettyjen sekalaisen nesteiden (sisältäen kiinteitetty öljyjätteet) tilavuusosuus kaikista OL1:llä ja OL2:lla tuotetuista voimalaitosjätteistä vain 3 %. Tämä vastaa keskimäärin 5 m³:n vuosittaisia jättemääriä. Puhdistettua jäteöljyä vapautetaan valvonnasta puolestaan vuosittain noin 10 m³. Myös tuotetun ja sitä kautta edelleen valvonnasta vapautettavan jäteöljyn määrä riippuu vuoden aikana tehtävistä muutos- ja korjaustöistä. [23]

OL3:n prosessivesien puhdistuksessa odotetaan syntyvän haihduttimen pohjalietteitä noin 15–20 m³ ja säiliöiden pohjalietteitä noin 2 m³ vuodessa. Nestemäiset lietteet kuivataan alipaineen avulla suoraan 200 litran tynnyriin. Käytettyjä ioninvaihtohartseja kuivataan yhdessä lietteiden kanssa tarpeen mukaan. Yhteiskuivauksessa lietteitä annostellaan kuivaukseen 550 litraa, ja se varaa 200 litran tynnyristä 110 litran tilan. Kuivattaessa pelkkiä lietteitä yhteen 200 litran tynnyriin voidaan kuivata yhteensä 1000 litraa lietteitä. Lietteiden kuivauksen tilavuuden pienentymiskerroin on siis viisi ja vuosittain tuotettavan kuivatun lietejätteen tilavuus noin 4 m³. [22]

3.2 Voimalaitosjätteiden loppusijoitus

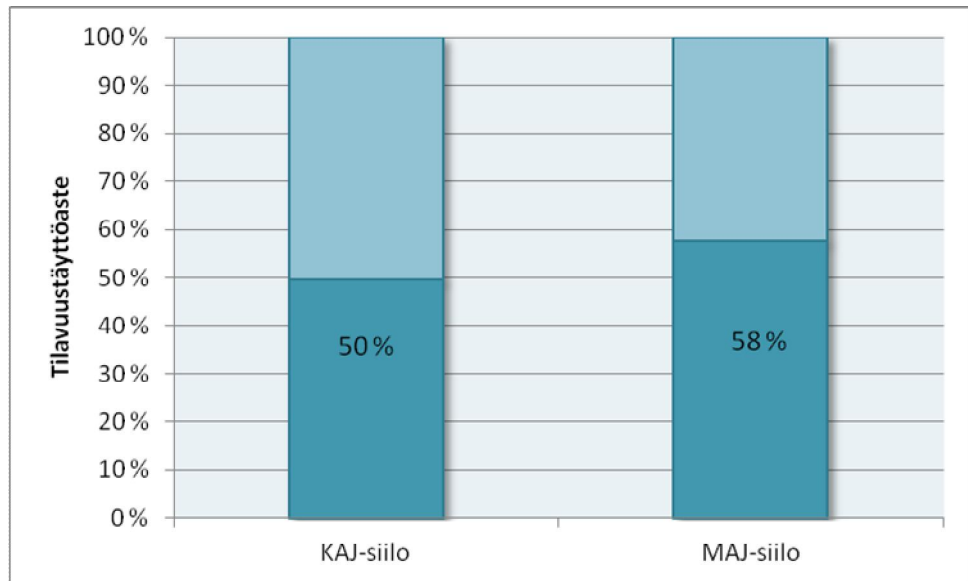
Vuonna 1992 Olkiluodossa käyttöön otettu VLJ-luola koostuu yhdestä keskiaktiivisen jätteen (KAJ-) ja yhdestä matala-aktiivisen jätteen (MAJ-) siilosta sekä näitä yhdessä palvelevista käyttö-, huolto- ja tukitiloista. Voimalaitosjättesiilojen halkaisija on 24 m ja korkeus 34 m. KAJ-siilossa on lisäleviämiseen erillinen 0,60 m vahvuinen teräsbetonisiilo, jonka sisähalkaisija on 20 m ja korkeus 32 m. Siiloihin mahtuu päällekkäin 31 kerrosta betonisia kannettomia loppusijoituslaatikoita. Laatikoiden yhteenlaskettu sisätilavuus on KAJ-siilolle 6 400 m³ ja kapasiteetti 200 litran tynnyreinä 17 360 tynnyriä sekä MAJ-siilolle vastaavasti 9 100 m³ ja 24 800 tynnyriä. [24] VLJ-luolan toteutuksen periaatekuva esitetään kuvassa 10.



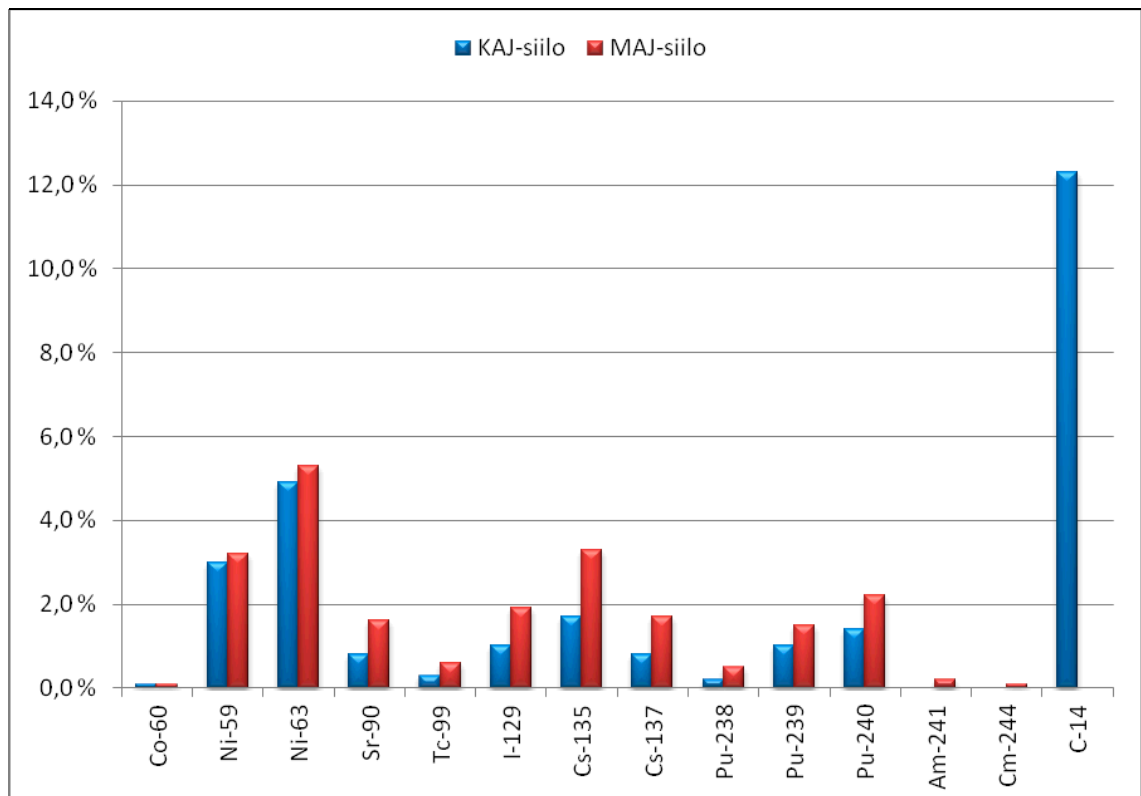
Kuva 10. VLJ-luolan toteutus [25].

VLJ-luola suunniteltiin ydinvoimalaitosyksiköiden OL1 ja OL2 40 vuoden suunnitellun käyttöiän aikana kertyville matala- ja keskiaktiivisille jätteille [26, s.1]. Toimintojen kehittämisen kautta on kuitenkin pystytty vähentämään syntyvän voimalaitosjätteen määrää sekä parantamaan voimalaitosjätteen pakkaamisen tilavuustehokkuutta, ja nykyinen käytössä oleva siilotilavuus vastaa hyvin OL1:n ja OL2:n koko laajennetun 60 vuoden käyttöiän aikana kertyvän voimalaitosjätteen määrää. Vuoden 2013 lopussa, kummankin laitoksen yli kolmenkymmenen käyttövuoden jälkeen, VLJ-luolan tilavuudesta oli käytetty KAJ-siilon osalta 50 % ja MAJ-siilon osalta 58 % (Kuva 11) [27].

Myös voimalaitosjätteessä siiloihin sijoitettavalle kokonaisaktiivisuudelle on asetettu raja-arvo 1100 TBq. Luolan aktiivisuustäyttöastetta seurataan olettamalla raportointi hetkellä jo loppusijoitetun jätteen aktiivisuuskajaan mukainen aktiivisuuden tasainen kertyminen luolan täyttymiseen asti vuoteen vuosina 1991 - 2040 ja edelleen aktiivisuuden luonnollinen puoliintuminen vuoteen 2080 asti ja vertaamalla näin saatua vuoden 2080 aktiivisuutta alkuperäisessä vuonna 1992 myönnettyssä käyttöluvassa määriteltyihin siilokohtaisiin kokonaisaktiivisuusrajoihin; 1000 TBq KAJ-siilolle ja 10 TBq MAJ-siilolle. Nuklidikohtaisina vertailuaktiivisuuksina käytettävät konservatiivisen inventaarin nuklidikohtaiset aktiivisuudet muodostavat ylärajat siiloihin vietävälle jätteelle. [28] Kuten kuvasta 12 voidaan todeta, on nuklidikohtainen aktiivisuustäyttöaste ollut vuoden 2013 lopussa suurimmillaankin vain noin 12 %, ja nykyisin käytännön VLJ-luolan tilavuus tulee täyteen paljon ennen asetettujen aktiivisuusrajojen täyttymistä [27].



Kuva 11. VLJ-luolan siilojen tilavuustäyttöaste 31.12.2013 [27, s. 5].



Kuva 12. VLJ-luolan siilojen nuklidikohtaisen aktiivisuustäyttöasteet sulkemisvuonna 2080 [27, s. 4].

OL3 ydinvoimalaitosyksikön käytön alkaessa ennen OL1:n ja OL2:n käytöstä poistoa on OL3:n voimalaitosjätteitä tarkoitus sijoittaa ensimmäisessä vaiheessa jo olemassa oleviin OL1:n ja OL2:n voimalaitosjätteille suunniteltuihin siiloihin. VLJ-luolan käyttöluvan ehtoja muutettiin vuoden 2012 lopussa muun muassa mahdollistamaan OL3:n voimalaitosjätteiden loppusijoitus. VLJ-luolan nykyisen loppusijoituskapasiteetin odotetaan loppuvan 2030-luvulla. [29] Loppusijoitustilojen suunnittelussa on lähdetty siitä,

että loppusijoitus on peruuttamaton toimenpide, eikä jätepakkauksien poistamiseen siiloista ole varauduttu [30, s. 2].

3.3 Voimalaitosjätehuollon tulevaisuuden haasteet

Voimalaitosjätehuolto Olkiluodossa täyttää nykyisellään kaikki viranomaisvaatimukset, mutta vanhentuva laitekanta, jonka kunnossapito vaatii koko ajan enemmän panostuksia, sekä uudet voimalaitosprojektit, voimalaitosten käytöstäpoisto ja näiden mukanaan tuoma lisäloppusijoitustilan tarve vaativat jo sinänsä toimia luotettavan toiminnan turvaamiseksi. Lisäksi jatkuvasti kohoavat rakennus- ja luvituskustannukset motivoivat panostamaan loppusijoituksen tilavuustehokkuuteen, jolloin loppusijoituksen yksikkökustannukset saadaan pidettyä mahdollisimman alhaisina.

3.3.1 Jätteenkäsittelyteknologia ja vanhentuva laitekanta

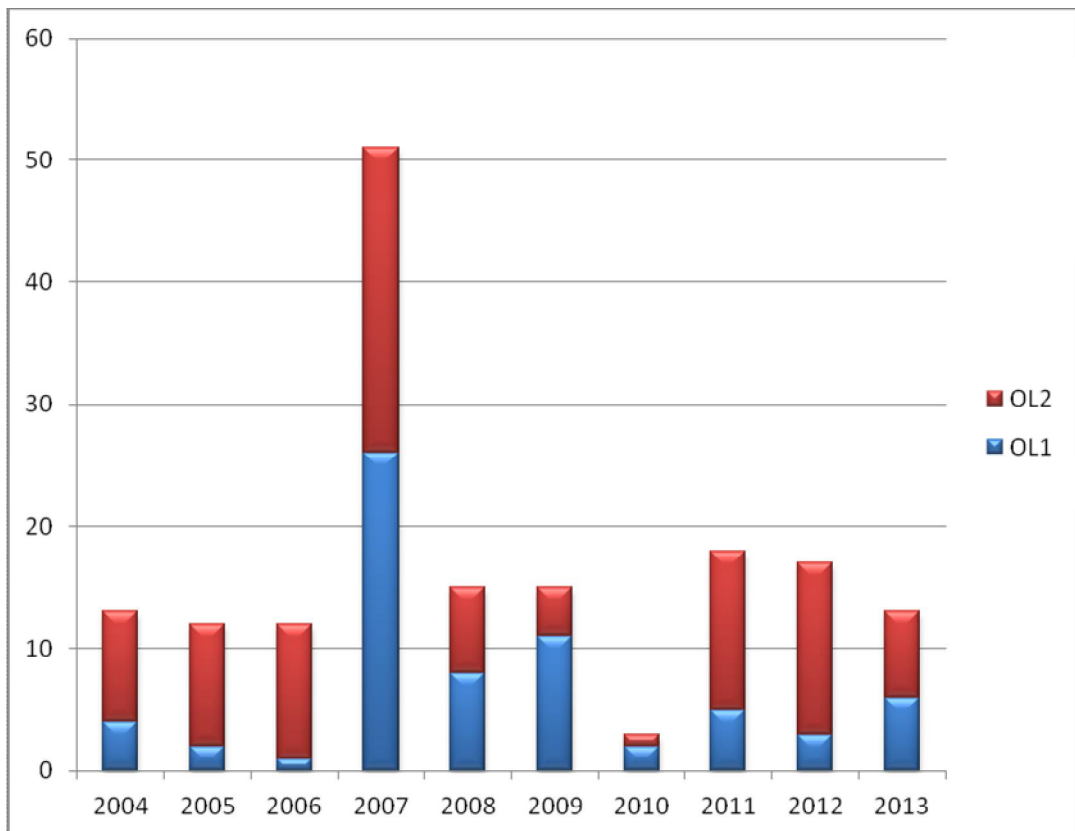
OL1:llä ja OL2:lla käytössä oleva voimalaitosjätteen käsittelyteknologia on yli 30 vuotta vanhaa ja osa laitekannasta on edelleen alkuperäistä. Vanhentuvan laitekannan vikaantuessa entistä toistuvammin yhä suurempi osa kokonaiskustannuksista syntyy kunnossapitokustannuksista. Myös varaosien saatavuus vanhaan teknologiaan on huomattavasti heikentynyt. Lisäksi laitekanta ei kaikilta osin täytä nykyaikaisia turvallisuuskäsityksiä ja -vaatimuksia, ja laitteistojen päivitys tulee näiltä osin toteutettavaksi työntekijöiden turvallisuuden varmistamiseksi.

Voimalaitoksen järjestelmille tehtävä kunnossapito ja parannustyöt on jaoteltu kolmeen pääluokkaan; ennakkohuoltotyöt, vikakorjaukset sekä muutostyöt. Ennakkohuoltotöinä tehdään nimenmukaisesti töitä, jotka tehdään määräväliajoin, laite- tai komponenttivalmistajan ohjeistuksen mukaan, häiriöttömän käytön ja pitkän käyttöiän turvaamiseksi. Tällaisia töitä ovat esimerkiksi öljyn tai tiivisteiden vaihtotyöt ja erilaiset toiminnalliset koestukset. Ennakkohuollon kattavuus määräytyy kunnossapitoluokan mukaisesti. Järjestelmät ja komponentit on jaettu neljään kunnossapitoluokkaan sen perusteella, miten tärkeää niiden käytettävyys on ydinturvallisuudelle ja/tai laitoksen käytettävyydelle. Vikakorjauksina tehdään vastaavasti kunnossapitotyöt, jotka kohdistuvat jo rikkoutuneeseen tai vioittuneeseen komponenttiin, laitteistoon tai järjestelmään. Myös vikakorjausten kiireellisyys riippuu vioittumisen ja siitä johtuvan toimintakunnottomuuden vaikutuksesta ydinturvallisuuteen ja laitoksen käytettävyyteen. Muutostyöt ovat puolestaan laajempia työkokonaisuuksia, esimerkiksi komponenttien tai järjestelmien uusintoja tai perusparannuksia, joita edeltää yksityiskohtainen suunnitteluvaihe.

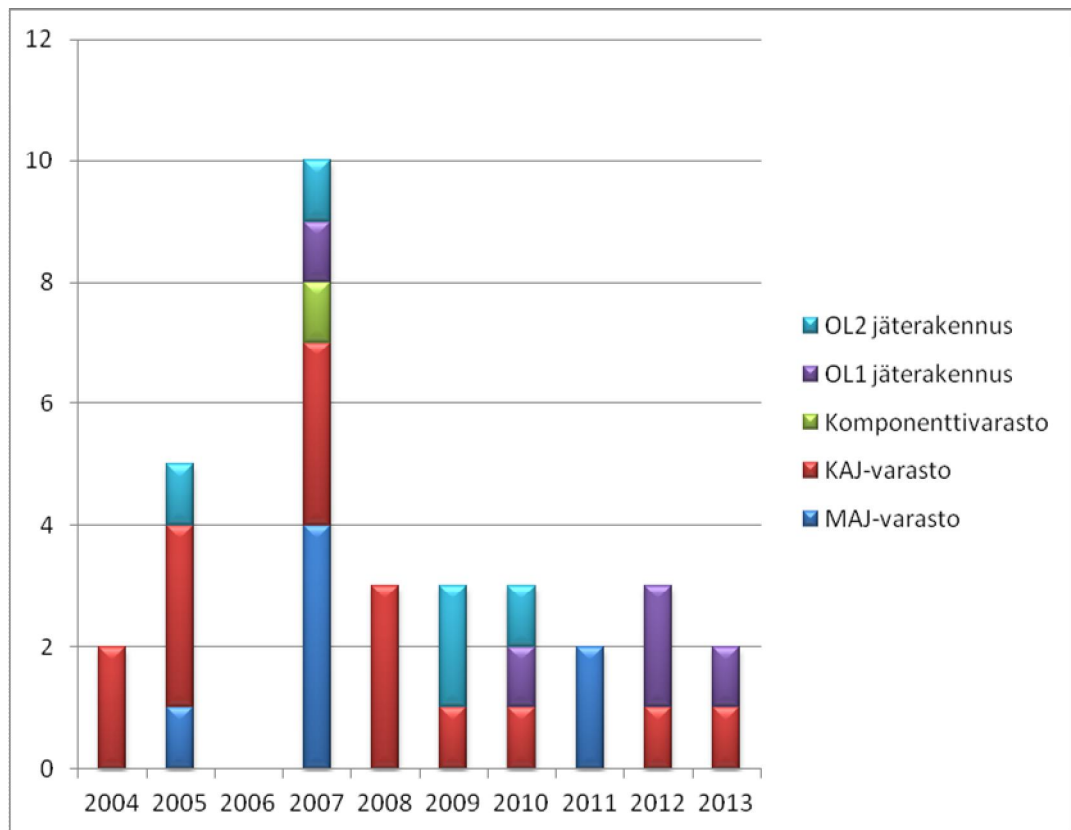
Laitteen vikaantuessa tieto viasta ja korjaustarpeesta kirjataan kunnossapitotietokantaan (KUPI) vikailmoituksena, joka ohjataan kunnossapidon työnjohtajille toteutus- ja suunnitteluun ja edelleen toteutukseen. Tietokanta toimii työnsuunnittelun hallinnoinnin ja koordinoinnin työkaluna. Tietokantaan jää historiatiedot kaikista vikailmoituksista ja toteutetuista korjaavista toimenpiteistä. Tietokannan historiatietoja voidaan hyödyntää paitsi raportoinnissa myös vikataajuuksien tutkinnassa. Usein vikaantuvat komponentit ja laitteistot pyritään tunnistamaan ja vikaantumisen perussyyt poistamaan. Osa- ja

komponenttimuutoksilla, tai jopa kokonaisten laitteistojen muutoksilla, tavoitellaan luotettavampia sekä turvallisempia kokonaisuuksia, ja siten myös alhaisempia kunnossapitokustannuksia.

KUPI-tietokannassa on kunnossapidon historiatiedot vuodesta 1996 alkaen. Tietokanta ei siis kata kunnossapitohistoriaa aina laitosten käyttöönotosta alkaen, mutta lähes kahdenkymmenen vuoden historiatiedoista saadaan jo hyvä kuva järjestelmien vikataajuuksista. Kuvassa 13 esitetään kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmän vikailmoitusten määrä laitosyksiköittäin vuosina 2004–2013. Vastaavasti kuvassa 14 esitetään jäterakennuksiin sekä jätevarastoihin kohdistuneiden vikailmoitusten määrä vuosina 2004–2013.

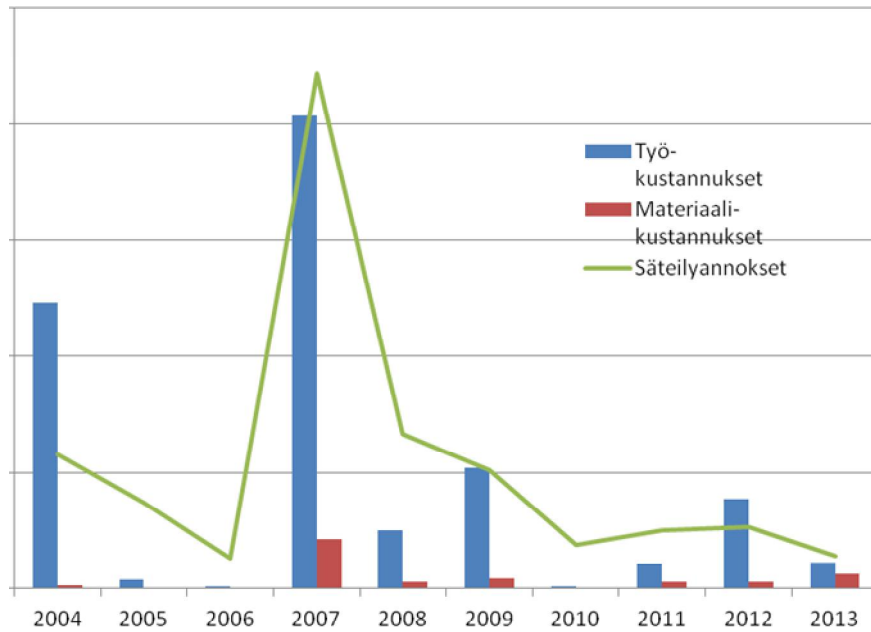


Kuva 13. Kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmän 343 vikailmoitusten määrä laitosyksiköittäin vuosina 2004–2013.

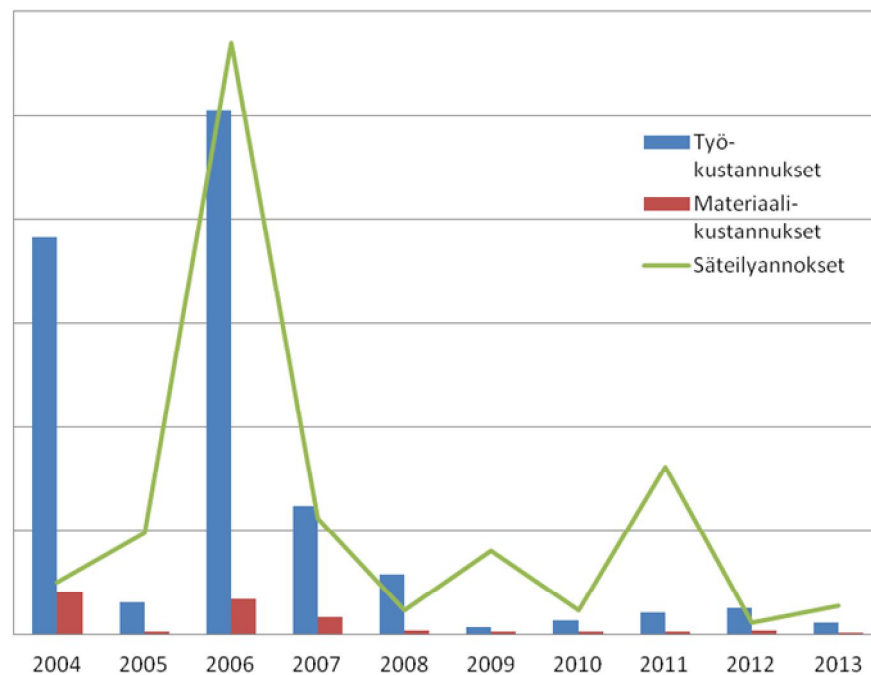


Kuva 14. Jäterakennusten ja jätevarastojen vikaraporttien määrä rakennuksittain vuosina 2004–2013.

Myös kunnossapidon ja muutostöiden kustannuksia voidaan seurata KUPI-tietokannan kautta. Tietokanta kerää työnumeroittain kohdistetut työ- ja materiaalikustannukset niin ennakkohoito-, vikakorjaus- kuin muutostöistäkin. Kuvassa 15 esitetään OL1 kiinteänjätteen käsittelyjärjestelmälle kohdistetut työ- ja materiaalikustannukset vuosina 2004–2013. Kunnossapitokustannusten kanssa samaan kuvaa on lisätty säteilyannostietokannasta (ELDOS) tieto ko. järjestelmän toiminnoille kohdistetuista säteilyannoksista. Koska kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmässä käsitellään huomattavan radioaktiivisia jätteitä, järjestelmän pinnat ovat tyhjennyksen ja huuhteluidenkin jälkeen kontaminoituneet radioaktiivisista aineista. Säteilyannostietojen ja tehtyjen työtuntien (suoraan verrannollinen työkustannuksiin) välillä on nähtävissä korrelaatio. Kunnossapito- ja käyttöhenkilöstö altistuu radioaktiiviselle säteilylle erityisesti vika- ja korjaustilanteissa. Vastaavat tiedot OL2 kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmälle esitetään kuvassa 16.



Kuva 15. OL1 kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmälle 343 kohdistetut kunnossapito- ja muutostyökustannukset sekä säteilyannokset vuosina 2004-2013.



Kuva 16. OL2 kiinteän jätteen käsittelyjärjestelmälle 343 kohdistetut kunnossapito- ja muutostyökustannukset sekä säteilyannokset vuosina 2004-2013.

Kuvissa 15 ja 16 on erityisesti nähtävissä muutostöinä toteutetut bitumointilaitteistojen uusinnat. Vuonna 2004 järjestelmille kohdistetut työkustannukset sisältävät pääasiassa uusintaprojektin suunnittelun, eikä korrelaatiota työtuntien ja säteilyannosten välil-

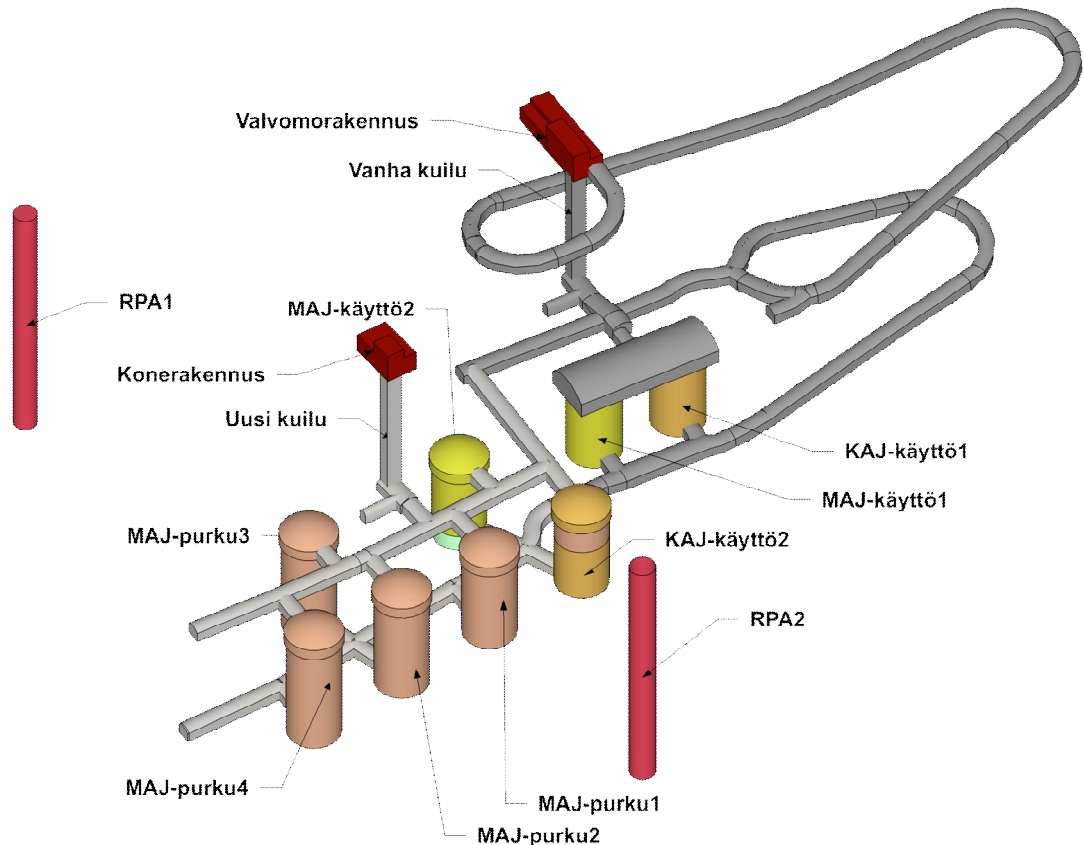
lä voidaan muodostaa. Projektin laitokselle vieni tapahtui OL1:llä vuonna 2007 ja OL2:lla vuonna 2006, mikä näkyy tehtyjen työtuntien ja kohdistettujen säteilyannosten voimakkaana korrelaationa.

Bitumoinnin on jätteenkäsittelyteknologiana havaittu olevan erityisen herkkä laiteriikoille. Järjestelmän uusinnan jälkeen, viiden vuoden ajanjaksolla vuosina 2009–2013, bitumointijärjestelmän kunnossapitoon on kohdistettu keskimäärin yli 30 000 euroa vuodessa. Viiden vuoden aikana tämä tekee yhteensä yli 150 000 euroa. Vastaavasti järjestelmän töihin liittyviä säteilyannoksia on tällä ajanjaksolla kirjattu yhteensä noin 20 mSv eli keskimäärin noin 4 mSv vuodessa. Bitumointiin liittyvä paloturvallisuusriski ja bitumoidun jätteen loppusijoitusturvallisuutta heikentävä sedimentoitumisilmiö kannustavat osaltaan vaihtoehtoisten käsittelyratkaisujen käyttöön.

3.3.2 Loppusijoitustilojen lisärakentaminen

Nykyinen, käytössä oleva VLJ-luola on rakennettu 1980- ja 1990-luvun vaihteessa, jolloin kahden voimalaitosjäteasilon sekä tarvittavien tunneleiden, hallin ja valvomorakennuksen kokonaisinvestointikustannukset olivat noin 90 miljoonaa markkaa, joka vastaa ostovoimaltaan vuoden 2015 arvossa noin 22 miljoonaa euroa. [31] Kahden uuden voimalaitoksen käytön ja kaikkien neljän voimalaitoksen käytöstäpoiston vaatiman lisätilan rakentaminen nykyisten loppusijoitustilojen välittömään yhteyteen tulee vuonna 2008 tehdyn arvion mukaan kustantamaan yhteisistä ajotunneleista ja valvomorakennuksesta huolimatta useita kymmeniä miljoonia euroja. Laajennuksen kokonaiskustannusarviosta käytön aikaisen voimalaitosjätteen osuus on noin 30 prosenttia, purkujäteasilojen osuus noin 60 prosenttia ja reaktoripaineastiakuilujen osuus noin 10 prosenttia. Kustannusarvion hinnat on esitetty tammikuun 2008 arvossa ilman arvonlisäveroa. Projektin kokonaiskustannusarvio muunnettuna vuoden 2015 hintatasoon rakennuskustannusindeksin mukaisesti on noin 8 prosenttia korkeampi. [32, 33]. Kustannusarviossa ei ole huomioitu hankkeen suunnittelu-, luvitus- ja viranomaiskustannuksia. Kuvassa 17 esitetään VLJ-luola esisuunnitelman mukaisesti laajennettuna. [34]

Voimalaitosjätehuolto on lainsäädännöllisesti pitkälti erotettu konventionaalista jätehuollosta, mutta kiristyvät vaatimukset konventionaalissa jätehuollossa heijastuvat osaltaan myös voimalaitosjätehuoltoon. Esimerkiksi Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (2.5.2013/331) rajaa, että kaatopaikalle sijoitettavaksi, ilman poikkeuslupaa, hyväksytään vain sellaista tavanomaista jätettä, jonka orgaanisen aineksen pitoisuus on enintään 10 prosenttia [35]. Valvonnasta vapautettavan huoltojätteen ollessa pääasiassa orgaanista alkuperää vaatimus on huomioitava voimalaitosjätehuollon suunnittelussa ja luvituksessa. Toimintojen pitkän aikajänteen takia voimalaitosjätehuollon toimintoja ja investointeja suunniteltaessa on paitsi seurattava myös pyrittävä ennakoimaan kiristyvät ympäristö- ja säteilyturvallisuusvaatimukset, jotta investointien käyttöikä voidaan hyödyntää suunnitellusti.



Kuva 17. VLJ-luolan laajennettuna. [34]

3.3.3 OL3:n kuivatun jätteen loppusijoitus

OL3:lla tullaan käyttämään alipainekuivausta haihduttimen ja säiliöiden pohjalietteiden sekä käytettyjen ioninvaihtohartsien kiinteyttämiseen. Kuivatun jätteen kemiallinen koostumus poikkeaa merkittävästi väliaineeseen kiinteytetyn jätteen koostumuksesta (vertaa OL1:n ja OL2:n bitumoitu hartsijäte ja betoniin tai sementtiin kiinteytetyt lietteet). Poikkeava koostumus on huomioitava erityisesti keskiaktiivisen kuivatun jätteen osalta. Suunnitteluperusteena keskiaktiivisen jätteen loppusijoitustilojen suunnittelussa on käytetty bitumoitua hartsijätettä. Bitumimatriisi toimii sellaisenaan radioaktiivisia aineita tehokkaasti sitovana jätematriisina. Kuivattu jäte puolestaan koostuu pääasiassa epäorgaanisista suoloista, jotka vapautuvat herkästi joutuessaan vesiympäristöön ja kiihdyttävät jäte- ja loppusijoituspakkausten sekä luolan rakenteiden korroosiota. Kuivatun jätteen ominaisuudet eivät siis vastaa suunnitteluperusteita, ja puutteellisten leviämissesteiden ja kohonneiden korroosiovaikutusten takia loppusijoitus VLJ-luolaan ei sellaisenaan ole mahdollista. Sekä keski- että matala-aktiivisen kuivatun jätteen pitkäaikaturvallisuus loppusijoitustiloissa on arvioitava, ja loppusijoituskonseptia muutettava tarvittaessa, ennen loppusijoituksen aloittamista.

TVO on selvittänyt alustavasti vaihtoehtoja OL3:n keskiaktiivisten jätteen loppusijoituskonseptiksi. Selvitysten mukaan kuivatun jätteen loppusijoitus nykyisiin tai nykyisen kaltaisiin loppusijoitustiloihin on mahdollista vain, mikäli jätetytynnyrit nykyisten teknisten leviämissesteiden lisäksi ympäröidään betonilla niin, että tynnyristä aikanaan

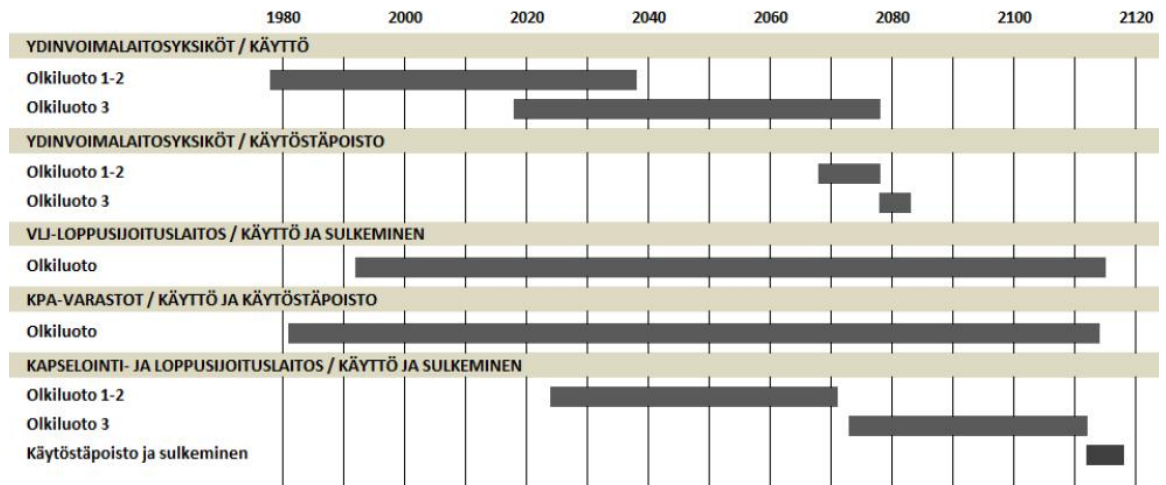
vapautuvat sulfaatti- ja magnesiumyhdisteet sitoutuvat siihen kokonaan. Teknisenä ratkaisuna jätteiden sijoittamiseksi nykyiseen VLJ-luolan KAJ-siiloon ehdotettiin vaiheistetun valumenetelmätäyttöä, joissa jätetytynnyrit valettaisiin betonisiin loppusijoituslaatikoihin niin, että valubetoni ympäröisi tynnyriryhmän joka suunnalta vähintään 161 mm:n paksuudelta. Menetelmän käyttö vaatisi kuitenkin riittävän betonivalun mahdollistavan loppusijoituslaatikon käyttöönoton sekä tarkoitukseen suunnitellut betonointijärjestelmän ja -tilat. Alustavissa suunnitelmissa tarkoitukseen soveltuva neljän tynnyrin vetoinen betonilaatikko olisi pohjapinta-alaltaan puolet nykyisen suuren 16 tynnyrin vetoisen betonilaatikon pohjan alasta ($2,73 \times 1,36 \text{ m} : 2,73 \text{ m} \times 2,73 \text{ m}$) sekä korkeudeltaan 37 prosenttia nykyisiä laatikkomalleja korkeampi (1,4 m : 1,02 m). Järjestelyn tuloksena jätetytynnyreiden loppusijoituksen tilavuustehokkuus laskisi vain 36 prosenttiin alkuperäisestä, ja esimerkiksi luvussa 3.1.2 esitetty hartsijätteen loppusijoituksen tilavuustarpeen suhdeluku nousisi yli 1,9:ään alkuperäisen 0,7:n sijaan. [36, 37]

Toisena vaihtoehtona tehdyissä selvityksissä oli keskiaktiivisten jätteiden välivarastointi ja loppusijoitus myöhemmin rakennettavaan VLJ-luolan laajennukseen. Tässä vaihtoehdossa OL3:n kuivatun jätteen koostumus voidaan huomioida jo siilojen suunnitteluperusteissa niin, että tarvittavat lisärakenteet tai jälkibetonointiratkaisut voidaan sijoittaa loppusijoitustilaan tai sen välittömään yhteyteen jo rakennusvaiheessa. Vaihtoehto mahdollistaa loppusijoituksen tilavuustehokkuuden optimoinnin sekä käyttökokeustietojen keräämisen jätteen kemiallisista ominaisuuksista sekä aktiivisuussisällöstä välivarastoinnin aikana ennen suunnittelun lopullista viimeistelyä. Välivarastointi voidaan toteuttaa OL3:n jäterakennuksen tynnyrivarastossa ja edelleen KAJ-varastolla, joka on alun perin suunniteltu OL1:n ja OL2:n bitumoidun jätteen välivarastointiin ennen loppusijoitustilojen käyttöönottoa. [38]

3.3.4 Voimalaitosten käytöstäpoisto

Olkiluodon ydinvoimalaitoksella on varauduttu voimalaitosten käytöstäpoistoon ja laadittu ydinenergialain mukainen käytöstäpoistosuunnitelma, jossa esitellään suunnitelmat ydinvoimalaitosyksiköiden (OL1, OL2 ja OL3) käytöstäpoiston turvalliselle toteutukselle. Suunnitelma sisältää kustannusarvion, jonka avulla pyritään varmistamaan ydinjäterahastoon kerättävien varojen riittävyys. Voimassaoleva Ydinenergialaki edellyttää käytöstäpoistosuunnitelman päivittämistä kuuden vuoden välein. [11]

Käytöstäpoistosuunnitelman lähtökohtana on voimalaitosyksiköiden 60 vuoden käyttö ja purku 2070-luvulla, mikä tarkoittaa OL1:n ja OL2:n valvottua säilytystä noin 30 vuoden ajan tuotannon päättymisen jälkeen ennen purkutöiden aloittamista. OL3:n käytöstäpoisto on suunniteltu toteutettavaksi välittömästi tuotannon päättymisen jälkeen. Ydinenergian tuotannon ja käytöstäpoiston kokonaisuikataulu esitetään kuvassa 18. [39]



Kuva 18. Olkiluodon voimalaitosten ydinenergian tuotannon ja käytöstäpoiston kokonaisaikataulu perustuen lähteeseen [39, s. 6].

Käytöstäpoistojäte koostuu sekä ydinvoimalaitoksen käytön aikana reaktorisydämen läheisyydessä neutronisäteilyn vaikutuksesta aktivoituneista että primääripiiriin vapautuneiden tai -piirissä aktivoituneiden radioaktiivisten aineiden kontaminoimista komponeista ja rakenteista. Suunnitelman mukaisesti laitousyksiköiden voimakkaasti aktivoituneet reaktoripaineastiat poistetaan ja loppusijoitetaan kokonaisina siten, että niihin pakataan myös reaktorin aktivoituneet sisäosat. Osittain aktivoituneet reaktorien biologiset suojat ja lämpöeristelevyystöt paloitellaan ja pakataan aktiivisuutensa mukaisesti betoni- ja vanerilaatikoihin sekä tynnyreihin. Kontaminoituneet prosessijärjestelmät puretaan, paloitellaan ja pakataan betonilaatikoihin lukuun ottamatta isoja komponentteja, jotka loppusijoitetaan sellaisenaan tai tarvittaessa paloitetuina kuljetusta varten. [34]

Käytöstäpoistojäte loppusijoitetaan Olkiluodon kallioperään nykyisen VLJ-luolan yhteyteen rakennettaviin laajennusosiin. Reaktoripaineastioille louhitaan noin 110 m syvät kuilut, joihin kaksi paineastiaa voidaan sijoittaa päällekkäin pystyyn. Kontaminoitunut jäte sekä aktivoituneet biologisen suojan betoni ja lämpöeristelevyystöt sijoitetaan ruiskubetonoituihin kalliosiiloihin. Loppusijoitettavan radioaktiivisen OL1:n ja OL2:n jätteen määräksi on arvioitu noin 15 000 tonnia ja tilantarpeeksi pakkauksineen noin 32 000 m³. OL1:n ja OL2:n kokonaisjätemäärässä on huomioitu myös KPA-varaston käytöstäpoistojäte. Reaktoripaineastioiden ja sen sisälle sijoitettavien aktivoituneiden komponenttien tilantarve on 1 000 m³, aktivoituneen biologisen suojan 4 200 m³ ja vähemmän aktivoituneen jätteen sekä kontaminoituneen purkujätteen tilantarve puolestaan 27 200 m³. Laitostoimittajan arvioiden mukaan OL3:n loppusijoitettavan jätteen määrä on noin 5 800 tonnia ja tilantarve pakkaamattomana noin 8 300 m³. Sovellettaessa OL3:n purkujätteelle vastaavia pakkausmenettelyjä kuin OL1:n ja OL2:n jätteelle voidaan reaktoripaineastian ja sen sisälle sijoitettavien aktivoituneiden komponenttien tilantarpeeksi arvioida noin 370 m³, aktivoituneen biologisen suojan 590 m³ ja muun kontaminoituneen purkujätteen 8 710

m³. [40] Kokonaisaktiivisuus OL1:n ja OL2:n purkujätteelle loppusijoituksen aikaan on noin $2 \cdot 10^{16}$ Bq ja OL3:n purkujätteelle noin $7 \cdot 10^{17}$ Bq. OL3:n korkeampi aktiivisuus johtuu siitä, että loppusijoitus suoritetaan välittömästi käytöstä poiston jälkeen. [34]

Lukuunottamatta valvotun säilytyksen vaihetta, kolmen laitosesikön käytöstäpoiston toimenpiteet vievät noin 15 vuotta, josta varsinaisten purkutöiden osuus on viitisen vuotta. Uusimmassa, vuonna 2014 julkaistussa, käytöstäpoistosuunnitelmassa OL1:n ja OL2:n käytöstäpoiston kokonaiskustannuksiksi on arvioitu satoja miljoonia euroja, josta useita kymmeniä miljoonia euroja on arvioitu kuluvan purkujätteen loppusijoitukseen. [34]

3.3.5 Ydinvoiman lisärakentaminen ja toimintojen keskittäminen

Olkiluodon laitospaikalle on keskitetty ydinenergia-alan toimintoja sähkön tuotannosta voimalaitosjätteen ja käytetyn polttoaineen loppusijoittamiseen. Yhteisellä laitospaikalla eri yksiköiden toimintojen integroinnilla on saavutettavissa merkittäviä etuja niin resurssien ja asiantuntijuuden kohdistamisessa, yhteisessä infrastruktuurissa kuin tuotannon suunnittelussakin. Tällä hetkellä laitospaikan toimintoja on integroitu yleisen infrastruktuurin, prosessiveden tuotannon, voimalaitosjätteen varastoinnin ja loppusijoituksen sekä käytetyn polttoaineen varastoinnin ja loppusijoituksen osalta.

Voimalaitosjätteen käsittely Olkiluodossa perustuu kullakin voimalaitosesiköllä sijaitsevaan itsenäiseen jätteenkäsittelyyn. KPA-varaston ja VLJ-luolan jätteenkäsittelyn toiminnot on integroitu OL1:n jätteenkäsittelyyn. Hajautettu käsittely vaatii tilat sekä prosessilaitteet jokaisella käsittelypaikalla, sekä vaikeuttaa resurssien optimaalista kohdistamista. Erilliset tilat ja prosessijärjestelmät lisäävät ennakkohuollon ja kunnossapidon kustannuksia. Hajautetut toiminnot vaativat myös varastointitoiminnoilta enemmän, kun materiaalien saatavuus on taattava useammalle eri kohteelle samanaikaisesti. Eri-laisten käsittelyteknologioiden käyttö lisää puolestaan luvitus- ja asiantuntijapalveluiden kustannuksia sekä koulutustarvetta.

Toimintojen tehostamiseksi ja jatkuvuuden turvaamiseksi voimalaitosesiköiden ikääntyessä voimalaitosjätteen käsittelyn toimintojen yhdistäminen tulee arvioida huomioiden niin käytettävyyttä kuin taloudellisuusnäkökohdatkin. Voimalaitosjätehuollon on oltava käytettävissä, kulloinkin tarvittavalla laajuudella, aina voimalaitosten käytöstäpoiston ja polttoaineen loppusijoituksen loppuun asti. Voimalaitosesiköistä erillinen, kaikkia toimijoita palveleva jätteenkäsittelykeskus pystyy tarjoamaan voimalaitosten elinkaaresta riippumattoman ja joustavan käytettävyyden.

TVO:n yhtenä strategisena tavoitteena on ydinvoiman lisärakentaminen Olkiluodon laitospaikalle. Eduskunta myönsi positiivisen periaatepäätöksen OL4 -ydinvoimalaitosesikölle kesäkuussa 2010. Periaatepäätöksen mukaisesti OL4:n rakentamislupahakemus oli jätettävä valtioneuvostolle viiden vuoden kuluessa myönteisestä päätöksestä eli viimeistään kesäkuussa 2015. TVO haki kesällä 2014 jatkoaikaa rakentamislupahakemuksen jättämiselle niin, että rakenteilla oleva OL3 -voimalaitosesikkö voitaisiin viimeistellä sähköntuotantoon ennen OL4:n rakentamislupahakemuksen jät-

tämistä. Valtioneuvosto kuitenkin hylkäsi hakemuksen yhteiskunnan kokonaisedun vastaisena. Kesäkuussa 2015 TVO tiedotti, ettei se tule hakemaan rakentamislupaa neljännelle ydinvoimalaitosyksikölle määräaikaan mennessä. Näin ollen Valtioneuvoston tekemä ja eduskunnan vahvistama periaatepäätös raukesi vuoden 2015 kesäkuun viimeisenä päivänä. TVO ylläpitää valmiutta uuden periaatepäätöksen hakemiseksi OL4 -laitosyksikölle. Hakemuksen jättämisestä päätetään erikseen.

Rakennettaessa lisää ydinvoimaa Olkiluodon laitospaikalle tulee voimalaitosjätteenkäsittelyä tarkastella kokonaisuutena voimalaitosyksikkökohtaisten ratkaisujen sijaan. Laitostoimittajat tarjoavat voimalaitosten yhteyteen jätteenkäsittelyratkaisuja, joiden integrointi olemassa oleviin jätteenkäsittelymenettelyihin voi olla haastavaa. Käytettävyyden ja toimintojen integroitavuuden turvaamiseksi jätteenkäsittelyratkaisujen on hyvä vastata toisiaan erityisesti lopputuotteen sekä pakkauksen osalta. Tällöin voidaan hyödyntää yhteisiä turvallisuusarvioita ja käyttää saumattomasti yhteisiä loppusijoituspakkausia, varastotiloja sekä yhteistä kuljetuskalustoa.

Optimaalisessa tapauksessa keskitetyn voimalaitosjätteen käsittelyn ansiosta jätteenkäsittelyä ei tarvita kunkin voimalaitosyksikön yhteyteen. Tällöin voimalaitosyksikön toimituksessa on huomioitava vain riittävä varastointikapasiteetti ennen käsittelyä sekä asianmukaiset siirtoyhteydet kullekin jätejakeelle. Investoimalla keskitettyyn jätteenkäsittelyyn voidaan tulevaisuudessa säästää merkittävästi rakennettaessa lisää voimalaitosyksiköitä. Toisaalta, mikäli investointi lisäydinvoimaan tulee kyseeseen nykyisessä, hajautetun voimalaitosjätteenkäsittelyn tilanteessa, voidaan voimalaitostoimituksen yhteydessä panostaa voimalaitosjätteenkäsittelyn tiloihin ja suunnitteluun niin, että jatkossa uuden voimalaitosyksikön yhteyteen rakennetut jätteenkäsittelytilat voivat toimia koko voimalaitospaikan keskitettynä jätteenkäsittelykeskuksena, jonne jo käytössä olevien voimalaitosten jätteenkäsittelytoiminnot voidaan siirtää. Toimitus osana voimalaitostoimitusta, joka on oletettavasti toimittajalle merkittävämpi projekti, saattaa mahdollistaa hyvät neuvotteluasemat ja taloudellisemmän lopputuloksen. Toisaalta voimalaitostoimittajat tarjoavat tavallisesti vain yhtä tai korkeintaan kahta vaihtoehtoista jätteenkäsittelyratkaisua, eikä muuten optimaalisin voimalaitosvaihtoehto välttämättä kata käytettävyydeltään, turvallisuudeltaan ja taloudellisuudeltaan tavoitelluinta jätteenkäsittelyteknologiaa.

4 VOIMALAITOSJÄTEHUOLLON KUSTANNUKSET

Voimalaitosjätehuollon kustannukset voidaan jakaa kahteen pääluokkaan, kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteitä kustannuksia ovat investointeihin sidotut kustannukset, jotka eivät ole riippuvaisia tuotettavasta jätemäärästä, kuten jätteenkäsittely- ja loppusijoitustilojen sekä järjestelmien ja laitteistojen investointikustannukset sekä jotkin ylläpitokustannukset. Muuttuvia kustannuksia ovat vastaavasti kustannukset, jotka ovat suoraan riippuvaisia tuotettavasta jätemäärästä, kuten jätepakkaus-, sideaine- ja käyttö- ja työvoimakustannukset sekä kunnossapitokustannukset. Investointikustannuksina käsitellään tässä yhteydessä alkuperäiset hankintakustannukset sekä suuremmat modernisointi- ja uusintaprojektit, niin kutsutut muutostyöt. Kunnossapitokustannuksina käsitellään vastaavasti ennakkohuoltotyöt sekä vikakorjaukset. Lisäksi voimalaitosjätehuoltoon liittyy tarkastus- ja luvitus toimintojen viranomaiskustannuksia, jotka sijoitetaan joko kiinteisiin tai muuttuviin kustannuksiin tarkastuksen tai luvan luonteesta riippuen. Käytön aikaisten tarkastus- ja luvituskustannusten voidaan olettaa olevan käsittelymenetelmistä riippumattomia, mutta luvituskustannukset on huomioitava uusien menetelmien käyttöönoton kustannuksia arvioitaessa. Koska työ on rajattu koskemaan investointikustannuksia ja suoraan loppusijoitukseen sidottuja materiaalikustannuksia, toiminnoille kohdistuvia muuttuvia kustannuksia on käsitelty tarkemmin vain näiltä osin. Muita muuttuvia kustannuksia esitellään toiminnoittain pintapuolisesti.

Voimalaitosjätehuollon kustannuksia selvitettiin vuonna 2000 toimintolaskentaprojektissa. Projektissa tarkasteltiin kaikkia silloisen *Polttoaineen ja jätteenkäsittely - jaoksen* toimintoja ja projektin tuloksena saatiin toimintokohtaiset kustannukset esimerkiksi kuljetus-, varastointi- ja pakkaustoiminnoille. Puutteellisten taustatietojen, projektin erilaisen rajauksen sekä muuttuneen tarkastelu ympäristön takia tuloksia ei voida sellaisenaan käyttää voimalaitosjätehuollon kustannusten arvioinnissa. Tutkimusta on kuitenkin soveltuvin osin käytetty lähtökohtana ja vertailupohjana kustannusarvioiden päivittämiseksi vuoteen 2015. Lisäksi aineistoa on hyödynnetty lähteenä vanhojen investointien kustannustietojen keräämisessä.

Voimalaitosjätehuolto prosessi voidaan toiminnoittain jakaa kolmeen eri osakokonaisuuteen; käsittelyyn, varastointiin ja kuljetuksiin sekä loppusijoitukseen. Tarkastelemalla toimintoja erikseen pystytään tunnistamaan ne prosessin vaiheet, jotka ovat kustannusrakenteen kannalta merkittävimmät. Toisaalta, koska eri voimalaitosjätelajit poikkeavat merkittävästi toisistaan sekä fyysikaalisilta että kemiallisilta ominaisuuksiltaan, käsittelyratkaisut on kehitetty aina jollekin tietylle jätelajille tai -ryhmälle. Tällöin

on tarpeellista pystyä kohdentamaan jätehuolto-prosessin kustannukset kullekin jätelajille erikseen.

4.1 Voimalaitosjätteen käsittelykustannukset

Voimalaitosjätteen käsittelykustannukset koostuvat käsittelytilojen ja -järjestelmien kiinteistä investointi- ja ylläpitokustannuksista sekä muuttuvista materiaali-, käyttö-, työvoima- ja kunnossapitokustannuksista. Käsittelyn investointikustannuksina huomioidaan käsittelytilojen ja käsittelyjärjestelmien ja -laitteistojen hankinta- ja muutostyökustannukset korkoineen. Kiinteitä ylläpitokustannuksia ovat tilojen lämmitys- ja ilmanvaihtokulut sekä muut käsiteltävistä jätemääristä riippumattomat kustannukset. Käsittelyn materiaalikustannukset koostuvat pääasiassa jätepakkausista ja käytettävistä sideaineista sekä sähkön ja veden kulutuksesta. Työvoimakuluja ovat toimintoihin vaadittavan henkilöstön kulut niin yhtiön omien työntekijöiden kuin alihankkijoidenkin osalta. Kunnossapitokustannukset koostuvat ennakkohuolto- ja vikakorjauskustannuksista materiaalikuluineen.

Voimalaitosjätteen käsittelyn vuosittaiset investointikustannukset määritettiin perustuen käsittelytilojen ja -järjestelmien alkuperäiseen hankintakustannukseen. Investoinnille laskettiin vuosittainen poistokustannus investointiajankohdan ja poistoajan perusteella annuiteettimenetelmää käyttäen. Rakennuksille käytettiin 40 vuoden, järjestelmille 30 vuoden ja työkoneille 20 vuoden poistoaikaa. Mikäli investointiajankohdasta oli kulunut pidempi aika, kuin mikä poistoajaksi oli määritelty, investointi katsottiin jo kokonaan kuoletetuksi, eikä sille huomioitu enää vuosittaisia poistokustannuksia. Voimalaitosjätteen käsittelyn kustannuksissa huomioidut investoinnit, näiden hankintakustannus, investointiajankohta ja laskennassa käytetty poisto-aika sekä näistä annuiteettimenetelmällä määritetty poistokustannus vuonna 2015 esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Voimalaitosjätteen käsittelyn investoinnit ja laskennallinen poistoaika sekä poistokustannukset vuonna 2015.

Investointi	Hankintakustannus, €	Investointiajankohta	Poistoaika, y	Poistokustannus 2015, €
Käsittelytilat				
Jäterakennus OL1/OL2		1979	40	
KAJ-varasto		1984	40	
Käytettyjen ioninvaihtohartsien kiinteytys bitumiin				
Bitumointilinja		1979	30	
Bitumoinnin uusinta		2007	30	
Nestemäisen jätteen kiinteytys				
Alipainehaihduttimet		2008	30	
Tynnyrisekoitin		1995	30	
Huoltojätteen pakkaus				
Lajittelukaappi ja tynnyripuristin		1979	30	
Metalli- ja sekaromun käsittely				
Tyrannosaurus		2004	30	
200 t leikkuri ja puristin		1995	30	
Kuormausnosturi		2012	20	
Mittalaitteet ja ATK				
Jättemittauslaitteisto		2014	10	
Yhteensä				

Määritettäessä poistokustannuksia toiminnoittain huomioitiin tilojen yhteiskäyttö voimalaitosjätteen käsittelyn ja varastoinnin toimintoihin kohdistamalla puolet sekä jäterakennuksen että KAJ-varaston poistokustannuksista käsittelyn ja puolet varastoinnin toiminnoille. Voimalaitosjätteiden aktiivisuusmittausten toteutuksen investointikustannukset jaettiin karkeasti käsiteltävien jätemäärien suhteessa valvonnasta vapautettavan ja loppusijoitettavan jätteen kesken suhteessa 3 : 7. Aktiivisuusmittausten kustannukset sisällytettiin käsittelykustannuksiin.

Voimalaitosjätteen käsittelyyn kohdistuvia, käsittelymenetelmästä ja loppusijoitettavan jätteen määrästä riippuvia muuttuvia kustannuksia ovat jätepakkausten ja käytettävien sideaineiden kustannukset. Sideainekustannukset kohdistuvat kiinteytettävälle nestemäiselle jätteelle sekä bitumoitavalle ioninvaihtohartsijätteelle. Jätepakkauskustannukset vaihtelevat käsittelymenetelmän mukaan. Huoltojäte, kiinteytettävät nestemäiset jätteet sekä bitumoitava ioninvaihtohartsijäte pakataan 200 litran tynnyreihin osana käsittelyprosessia. Bitumoitavan jätteen tynnyriin toteutetaan erillinen pienempi täyttöaukko kansineen sekä erillinen tippalautanen bitumivalumiin talteenottoon tynnyrinvaihdon välillä. 200 litran tynnyrit pakataan edelleen betonilaatikkoon, joka toimii varsinaisena loppusijoituspakkauksena. Metall- ja sekaromu pakataan suoraan betonilaatikkoon ja peitetään ohuella pölysuojakannella. Taulukkoon 3 on koottu Olkiluodon voimalaitosjätehuolto-prosessin mukaisten jätepakkausten ja käytettävien sideaineiden

kustannukset. Kustannukset on esitetty hankintakustannuksena joko kappaletta tai kilogrammaa kohden. Lisäksi on esitetty tilavuusyksikkökohtainen materiaalikustannus (loppusijoitettavaa jätetilavuutta kohden). Kustannuksiin on sisällytetty mahdolliset rahti- ja muut käsittelykustannukset.

Taulukko 3. Voimalaitosjätehuolto prosessin jätepakkausten ja käytettävien sideaineiden kustannukset.

Materiaali	€/kpl		€/m ³
Tynnyri		Huoltojäte	
		Ioninvaihtohartsijäte	
		Sekalaisille nesteille	
Bitumitynnyrin täyttöaukko, -kansi ja tippalautanen		Ioninvaihtohartsijäte	
Betonilaatikko, suuri		Huoltojäte	
		Ioninvaihtohartsijäte	
		Sekalaiset nesteet	
		Metalliromu	
Betonilaatikko, pieni		Huoltojäte	
		Ioninvaihtohartsijäte	
		Sekalaiset nesteet	
		Metalliromu	
Pölykansi, suuri betonilaatikko		Metalliromu	
	€/kg		€/m ³
Bitumi		Ioninvaihtohartsijäte	
Kiinteytysaine		Sekalaiset nesteet	

Hankintakustannukset saattavat vaihdella jonkin verran tilauksen ajankohdan, tilauserän koon ja valuuttakurssien muuttuessa. Taulukoitu kustannus on pyritty valitsemaan mahdollisimman edustavaksi. Kiinteytysaineen hankintahinta on määritelty vuonna 2003 ja sen jälkeen toteutettujen hankintojen perusteella eri savilajien painotettuna keskiarvona. Määrittelytapa valittiin valuuttakurssien ja tilauserien koon vaikutusten minimoimiseksi. Muiden materiaalien osalta on käytetty viimeisimmän hankinnan mukaista hankintahintaa.

4.2 Voimalaitosjätteen varastointi- ja kuljetuskustannukset

Voimalaitosjätehuollon kokonaiskustannuksiin kuuluvat lisäksi olennaisena osana jätteen varastointi- ja kuljetuskustannukset jätehuolto prosessin eri vaiheissa. Olkiluodon voimalaitosjätehuollon peruseriaatteena on jätteen välitön käsittely ja loppusijoittaminen kuitenkin niin, että käsittely- ja kuljetuskampanjat toteutetaan kustannustehokkuuden ja käytettävyyden kannalta optimaalisesti esimerkiksi kerran tai kahdesti vuodessa.

Keskitetyllä toiminnalla pyritään tehokkaaseen toimintaan ja selkeään työsuunniteluun.

Voimalaitosjätteiden varastointitarve vaihtelee ja siihen vaikuttavat muun muassa jätelaji, aktiivisuustaso, jätteen tuottonopeus, käytössä olevat henkilöstöresurssit sekä käytettävyys ja operatiivinen strategia yli koko loppusijoitusketjun. Jätteitä varastoidaan sekä käsittelemättömänä, jolloin jäte voi olla pakkaamaton tai kuljetusta ja varastointia varten väliaikaisesti pakattuna, että käsiteltynä loppusijoituspakkauksessaan. Ydinenergian tuotannossa suurin osa tuotetusta jätteestä syntyy vuosihuoltojen yhteydessä. Vuosihuollon aikana jätehuollon toiminnot keskitetään vuosihuollon sujuvuuden varmistamiseen ja esteettömän tuotantoon palaamisen turvaamiseen. Varsinainen voimalaitosjätteen käsittely toteutetaan vuosihuoltojen ulkopuolella, jolloin jätteen tuotto on vähäistä. Jätteiden varastointitiloja on oltava käytettävissä paitsi vuosihuollon aikana tuotettujen jätemäärien lyhytaikaiseen varastointiin myös pidempiaikaisempaan varastointiin käsittelyketjun toimintakunnottomuuden varalle. Kuljetukset pyritään toteuttamaan joustavasti varastokapasiteetit ja muut työt huomioiden.

Jätteiden varastointia voidaan hyödyntää myös jätteiden radioaktiivisuuden alentamiseen. Tietyn nuklidin aiheuttama radioaktiivisuus jätteessä alenee luonteenomaisesti puoleen aina nuklidikohtaisen puoliintumisajan kuluessa. Olkiluodon voimalaitosjätteen merkittävin radioaktiivisuutta aiheuttava nuklidi on Co-60, jonka puoliintumisaika on noin 5,3 vuotta. Tämä tarkoittaa sitä, että jätteen, jonka radioaktiivisuus on pääosin peräisin Co-60 -nuklidista, aktiivisuus laskee noin puoleen alkuperäisestään 5,3 vuoden kuluessa. Varastointia radioaktiivisuuden alentamiseksi kutsutaan jätteen vanhentamiseksi.

Kuljetus- ja varastointikustannukset ovat sidottuja paitsi käsiteltävän jätteen määrään myös sen aktiivisuuspitoisuuteen. Keskiaktiivisen jätteen kuljetus- ja varastointitoiminnot vaativat enemmän panostusta niin operatiiviselta säteilysuojelulta kuin tilojen ja laitteistojen suunnittelultakin. Olkiluodossa jätteenkäsittely ja jätteen varastointi sekä loppusijoitustoiminnot on keskitetty voimalaitosten välittömään yhteyteen, minkä ansiosta saavutetaan merkittäviä etuja paitsi lyhyiden kuljetusmatkojen kautta myös käytettäessä kalustoa ja henkilökuntaa laajemmin loppusijoituksen eri vaiheissa.

Voimalaitosjätteen varastoinnissa merkittävän kustannuksen aiheuttaa varastotilojen ja niihin kiinteästi liittyvien käsittely- ja apujärjestelmien rakennuttamis- ja hankintakustannukset. Näiden lisäksi varastointikustannuksia ovat tilojen käyttö-, ylläpito- ja kunnossapitokustannukset sekä näihin liittyvät suuremmat muutostyöt sekä varastointitoiminnan vaatimat henkilöstö- ja viranomaiskustannukset. Voimalaitosjätteen kuljetuksissa kustannukset koostuvat vastaavasti radioaktiivisten aineiden kuljetukseen soveltuvan kaluston hankintakustannuksista, kaluston ja ajoväylien käyttö-, ylläpito- ja kunnossapitokustannuksista sekä näihin liittyvistä muutostöistä sekä kuljetustoiminnan vaatimista henkilöstö- ja viranomaiskustannuksista. Kuljetuskalusto pyritään hankkimaan monipuolisena siten, että samaa kalustoa voidaan eri kokoonpanoissa hyödyntää niin voimalaitosjätteen, käytetyn polttoaineen kuin muissakin laitosalueen raskaissa kuljetuksissa.

Voimalaitosjätteen varastoinnin ja kuljetusten vuosittaiset investointikustannukset määritettiin perustuen varastointitilojen ja kuljetuskaluston alkuperäiseen hankintakustannukseen. Investoinnille laskettiin vuosittainen poistokustannus investointiajankohdan ja poistoajan perusteella annuiteettimenetelmää käyttäen. Rakennuksille käytettiin 40 vuoden ja työkoneille 20 vuoden poistoaikaa. Mikäli investointiajankohdasta oli kulunut pidempi aika kuin poistoajaksi oli määritetty, investointi katsottiin jo kokonaan kuoletetuksi eikä sille huomioitu enää vuosittaisia poistokustannuksia. Voimalaitosjätteen varastoinnin ja kuljetusten kustannuksissa huomioitujen investointien, näiden hankintakustannus, investointiajankohta ja laskennassa käytetty poistoaika sekä näistä annuiteettimenetelmällä määritetty poistokustannus vuonna 2015 esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Voimalaitosjätteen varastoinnin ja kuljetusten investoinnit ja laskennallinen poistoaika sekä poistokustannukset vuonna 2015.

Investointi	Hankintakustannus, €	Investointiajankohta	Poistoaika, y	Poistokustannus 2015, €
Varastointitilat				
Jäterakennus OL1/OL2		1979	40	
KAJ-varasto		1984	40	
MAJ-varasto		1982	40	
Komponenttivarasto		2004	40	
Piha-alue		1979	40	
Kuljetukset				
Vetoajoneuvo		2013	20	
Vetoalusta		2013	20	
Yhteensä				

Määritettäessä vuosittaisia poistokustannuksia toiminnoittain huomioitiin tilojen yhteiskäyttö loppusijoitettavan jätteen ja valvonnasta vapautettavan jätteen toimintoihin kohdistamalla vain viidennes MAJ-varaston poistokustannuksista loppusijoitettavan jätteen toiminnoille. Kuten aiemmassa luvussa esiteltiin jäterakennuksen ja KAJ-varaston poistokustannukset kohdistettiin puoliksi käsittelyn ja varastoinnin toiminnoille. Vastaavasti vetoajoneuvon ja vetoalustan poistokustannuksista puolet kohdistettiin käytetyn ydinpolttoaineen kuljetuksiin ja puolet voimalaitosjätteen kuljetuksiin. Investointivaiheessa Posivan investointiosuus kuljetuskalustosta, 10 prosenttia hankintahinnasta, on huomioitu alempana investointikustannuksena.

4.3 Voimalaitosjätteen loppusijoituskustannukset

Voimalaitosjätteen loppusijoituksessa suurimman kustannuksen aiheuttaa maanalaisten loppusijoitustilojen rakennuttamiskustannukset. Näiden lisäksi loppusijoituskustannuksiin sisältyy tilojen sekä käsittely- ja apujärjestelmien käyttö-, ylläpito- ja kunnossapito-

kustannukset sekä näihin liittyvät suuremmat muutostyöt, loppusijoituksen materiaali-kustannukset sekä loppusijoitustoiminnan vaatimat henkilöstö- ja viranomaiskustannukset.

Keskiaktiivisen jätteen loppusijoittaminen on kalliimpaa kuin matala-aktiivisen jätteen johtuen KAJ-siilon erillisestä teräsbetonivuorauksesta, joka osaltaan varmistaa teknisten leviämissesteiden riittävyyden loppusijoitettaessa korkeamman aktiivisuustason jätteitä. Vuoraus paitsi nostaa siilon rakentamiskustannuksia myös pienentää siilon tehollista tilavuutta. Vuorauksesta aiheutuneita kohonneita rakentamiskustannuksia ei puutteellisten kustannusrakennetietojen takia pystytä jälkikäteen kohdistaminen keskiaktiivisille jätteille, eikä kustannuksilla odoteta olevan kokonaisuudessa merkittävää roolia. Kuitenkin loppusijoituksen tilavuuskapasiteetti on VLJ-luolan nykyisissä tiloissa, jotka lisävuorausta lukuun ottamatta ovat sekä keski- että matala-aktiiviselle jätteelle identtiset, keskiaktiiviselle jätteelle vain 70 prosenttia matala-aktiivisen jätteen tilavuuskapasiteetista. Täten kohdistettaessa loppusijoituksen kustannuksia jätepakkauksille saadaan keskiaktiiviselle jätteelle suunniteltua tilavuusyksikköä kohden lasketuksi kustannukseksi 42 prosenttia korkeampi kuin matala-aktiiviselle jätteen vastaava kustannus. Käytännössä ero nousee tätäkin suuremmaksi, koska metalli- ja sekaromu, joka on 90 prosenttisesti matala-aktiivista, voidaan pakata tynnyrien sijaan suoraan betonilaitikkoon, jolloin tilavuus saadaan hyödynnettyä tynnyritäyttöä tehokkaammin.

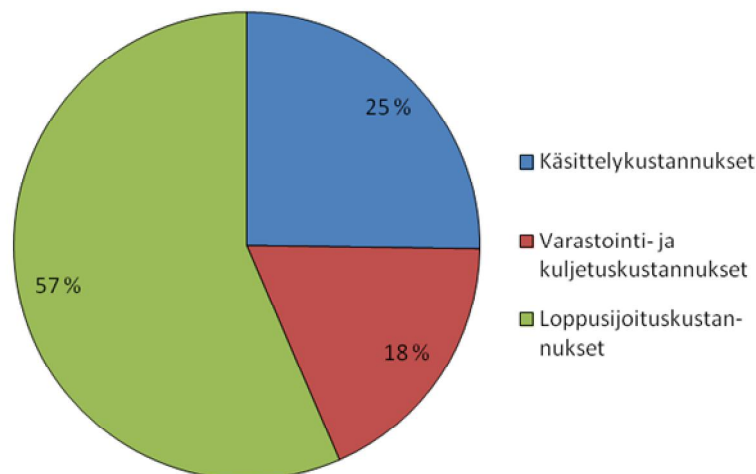
Varsinaisten loppusijoitustoimintojen lisäksi voimalaitosjätteiden loppusijoitus edellyttää merkittävän paljon tutkimustyötä säteily- ja ydinturvallisuuden varmistamiseksi niin ennen loppusijoitustoiminnan aloittamista, toiminnan aikana kuin loppusijoitustilojen sulkemisvaiheessakin. Tutkimuksia toteutetaan sekä omina pientutkimusprojekteina että Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelman (KYT) puitteissa. KYT-ohjelman rahoitus tulee valtion ydinjätehuoltorahastoon perustetusta erillisestä Ydinjätetutkimusrahastosta, jonne ydinjätehuoltovelvolliset maksavat vuosittain 0,08 % kokonaisvastuumäärästään. Ohjelman perustavoite on tuottaa korkealaatuista tutkimustietoa suomalaisten viranomaisten käytettäväksi sekä ylläpitää kansallista osaamista ydinjätehuollon alalla sekä edistää yhteistyötä alan toimijoiden kesken. Tutkimusohjelman tulokset ovat kaikkien osallistujien käytettävissä. [41] Kaikkiaan TVO osoittaa rahaa voimalaitosjätehuollon tutkimuksiin vuosittain noin 260 000 euroa [42]. Tutkimustoiminnan kustannuksia ei tässä työssä ole huomioitu loppusijoituskustannuksina.

Voimalaitosjätteen loppusijoituksen vuosittaiset investointikustannukset määritettiin perustuen loppusijoitustilojen ja niitä palvelevien järjestelmien alkuperäiseen hankintakustannukseen. Investoinnille laskettiin vuosittainen poistokustannus investointiajankohdan ja poistoajan perusteella annuiteettimenetelmää käyttäen. Loppusijoitustiloille käytettiin 60 vuoden ja loppusijoitushallin nosturin ohjausjärjestelmän uusinnalle 20 vuoden poistoaikaa. Voimalaitosjätteen loppusijoituksen kustannuksissa huomioitujen investointien, näiden hankintakustannus, investointiajankohta ja laskennassa käytetty poisto aika sekä näistä annuiteettimenetelmällä määritetty poistokustannus vuonna 2015 esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Voimalaitosjätteen loppusijoituksen investoinnit ja laskennallinen poistoaika sekä poistokustannukset vuonna 2015.

Investointi	Hankintakustannus, €	Investointiajankohta	Poistoaika, y	Annuiteettikertymä 2015, €
Voimalaitosjätteen loppusijoitus				
VLJ-luola		1992	60	
Nosturin ohjausjärjestelmän uusinta		2014	20	
Yhteensä				

Voimalaitosjätehuollon investointien kokonaiskustannukset voidaan määrittää osatekijöidensä summana. Vuonna 2015 voimalaitosjätehuollolle kohdistetut investointien poistokustannukset ovat yhteensä yli miljoona euroa. Kuvassa 19 nähdään osatekijöiden: käsittely, varastointi ja kuljetus sekä loppusijoitus, prosentuaalinen osuus kokonaiskustannuksista. Kuten työn rajausta määritettäessä todettiin, loppusijoitus on kustannusrakennetta tarkasteltaessa merkittävin yksittäinen toiminto kattava yksin yli puolet investointien kokonaiskustannuksista.



Kuva 19. Käsittely-, varastointi- ja kuljetus- sekä loppusijoituskustannusten, prosentuaalinen osuus kokonaiskustannuksista.

4.4 Voimalaitosjätehuollon kustannukset jätelajeittain

Toimintokohtaisen tarkastelun ohella on tärkeää määrittää jätevirtakohtaiset kustannukset ja erityisesti yksikkökohtaiset kustannukset. Jätelajikohtaiset kustannukset kokoavat yhden jätelajin investointi- ja materiaalikustannukset koko käsittelyketjulta.

Yhteisten investointikustannusten jakaminen eri jätelajeille on voimakkaasti sidoksissa jätevirtoihin ja niiden keskinäiseen suhteeseen. Esimerkiksi VLJ-luolan investointikustannukset jaetaan erijätelajeille suoraan loppusijoitustilavuuden suhteessa. Toisaalta vain yhteen jätelajiin kohdistuvat investointikustannukset, kuten bitumointilinjan uusinnan kustannukset, osoitetaan kokonaisuudessaan kyseiselle

jätelajille. Mikäli tällöin kyseisen jätelajin jätevirta muuttuu, myös yksikkökustannus muuttuu. Mikäli jätevirta pienenee puoleen alkuperäisestä, vastaava yksikkökustannus nousee kaksinkertaiseksi.

Loppusijoituskustannusten osituksessa on huomioitu loppusijoitettavan jätetilavuuden suhde loppusijoitustilavuuteen. Loppusijoitettavalla jätetilavuudella käsitetään varsinaisen jätteen tilavuus loppusijoitustilassa. Loppusijoitustilavuutena käsitetään puolestaan loppusijoitettavan jätteen vaatima loppusijoitustila VLJ-luolassa. Termien ero tulee esiin loppusijoitettaessa 200 litran tynnyreihin pakattua jätettä. Loppusijoitusta varten tynnyrit pakataan betonilaatikkoon, jonka tilavuus on loppusijoituspositiosta riippuen joko 5,2 m³ tai 3,9 m³. Isompaan betonilaatikkoon mahtuu 16 tynnyriä ja pienempään betonilaatikkoon 12 tynnyriä. Tynnyri- eli jätetilavuutena tämä vastaa 3,2 m³:ä ja 2,4 m³:ä. Tynnyreihin pakatun jätteen loppusijoitustilavuus on täten yli 60 prosenttia suurempi kuin jätetilavuus. Ero on huomioitava, jotta tynnyriin pakatun ja suoraan betonilaatikkoon pakatun jätteen loppusijoituskustannukset voidaan osittaa oikein.

Taulukkoon 6 on koottu lukujen 4.1 - 4.3 kustannustietoihin perustuen eri jätelajeille ositetut voimalaitosjätehuollon kustannukset. Laskennassa on huomioitu keskiaktiivisen jätteen korkeampi loppusijoituskustannus jakamalla VLJ-luolan investointikustannukset puoliksi matala- ja keskiaktiivisen jätteen kesken ennen osittamista yksittäisille jätelajeille.

Sijoitettaessa suorakulmaisia laatikoita kerroksittain lieriönmuotoiseen loppusijoitussiilon tilavuus voidaan hyödyntää tehokkaammin sijoittamalla pienempiä laatikoita reuna-alueille lähelle siilojen seinämiä. Pienempiä laatikoita sijoitetaan kuhunkin kerrokseen kahdeksan sekä matala- että keskiaktiivisen jätteen siilossa. Suuria betonilaatikoita sijoitetaan matala-aktiivisen jätteen siilossa 44 ja keskiaktiivisen jätteen siilossa 29 kuhunkin kerrokseen. Koska erikokoisten betonilaatikoiden materiaalikustannus suhteessa niiden loppusijoitustilavuuteen poikkeaa toisistaan, erikokoisten betonilaatikon käyttö on huomioitu materiaalikustannuksissa painottamalla betonilaatikoiden materiaalikustannus niiden loppusijoituspositioiden lukumäärän suhteella.

Taulukko 6. Eri jätelajeille ositetut voimalaitosjätehuollon kustannukset.

	Investointi- kustannukset, €	Investointikus- tannukset, €/m ³	Materiaalikus- tannukset, €/m ³	Yhteensä, €/m ³
Huoltojäte				
Metalliromu				
Ioninvaihtohartsit				
Sekalaiset nesteet				

5 TULEVAISUUDEN JÄTTEENKÄSITTELY- RATKAISUT

Olkiluodossa voimalaitosjätteenkäsittely perustuu laitosten suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa valittuun teknologiaan. Sittenmin loppusijoitustilojen puute, voimalaitosten yhteydessä olevien varastojen täytyminen sekä yhteiskunnallinen painostus loppusijoitusratkaisujen löytämiseksi on nostanut motivaatiota voimalaitosjätteenkäsittelyn tehostamiseen ja uusien jätteenkäsittelyteknologioiden kehittämiseen maailmalla. Tilavuustehokkuutensa ansiosta tutkimuksissa ja vertailuissa esille nousevat erityisesti erilaiset jätteen termiseen käsittelyyn perustuvat teknologiat, kuten poltto-, pyrolyysi- ja sulatus-teknologiat.

Vaihtoehtoa omaan jätteenkäsittelyteknologiaan investoimiselle tarjoavat radioaktiivisen jätteen käsittelyyn erikoistuneet yritykset, jolloin voimalaitoksella tuotettu radioaktiivinen voimalaitosjäte toimitetaan palveluntarjoajan tiloihin käsiteltäväksi. Kuten useamman ydinvoimalaitosyksikön laitospaikalla, myös useamman ydinvoimalaitoksen jätteenkäsittelyn keskittäminen mahdollistaa investoinneille korkeamman käyttöasteen. Näin investointiin ja laitteistojen ylläpitoon sidotut kiinteät kustannukset jakautuvat suuremman jätemäärän käsittelyyn ja käsittelyn yksikkökustannus alenee.

5.1 Lasitus

Etelä-Korealaisen valtio-omistaisen Korea Electric Power Corporationin (KEPCO) tytäryhtiö Korean Hydro and Nuclear Power (KHNP) on kehittänyt menetelmiä matala- ja keskiaktiivisen voimalaitosjätteen käsittelyyn. Menetelmäkehityksen ajavana voimana on ollut Etelä-Korean voimalaitosjätteiden varastokapasiteetin täytyminen ja voimalaitosjätteen loppusijoitusluolan käyttöönoton viivästyminen. Menetelmäkehityksen painopisteet ovat olleet loppusijoitettavan jätteen tilavuustehokkuudessa sekä pitkäaikais-turvallisuudessa. Lisäksi tavoitteena on ollut löytää ratkaisu, joka soveltuu kaikille Korean ydinvoimateollisuuden tuottamille voimalaitosjätejakeille.

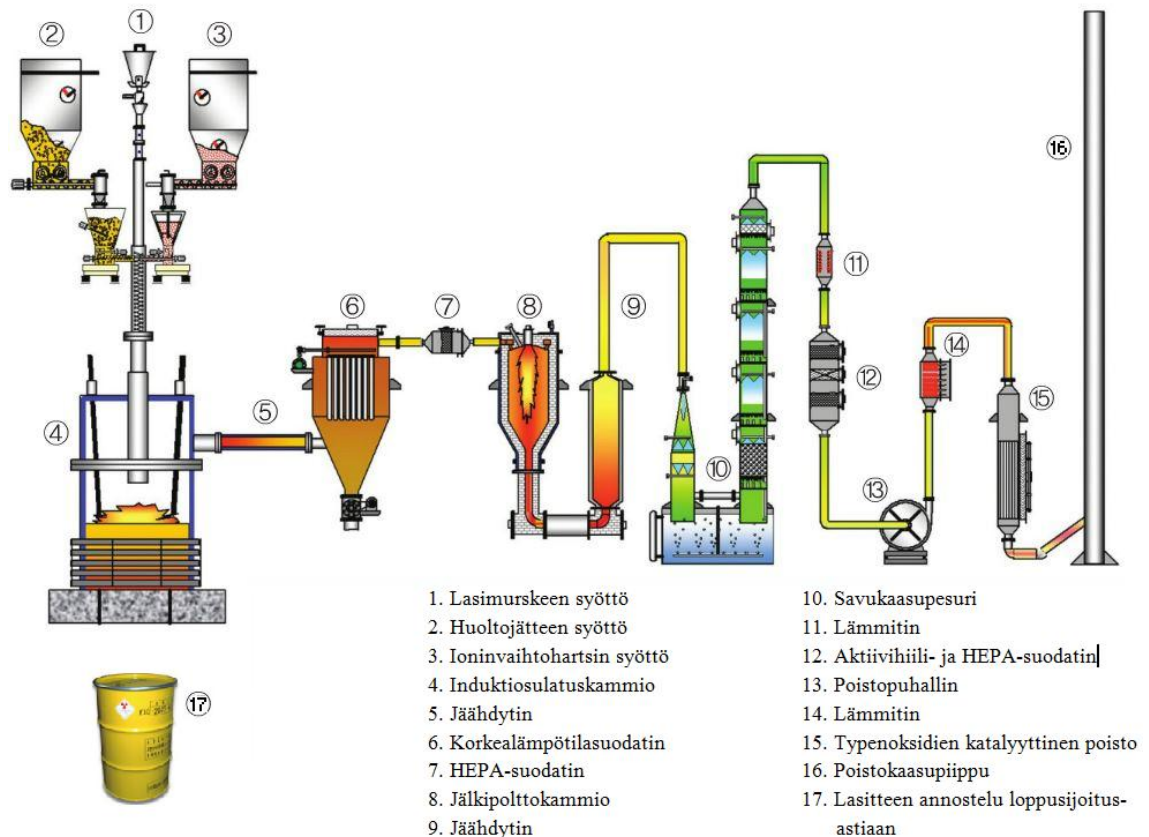
KHNP:n voimalaitosjätteenkäsittelyn tutkimuksen pääpaino keskitettiin vuonna 1994 lasituskäsittelyyn. Valinnan perusteina olivat lasitetun jätematriisin odotettavissa oleva yli miljoonan vuoden pysyvyys loppusijoitusympäristössä sekä käsittelyssä saavutettava tilavuudenpienennys jopa yhteen viideskymmenesosaan alkuperäistilavuudesta. Tutkimustyö konkretisoitui vuonna 1999 käyttöönotettuun koelaitokseen. [43] Ensimmäinen, ja toistaiseksi ainoa, kaupallinen lasituslaitos sai lopullisen käyttöluopansa syksyllä 2009 [44].

5.1.1 Lasitusprosessi

Lasituskäsittely soveltuu orgaaniselle jätteelle. Käsittelyssä homogenisoitu jäte syötetään kuumaan lasisulaan, jossa orgaaninen aine hajoaa hapettumalla korkeassa lämpötilassa. Kaasumaiset hajoamistuotteet poistuvat lasitusreaktorista poistokaasujen puhdistukseen. Nestemäiset ja kiinteät hajoamistuotteet pidättäytyvät osaksi lasisulaa. Lasitusreaktorista poistettava aktiivinen lasisula lasketaan suoraan loppusijoitusastiana toimivaan terästynnyriin, jossa lasisula jäähtyessään muodostaa kovan ja kestävä lasimatriisin. Poistokaasujen puhdistus on suunniteltu erottamaan poistokaasuista niin aktiiviset kuin inaktiivisetkin kemialliset ja hiukkasmaiset epäpuhtaudet.

Vuonna 2009 toimintansa aloittanut kaupallinen lasituslaitos Etelä-Koreassa Ulchin ydinvoimalaitoksella palvelee laitoksia 5 ja 6. Laitos on mitoitettu käsittelemään kaikki yksiköillä syntyvät huoltojätteet sekä matala-aktiiviset ioninvaihtohartsit. Lasitusprosessiin syötetään joko puhdasta huoltojätettä tai huoltojätettä ja ioninvaihtohartsia samanaikaisesti jätejaesuhteen ollessa noin 54 % huoltojätettä ja 46 % ioninvaihtohartsia [45]. Pelkälle huoltojätteelle Ulchin lasitusprosessin syöttönopeus on noin 20 kg/h ja huoltojätteen ja ioninvaihtohartsin yhteisjakeelle vastaavasti noin 18 kg/h. Käsittely lämpötila on 1100 °C. [44]

Lasituskäsittelyn yksinkertaistettu prosessikaavio esitetään kuvassa 20. Käsittelylaitos koostuu kolmesta päätoiminnosta; jätteen ja lasimurskeen syötöstä (1-3), lasitustoiminnosta ja lasitteen pakkaamisesta (4 ja 17) sekä poistokaasujen käsittelystä (5-16). Ennen lasituskäsittelyä huoltojäte esikäsitellään helpommin syötettävään muotoon repijällä, ja ioninvaihtohartsit kuivataan vapaasta vedestä.



Kuva 20. Lasituskäsittelyn yksinkertaistettu prosessikaavio perustuen lähteeseen [46].

Poistokaasujen puhdistusteknologia jäljittelee konventionaalisen jätteen polttolaitosten savukaasujen puhdistusta, ja sillä on saavutettavissa hyvä puhdistusaste rikinoksidien, typenoksidien sekä kiinteiden ja nestemäisten epäpuhtauksien erotuksessa. KHNP:n Ulchinin lasituslaitoksessa tehtyjen merkkiainekokeiden perusteella poistokaasujen puhdistusjärjestelmällä saavutetaan puhdistuskerroin 10^6 kobolttin ja cesiumin nuklideille Co-57 ja Cs-137. [44] Poistokaasujärjestelmässä talteen otettu radioaktiivisia hiukkasia sisältämä pöly palautetaan lasitusreaktoriin lasitettavaksi [43].

Kemiallisesti stabiileja kaasumaisia aktiivisuuspäästöjä ei kuitenkaan pystytä pidättämään poistokaasujen puhdistusjärjestelmässä. Voimalaitosjätteen tapauksessa tämä tarkoittaa käytännössä järjestelmän kyvyttömyyttä pidättää hiili-14 -isotooppia, jota on sitoutuneena käytettyihin ioninvaihtohartseihin. Hiili-14 -isotooppi vapautuu lasitusreaktiossa pääasiassa hiilidioksidina ja hiilimonoksidina sekä pienissä määrin hapettumattomina kaasumaisina orgaanisina yhdisteinä. Hiilimonoksidi ja hapettumattoman orgaaniset yhdisteet poltetaan jälkipolttokammiossa edelleen hiilidioksidiksi. Hiilidioksidi ei pidäyty poistokaasujen puhdistusjärjestelmässä ja kulkeutuu täten sellaisenaan järjestelmän läpi. Hiili-14 -isotoopin vapautuminen ilmakehään lasitusreaktiossa on huomioitava laitospaikan turvallisuusarvioissa suunniteltaessa lasitusprosessin käyttöönottoa.

KHNP on tehnyt tutkimuksia lasitusprosessin turvallisuudesta ja tehokkuudesta niin tutkimusvaiheessa kuin koe- ja ensimmäisen kaupallisen käsittelylaitoksen käyttöönoton

yhteydessäkin. Lasimatriisiin on todettu soveltuvan hyvin radioaktiivisten aineiden pidättämiseen, ja sen käyttöä on tutkittu maailmanlaajuisesti korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoitussovellutuksissa. Lisäksi KHNP on tehnyt tutkimuksia eri lasikoostumuksille, löytääkseen kullekin jätetyypille soveltuvimman koostumukseen niin käytettävyyden kuin pitkäaikaisturvallisuudenkin kannalta. Radioaktiivisten nuklidien pidättymistä jätematriisiin on tutkittu standardoiduilla liukoisuuskokeilla (ASTM C-1285-02, Standard Test Methods for Determining Chemical Durability of Nuclear, Hazardous, and Mixed Waste Glasses and Multiphase Glass Ceramics: The Product Consistency Test (PCT)). [44, 47, 48, 49, 50]

Lasitusprosessin taloudellisuutta on tutkittu erityisesti menetelmän tilavuustehokkuuden kautta. Käsittelyn tilavuudenpientymiskerroin on määritetty sekä pelkälle huoltojätteelle että huoltojätteen ja ioninvaihtohartsin seokselle. Kaupallisessa käytössä Ulchinin lasitusprosessissa on saavutettu huoltojätteelle (tiheys $0,2 \text{ g/cm}^3$) tilavuudenpientymiskerroin 100 ja huoltojätteen ja ioninvaihtohartsin seokselle (tiheys $0,68 \text{ g/cm}^3$) kerroin 75. [44] Verrattuna Olkiluodossa nykyisin käytössä oleviin menettelyihin tämä vastaisi tynnyriin puristetulle huoltojätteelle tilavuudenpientymiskerrointa 24 ja bitumoidulle ioninvaihtohartsille vastaavasti kerrointa 143. OL1:n ja OL2:n tuotannossa kertyviin jätemääriin verrattuna tämä tarkoittaisi kymmenessä vuodessa huoltojätteelle arviolta 123 m^3 :n ja ioninvaihtohartsille 280 m^3 :n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

Huoltojätteen ja ioninvaihtohartsin lasituskäsittelyn lisäksi koelaitosmittakaavassa on tehty lasituskokeita booripitoiselle haihdutinkonsentraatille ja lietteelle. Näille molemmille saavutettiin tilavuudenpientymiskertoimeksi noin kahdeksan [43]. Verrattuna Olkiluodossa nykyisin käytössä oleviin menettelyihin tämä vastaisi kiinteytetyille sekalaisille nesteille tilavuudenpientymiskerrointa 16. OL1:n ja OL2:n tuotannossa kertyviin jätemääriin verrattuna tämä tarkoittaisi kymmenessä vuodessa sekalaisille nesteille arviolta 43 m^3 :n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

Korkean tilavuustehokkuuden käänköpuolena on jätteessä olevan aktiivisuuden väkevöityminen lopputuotteeseen. Esimerkiksi Olkiluodon voimalaitosyksiköillä tuotetun huoltojätetynnyrin keskimääräinen aktiivisuus vuonna 2011 oli $9,49 \times 10^7 \text{ Bq}$ eli noin 95 MBq (aktiivisuusmittaus ennen puristusta, jolloin huoltojätteen tiheys on keskimäärin 460 kg/m^3). Lasituskäsittelyn jälkeen lasitetun huoltojätteen tynnyrin aktiivisuus olisi vastaavasti $4,15 \times 10^9 \text{ Bq}$ eli noin 4 GBq. Käytetyille ioninvaihtohartsille vastaavat aktiivisuusarvot vuonna 2011 ja lasituskäsittelyn jälkeen olisivat raehartsille 280 GBq ja 40 TBq ($40 \times 10^{12} \text{ Bq}$) sekä pulverihartsille 9 GBq ja 1 TBq. Toistaiseksi lasitusmenetelmää on sovellettu kaupallisesti ainoastaan matala-aktiiviselle jätteelle, eikä keskiaktiivisen ioninvaihtohartsin lasituksesta ole kokemuksia kuin pilottimittakaavassa. Kohonnut aktiivisuuspitoisuus on huomioitava lasituslaitoksen suunnittelussa sekä jätteenkäsittelyhenkilöstön sekä kuljetusten aikaisessa säteilysuojelussa. Tämä edellyttää esimerkiksi uusien käsittely- ja toimintamallien käyttöönottoa sekä järeämpien kuljetus-suojien hankkimista. Loppusijoitustilaan sijoitettavan aktiivisuuden kokonaismäärä ei kasva käytettäessä tehokkaita tilavuuden pienentämismenetelmiä, mutta turvallisuusar-

vioissa on tarpeen mukaan huomioitava aktiivisuuden keskittyminen aikaisempaa pienemmälle alueelle.

5.1.2 Lasitusprosessin luvitus

Ulchinin ydinvoimalaitoksen lasituslaitos sai lopullisen käyttöluvan Etelä-Korean viranomaisilta lokakuussa 2009. Käyttöluvan saamista edelsi kolmivaiheinen luvitusprosessi, jonka aikana viranomaisille tuli osoittaa prosessin turvallisuus.

Etelä-Korealaisessa mallissa luvitusprosessin ensimmäisessä vaiheessa haetaan rakennuslupaa, jota varten suunnitteludokumentaatio toimitetaan viranomaiselle arvioitavaksi. Rakennusluvan saamista seuraa asennus- ja koekäyttövaihe, joka kattaa laite- ja järjestelmätestit inaktiivisilla materiaaleilla. Kolmanteen vaiheeseen ja radioaktiivisten aineiden käsittelyyn siirtyminen edellyttää väliaikaisen käyttöluvan saamista. Käyttöluvaa varten viranomainen arvioi ja tarkistaa laitoksen toteutuksen sekä suoritettujen koekäytön tulosaineiston. Väliaikaisen käyttöluvan myöntämisen jälkeen suoritetaan laite- ja järjestelmätestit radioaktiivisilla merkkiaineilla, sekä suoritetaan testiajo radioaktiivisella jätteellä. Viranomaisen hyväksytyä koekäytön tulokset voidaan myöntää lopullinen käyttöluva. [44]

Ulchinin ydinvoimalaitoksen koekäytön ja testiajon tuloksia verrattiin paitsi viranomaisrajoihin, myös suunnittelun lähtötavoitteisiin. Suunnittelussa asetettiin tavoitteet niin tekniselle suorituskyvyille kuin päästöillekin. Päästöjen tavoitearvot asetettiin Etelä-Korean lainsäädännöllisiä raja-arvoja alemmalle tasolle. Taulukossa 7 esitetään Ulchinin lasituslaitoksesta mitattuja poistokaasujen konventionaalisia päästöarvoja sekä niitä vastaavat suunnitteluarvot ja lainsäädännölliset raja-arvot Etelä-Koreassa ja Euroopan Unionissa (EU). EU:n asettamat raja-arvot ovat merkittävästi Etelä-Korean asettamia raja-arvoja alemmat. Mitatut epäpuhtausarvot alittavat kuitenkin selvästi tiukemmatkin raja-arvot. EU:n asettamat raja-arvot on siirretty sellaisinaan Suomen kansalliseen lainsäädäntöön. [44, 51, 52]

Taulukko 7. Ulchinin lasituslaitoksesta mitattuja poistokaasujen päästöarvoja sekä niitä vastaavat suunnitteluarvot ja lainsäädännölliset raja-arvot Etelä-Koreassa ja Euroopan Unionissa. [44, 51, 52]

Epäpuhtaus	Mitatut arvot ¹⁾		Raja-arvot		Suunnittelu-arvot ¹⁾
	Huoltojäte	Huoltojäte + ioninvaihtohartsit	Korea ¹⁾	EU / Fin ²⁾	
CO (ppm)	< 10	< 1	300	50	50
NO _x (ppm)	< 40	< 10	150	200	100
SO _x (ppm)	< 1	< 4	100	50	50
HCl (ppm)	< 6	< 1	50	10	40
Hiukkaset (mg/m ³)	< 1	< 1	100	10	50
Dioksiinit (ng-TEQ/m ³)	< 0,002		5	0,1	0,5

1) Keskiarvo 12 %:n happipitoisuudessa.

2) Vuorokausikeskiarvo 11 %:n happipitoisuudessa.

Vaikka Etelä-Korealainen luvitusprosessi on samankaltainen kuin Suomalainen luvitusprosessi, hyväksymiskriteerit poikkeavat toisistaan oleellisesti. Lasitusprosessilla ei ole referenssilaitosta Euroopassa, joten suunnittelu pohjautuu täysin Etelä-Korealaisiin suunnitteluperusteisiin. Huolimatta siitä, että konventionaalisten päästöjen osalta Ulchin lasituslaitoksen päästöarvot alittavatkin Suomalaiset raja-arvot, ei Etelä-Korealaisen referenssin mukainen lasituslaitos välttämättä sellaisenaan täytä kaikkia Suomalaisia vaatimuksia. Suomalainen lainsäädäntö asettaa tarkat vaatimukset laitoksen käytettävyydelle ja säteilyturvallisuudelle. Lisäksi lopputuotteen, lasitetun jätteen, loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuus on analysoitava luotettavasti. Lasituslaitoksen luvitettavuus on arvioitava huolellisesti niin konventionaalisten kuin ydinteknisten vaatimustenkin osalta ennen mahdollisen investointipäätöksen tekemistä.

5.2 Plasmasulatus

KHNP on kehittänyt orgaaniselle jätteelle soveltuvan lasitusprosessin rinnalle myös käsittelymenetelmää epäorgaanisen jätteen käsittelyyn. Epäorgaanisia voimalaitosjätteitä ovat pääasiassa erilaiset romumetallit sekä rakentamisen kivi- ja maa-ainekset. Vaikka, toisin kuin orgaanisilla jätteillä, epäorgaanisten jätteiden tilavuuden pienentämispotentiaali on pieni materiaalien palamattomuuden takia, voidaan epäorgaanisten jätteiden tilavuutta pienentää korkealämpötilasulatuksen avulla. Sulatuksen avulla saadaan paitsi komponenttien rakenteellinen tilavuus pienennettyä myös tiivistettyä kappaleiden kide- ja hilarakenteet tiheämmiksi muodostaen yhtenäisen lasimaisen matriisin. [43]

KHNP on tutkinut plasmasulatusta toistaiseksi vain koelaitosmittakaavassa eikä käsittelymenetelmällä ole vielä kaupallista referenssiä. Koelaitosmittakaavan kokeissa epäorgaanisen jätteen plasmasulatuksella on saavutettu tilavuudenpientymiskertoimiksi noin kolme. [43] Plasmasulatukseen soveltuvan metallijätteen ollessa suurin yksittäinen voimalaitosjätejake alhaisellakin tilavuudenpientymiskertoimella voidaan saavuttaa merkittävät säästöt loppusijoitustilavuudessa. Olettaessa koesulatuksissa saavutetun tilavuudenpientymiskertoimen vastaavan tuotantokäsittelyn tilavuudenpientymiskerrointa, OL1:n ja OL2:n tuotannossa kertyviin jätemääriin verrattuna, tämä tarkoittaisi kymmenessä vuodessa metallijätteelle yli 800 m³:n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

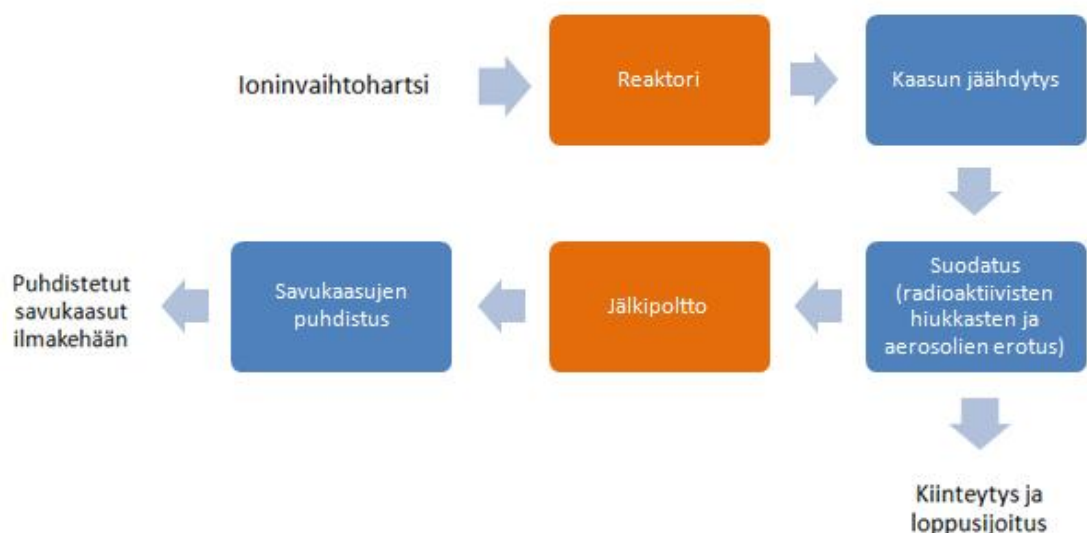
Epäorgaanisen jätteen plasmasulatus voidaan toteuttaa lasitusprosessin yhteyteen, jolloin voidaan käyttää yhteistä poistokaasunkäsittelyjärjestelmää. Näiden kahden käsittelyprosessin yhdistelmällä pystytään käsittelemään käytännössä kaikki voimalaitosjätelajit. [43]

Kuten lasitusprosessin yhteydessä todettiin, lasimaisen jätematriisin on todettu soveltuvan hyvin radioaktiivisten aineiden pidättämiseen. Toistaiseksi KHNP:n tutkimustyö on keskittynyt kuitenkin varsinaisen lasitusprosessin lasimatriisin ominaisuuksien tutkimiseen, eikä sulatetulle jätematriisille ole käytettävissä vastaavaa tutkimustietoa. Verrattaessa sulatuskäsittelyä nykyisin käytössä oleviin epäorgaanisen jätteen käsittelymenetelmiin, jotka käsittävät pääasiassa mekaanisen tilavuuden pienentämisen käyt-

tämällä erilaisia paloittelu-, kokoonpuristus- ja leikkausmenetelmiä, voidaan loppusijoitettavan jätteen radioaktiivisten aineiden pidättämiskyvyn odottaa ainoastaan parantuvan. Pääosin epäorgaaniseen jätteeseen, kuten metallikomponentteihin, sitoutuneet radioaktiiviset aineet ovat primääripiirissä syntyneitä ja pinnoille pidättäytyneitä radioaktiivisia nuklideita. Lasimatriisissa radioaktiiviset aineet sitoutuvat osaksi matriisia sen sijaan, että ne olisivat adsorboituneena jätteen ulkopinnoille. Sulatetun metallijätteen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuus on analysoitava luotettavasti, ja plasmasulatuslaitoksen toteutus on arvioitava suomalaisia vaatimuksia vasten, ennen mahdollisen investointipäätöksen tekemistä.

5.3 NUWA

NUWA-tekniikka on uusi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n kehitysasteella oleva menetelmä orgaanisen radioaktiivisen jätteen termiseen käsittelyyn. Tekniikka perustuu materiaalin kaasutukseen korkeassa lämpötilassa ja ali-ilmaisissa olosuhteissa. Kaasutuksen tuotekaasu jäähdytetään ja suodatetaan hiukkasten ja aerosolien erottamiseksi. Suodatuksella voidaan tuotekaasusta poistaa radioaktiiviset hiukkaset ja aerosolit, mutta, kuten aiemmin termisen lasituskäsittelyn yhteydessä, savukaasujen puhdistusjärjestelmät eivät pysty pidättämään radioaktiivista hiili-14 -isotooppia, jota esiintyy sitoutuneena käytettyihin ioninvaihtohartseihin. Suodatuksen jälkeen savukaasu ohjataan jälkipolttokammioon, jossa tuotekaasu poltetaan hapekkaissa olosuhteissa hiilidioksidiksi ja vedeksi. Jälkipolttokammiosta savukaasut ohjataan konventionaaliseen savukaasujen puhdistukseen. Rikki poistetaan savukaasupesurilla, joka erottaa rikin lisäksi myös muita epäpuhtauksia. Pesurin jälkeen savukaasu ohjataan HEPA-suodattimen kautta poistokaasulinjaan. NUWA-prosessin yksinkertaistettu prosessikaavio esitetään kuvassa 21. [53]



Kuva 21. NUWA-prosessin yksinkertaistettu prosessikaavio.

Kaasutuksella voidaan pienentää merkittävästi loppusijoitettavan jätteen tilavuutta. Menetelmää on toistaiseksi tutkittu vain koelaitteistomittakaavassa, eikä sillä ole vielä kaupallista referenssiä. Koelaitosmittakaavan kokeissa NUWA-tekniikalla on saavutettu tilavuudenpientymiskertoimeksi hartsin koostumuksesta riippuen 10 - 20. Kostuttamalla kiintoainejäännös tilavuuden pientymiskerroin voi nousta aina 33:een. [53]

Kiintoainejäännös, tavanomaisemmin tuhka, muodostaa kuitenkin ongelman loppusijoitukselle. Tuhkaa ei toistaiseksi ole luvitettu loppusijoitettavaksi jätteeksi Suomessa, eikä sen pitkäaikaispysyvyydestä loppusijoitusolosuhteissa ole siten kerätty systemaattisesti tietoa. Arvioitaessa tuhkan loppusijoitustilavuutta on hyvä varautua mahdolliseen sideaineen käyttöön. Sideaineen käyttö tarkoittaa esimerkiksi tuhkan loppusijoitusta sementoituna sekoitusosuudessa 1:1, mikä johtaa loppusijoitustilavuuden kaksinkertaisuuteen. Kostutetun tuhkan ja sementin suhteena tämä tarkoittaa kokonaisuuden tilavuudenpientymiskertoimen asettumista tasolle 10 - 15. Verrattuna Olkiluodossa nykyisin käytössä oleviin menettelyihin tämä vastaisi bitumoidulle ionivaihtohartsille vastaavasti kerrointa 31 - 47. OL1:n ja OL2:n tuotannossa kertyviin jätemääriin verrattuna tämä tarkoittaisi kymmenessä vuodessa ioninvaihtohartsille hieman yli 270 m³:n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

Prosessilaitteisto on mitoittavissa joustavasti halutulle käsittelykapasiteetille. Alustavan suunnittelun perustana on käytetty 20 m³:n vuotuista ioninvaihtohartsijätteenkertymää sekä joko yhden tai kahden kuukauden kampanjanomaista käsittelyjaksoa. Hartsin tilavuuspainolla 1200 kg/m³ rajaehojen mukaiset suunnittelun käsittelykapasiteetit ovat 33,3 kg/h ja 16,7 kg/h. [53] Kaasutusprosessi savukaasunpuhdistusjärjestelmään voidaan sijoittaa myös siirreltävään yksikköön, jolloin samaa prosessilaitteistoa voidaan hyödyntää tarvittaessa useammalla käsittelypaikalla. Ratkaisu mahdollistaa laitteiston yhteisomistuksen tai vuokrauspalvelun useamman toimijan välillä, tai vaihtoehtoisesti yhden palveluntarjoajan käsittelypalvelun useammalla laitospaikalla. [54]

Toistaiseksi menetelmä on suunniteltu vain käytettyjen ioninvaihtohartsien käsittelyyn, eikä menetelmä siten tarjoa kattavaa ratkaisua voimalaitosjätteenkäsittelyyn. Kehitystyön lähtökohdaksi valittiin ioninvaihtohartsit, sillä ne edustavat homogeenisintä ja siten helpommin käsiteltävää voimalaitosjätejätettä. Teknisesti NUWA-menetelmä soveltuu myös homogeenoidulle huoltojätteelle, joka vastaa koostumukseltaan kiinteitä kierrätyspolttoaineita. Ajoparametrien valinta ja jätteen esikäsittely huoltojätteelle vaativat kuitenkin yksityiskohtaisen suunnittelun. [55].

NUWA:n suunnittelun lähtötietoina on käytetty suomalaista ydinenergia-alan lainsäädäntöä, mutta prosessin luvitettavuus tulee koeteltavaksi vasta prosessin kaupalliseen käyttöön siirryttäessä. Kaikki yksikköoperaatiot ja käsittelyprosessi kokonaisuudessaan perustuvat konventionaalisissa sovelluksissa koeteltuun teknologiaan, joten käyttökemustietoja on saatavilla laajasti [53]. Tuhkan loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuus ja kaasutuslaitoksen ydintekninen toteutus on analysoitava ennen mahdollisen investointipäätöksen tekemistä.

5.4 Jätteenkäsittelyn palveluiden ostaminen

TVO on käyttänyt ruotsalaisen ydinvoima-alan palveluita tarjoavan Studsvik AB:n palveluita 2000-luvulla suurien käytöstä poistettujen komponenttien romutuksessa. Studsvik tarjoaa ydinalan palveluja jätteenkäsittelyn, tuotannon tehostamisen ja käytöstäpoiston osa-alueilla. Jätteenkäsittelyyn on tarjolla asiantuntijapalveluiden lisäksi jätteenkäsittelypalveluja kolmessa erilaisessa prosessissa Ruotsin Studsvikissa. Metallijätteen käsittelyyn on tarjolla TVO:n romutusprojekteissa käytetty sulatusmenetelmä, jota voidaan käyttää pienelle metalliromulle kuin suurille romukomponenteillekin. Huoltojätteen, jäteöljyn ja aktiivihiilen käsittelyyn Studsvik tarjoaa polttokäsittelyä, jossa jätteet poltetaan tavanomaisessa jätteenpolttoyksikössä. Lisäksi tarjolla on pyrolyysikäsittely uraanipitoisen huoltojätteen käsittelyyn. Palvelu on suunnattu pääasiassa ydinpolttoaineiteollisuudelle. Tavanomaisessa ydinenergian tuotannossa ei synny uraanipitoista huoltojätettä. [56]

5.4.1 Metallijätteen sulatuskäsittely

Romutuskäsittely perustuu sulatukseen, jonka esikäsittelynä komponentit pilkotaan ja suurimmat aktiivisuudet dekontaminoidaan pinnoilta kuulapuhaltamalla. Prosessin yhteydessä otetaan talteen kaikki jätteen sisältämät radioaktiiviset aineet, ja ne palautetaan Olkiluotoon. Palautuva jäte koostuu kuulapuhallus- ja leikkausjätteestä, suodattimista ja muusta käsittelyn sekundaarijätteestä sekä radioaktiivisista valuharkoista. Prosessissa erotettu puhdas tai hyvin lievästi kontaminoitunut metallijäte vapautetaan valvonnasta Ruotsissa.

Studsvikiin on lähetetty romuja kahdessa erässä vuosina 2010 ja 2012. Ensimmäisessä erässä romutettavaksi lähetettiin vuosina 2005 ja 2006 käytöstä poistetut hiiliteräksiset välitulustinlohkot. Lähetyksen arvioitu kokonaistilavuus oli noin 1040 m³ ja paino 704 tonnia. Jäte-erän käsittelystä sekundaarijätteenä palautettiin metalliharkkoja ja käsittelyjätettä yhteensä noin 75 m³ ja 75 051 kg. [57, s. 1] Käsittelyllä saavutettiin siis lähes 93 prosentin säästö jätetilavuudessa tilavuudenpientymiskertoimen oltua lähes 14.

Toisessa erässä käsittelyyn toimitettiin kaikkiaan 1 072 200 kg metalliromua, pääasiassa käytöstä poistettujen turbiinien osia. Sekundaarijätteenä Olkiluotoon loppusijoitettavaksi palautettiin 54 350 kg käsittelyjätettä, 2 286 kg huoltojätettä sekä 30 323 kg metalliharkkoja. Loppusijoitettuna sekundaarijätteen määrä vastaa noin 30 m³ tilavuutta. Käsittelyllä saavutettiin loppusijoitettavan jätteen massan aleneminen vain noin kahdeksaan prosenttiin alkuperäisestä. Käsiteltyjen komponenttien loppusijoitustilavuus aleni vastaavasti noin 10 prosenttiin alkuperäisestä tilavuudenpientymiskertoimen oltua noin 10. Romutus projektin ansiosta säästetty loppusijoitustilavuus oli noin 582 m³. [58]

Sulatuskäsittelylle Studsvik esittää metallijätteelle 95 %:n tilavuuden pientymisen, joka on toteutettujen projektien käyttökokemuksia hieman optimistisempi [56]. Tilavuudenpientymiskertoimena tämä vastaa kerrointa 20.

Metalliromun sulatuskäsittelyssä pienin mahdollinen käsiteltävä erä on viisi tonnia hiiliterästä tai ruostumatonta terästä, jotka voidaan käsitellä yhdessä. Muita mahdollisia käsiteltäviä metalleja ovat kupari, messinki, alumiini ja lyijy, kukin metallilaatu erikseen. Käsittelyyn toimitettavan jätteen annosnopeus saa olla pinnalta mitattuna korkeintaan 0,2 mSv/h, ja metrin etäisyydeltä mitattuna korkeintaan 0,1 mSv/h. Kontaminaation komponentin pinnoilla tulee olla alle 10 Bq/cm²/mm puhtaalle tai vastaavasti alle 15 Bq/cm²/mm maalatulle metallipinnalle. Kontaminaatiosta kokonaisalfa-aktiivisuus täytyy olla alle 10 Bq/cm² ja transuraaniaktiivisuus alle 1 Bq/cm². [59]

Tällä hetkellä varastoituna tai loppusijoitettuna on yhteensä 290 betonilaatikkoa metalli- ja sekaromua, joista 176 betonilaatikolle on raportoitu pinta-annosnopeus. Näistä 110 betonilaatikolle on pakkaushetkellä mitattu 0,2 mSv/h:n tai sitä pienempi pinta-annosnopeus. Metall- ja sekaromusta arvioidaan, että 80 prosenttia on metalliromua. Mikäli tätä matala-aktiivista metalliromua pystyttäisiin toimittamaan sulatuskäsittelyyn vastaavalla noin 38 prosentin osuudella, se tarkoittaisi tilavuudenpientymiskertoimella 14 - 20 laskettuna, kymmenessä vuodessa noin 345 m³:n säästöä loppusijoitustilavuudessa. Mikäli sulatuskäsittelyyn kelpaavaa matala-aktiivista metalliromua on vastaavassa suhteessa myös niissä 114 betonilaatikossa, joille ei ole raportoitu pinta-annosnopeutta pakkaushetkellä, käsittelyyn toimitettavan metalliromun potentiaalinen osuus nousisi 63 prosenttiin. Tämä vastaisi kymmenessä vuodessa noin 575 m³:n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa. Jättemäärää vastaava loppusijoitustilavuus riippuu siitä, kuinka suuri osa jätteestä on metalliharkkoja ja kuinka suuri osa tynnyreihin pakattua käsittelyjätettä.

Käsitelty puhdas tai vain vähän aktiivinen metalli valvonnasta vapautetaan käsitellyn yhteydessä Euroopan komission suosituksen RP89, taulukon 3-1 mukaisesti [60]. Valvonnasta vapautettu metalli seostetaan muun kierrätysmetallin joukkoon siten, että yhdessä sulatuserässä käytetään korkeintaan 10 % valvonnasta vapautettua metallia. Näin lopullisen uusiokäyttöön ohjattavan metallin ominaisaktiivisuus putoaa edelleen korkeintaan kymmenesosaan alkuperäisestä. Valvonnasta vapautusrajat ylittäviä jätteitä voidaan Ruotsin ydinturvallisuusviranomaisen SSM:n (Strålsäkerhetsmyndigheten) luvalla varastoida Studsvikin tiloissa myöhempää vapautusta varten, mikäli vapautusrajat alitetaan kohtuullisessa ajassa, korkeintaan 10 vuodessa. Studsvikin tiloihin voidaan varastoida vanhennettavaa ulkomaista kaupallisessa käsittelyssä erotettua jätettä korkeintaan 20 tonnia vuodessa. [59]

Radioaktiiviset jätteet ovat jätteen tuottajan hallinnassa ja vastuulla koko käsittelyketjun ajan. Vanhennettavat jätteet siirtyvät Studsvikin haltuun vasta alittaessaan vapautusrajat. Jäte, joka on liian aktiivista valvonnasta vapautettavaksi, palautetaan alkuperämaahan. Toimituksen yhteydessä jätteen haltijan on allekirjoitettava takaisinottositoumus. Palautus on toteutettava kahden vuoden kuluessa saapumisesta Ruotsiin. Studsvik raportoi vuosittain kunkin asiakkaan varastoitavien jätteiden tilanteen ja odotettavissa olevan vapautusajankohdan. [59] Sulatuskäsittelystä palautuva radioaktiivinen metalli voidaan loppusijoittaa VLJ-luolaan tavanomaisen metalliromun tavoin.

5.4.2 Orgaanisen jätteen polttokäsittely

Orgaanisille jätteille; huoltojätteelle, öljyille ja aktiivihieille Studsvik tarjoaa polttokäsittelyä. Polttokäsiteltävälle jätteelle Studsvik lupaa 97 %:n tilavuuden pienentymisen ja 92 % painon alenemisen [56]. Tilavuudenpientymiskertoimenä tämä vastaa kerrointa 33. Menetelmää ei toistaiseksi tarjoa ioninvaihtohartsien käsittelyyn, mutta periaatteessa vastaavalla menetelmällä pystytään käsittelemään myös vedetöntä ioninvaihtohartsia. Lopputuotteena saatava tuhka on kemiallisesti stabiilia.

Polttokäsittelyyn hyväksyttävän jätteen annosnopeus saa olla korkeintaan 1 000 $\mu\text{Sv/h}$, mutta kuitenkin niin, että enintään 5 %:n jäteosuuden aktiivisuus saa ylittää 100 $\mu\text{Sv/h}$. Vastaavasti jätteen kokonaisaktiivisuus saa olla korkeintaan 4 000 Bq/g, josta alfa-aktiivisuutta enintään 80 Bq/g. [61] Nykyisin menettelyin Olkiluodon kaatopaikalle valvonnasta vapautettavan huoltojätteen ominaisaktiivisuuden yläraja on 10 Bq/g, joten polttokäsittely on potentiaalinen vaihtoehto loppusijoitettavan huoltojätteen käsittelyyn ja erityisesti loppusijoitustilavuuden pienentämiseen. Jäteöljyistä valtaosa puhdistetaan ja ohjataan valvonnasta vapautuksen kautta uusiokäyttöön. Loppusijoitukseen päätyviä öljyisiä jätteitä kertyy vain hyvin pieniä määriä, alle 1 m³ vuodessa, minkä takia niiden kuljettaminen ulkomaille käsiteltäväksi ei ole mielekästä menettelyn raskaan byrokratian ja kuljetuskustannusten takia.

Käytetyn ioninvaihtohartsin polttokäsittely toisen valtion alueella, johtaa ongelmaan hiili-14 -isotoopin vapautumisesta ilmakehään. Kuten termisten käsittelymenetelmien yhteydessä aiemmin todettiin, poistokaasunpuhdistusjärjestelmät eivät kykene pidättämään kaasumaista hiili-14 -isotooppia, joka muodostaa muun hiilen tavoin hapettavissa olosuhteissa hiilidioksidia. Ydinenergiain mukaisesti Suomen valtion rajojen ulkopuolella käsitellyn ydinjätteen aktiiviset komponentit on palautettava Suomeen loppusijoitettavaksi. Ilmakehään vapautuvan hiili-14 -isotoopin talteenotto ja palauttaminen ei ole teknisesti ja taloudellisesti mielekästä, sillä se vaatisi käytännössä kaiken poltossa syntyvän hiilidioksidin talteenoton. Mikäli tavoitellaan ioninvaihtohartsien poltto- tai muuta vastaavaa termistä käsittelyä ulkomailla, tulee viranomaisten kanssa käydä periaatteellinen keskustelu sen aiheuttamista ilmapäästöistä.

Polttokäsittelyssä syntyvän tuhkan osalta, kuten kaasutuksen kiintoainejäännöksenkin osalta, on hyvä varautua mahdolliseen sideaineen käyttöön. Sideaineen käyttö sekoitussuhteessa 1:1 johtaa loppusijoitustilavuuden kaksinkertaistumiseen tilavuudenpientymiskertoimen laskiessa vastaavasti puoleen ollen noin 17. Verrattuna Olkiluodossa nykyisin käytössä oleviin menettelyihin tämä vastaisi tynnyriin puristetulle huoltojätteelle tilavuudenpientymiskerrointa 10. OL1:n ja OL2:n tuotannossa kertyviin jättemääriin verrattuna tämä tarkoittaisi kymmenessä vuodessa arviolta 120 m³:n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

5.5 Nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien uusinta ja toimintojen tehostaminen

Uusinvestoinnin ja ulkoistetun jätteenkäsittelypalvelun rinnalla yhtenä vaihtoehtona on pidättäytyminen nykyisessä jätteenkäsittelyteknologiassa ja jätehuoltokonseptissa. Tällöin säästetään uusinvestointi-, tutkimus- ja luvituskustannuksissa, mutta toisaalta menetetään uusien teknologioiden mahdollistamat tilavuudensäästöpotentiaalit. Osittain jo vanhentuneen laitekannan takia ratkaisu ei kuitenkaan tarkoita nollainvestointeja, vaan osa laitekannasta on uusittava jo lähivuosien aikana.

Pidättäytyminen jo käytössä olevassa jätteenkäsittelyteknologiassa ei kuitenkaan tarkoita, ettei jätehuoltokonseptissa ja -menettelyissä voisi olla kehittämisen varaa. Tarkastelemalla toimintoja kriittisesti prosessista on mahdollista löytää yksittäistoimintoja, joita tehostamalla voidaan säästää aikaa, materiaaleja tai jopa loppusijoitustilavuutta. Tehostamistoimille yhteistä on tehdyn työpanoksen kohdistaminen prosessin alkuun, jätteen syntyipaikoille, loppusijoitustoimintojen sijaan.

5.5.1 Odotettu uusintatarve ja -kustannukset

Huoltojätteen käsittelyyn käytettävien hydraulisten puristimien uusinta tulee ajankohtaiseksi ensimmäisenä. Nykyisin OL1:llä ja OL2:lla käytössä olevat huoltojätteen hydraulipuristimet ja niiden yhteyteen sijoitetut paikallisilmastoidut lajittelukaapit on toimitettu osana alkuperäistä laitostoimitusta. Laitteistojen kunto on huonontunut vuosikymmenien aikana huomattavasti, suojaukset ovat puutteelliset ja varaosien hankinta haastavaa. Työ- ja säteilyturvallisuus työkohteella ei täytä nykypäivän vaatimuksia.

Laitteistojen uusinnan yhteydessä on hyvä huomioida myös mahdollinen uusi teknologia huoltojätteen käsittelyssä. Radioaktiivisen jätteen käsittelyssä jätteen syntymisen ehkäisyn lisäksi tilavuuden pienentäminen on merkittävin tavoite loppusijoituskustannusten hallitessa jätehuoltokustannuksia. Pelkän tynnyriin puristamisen lisäksi huoltojätteen tilavuutta voidaan pienentää esim. silppuamalla jäte. Esimerkiksi Envicont GmbH esittää silppurin ja hydraulipuristimen yhdistelmälle jopa 60 %:n tilavuuden säästöä verrattuna pelkän puristimen käyttöön huoltojätteen pakkaamisessa [62]. Esitetty tilavuuden säästö on kuitenkin esitetty suhteessa puristettuun jätteeseen ilman, että on spesifioitu käytetyn puristuksen tehokkuutta. Esimerkiksi Olkiluodossa käyttämällä 200 tonnin puristinta jo puristettujen tynnyrien kokoonpuristamiseen saavutetaan verrattain hyvä tilavuuden pienennys. Mikäli silppurin ja hydraulipuristimen yhdistelmällä saavutettua tilavuuden pienentymistä on verrattu pelkkään yksinkertaiseen, tynnyriissä tapahtuvaan, puristukseen, ei silppurin käytöllä saavuteta merkittävää etua.

Huoltojätteenkäsittelylaitteistoja tarjoaa markkinoilla useampikin yritys. Saksalainen Envicont GmbH:n lisäksi eurooppalaisiin ydinvoimalaitoksiin huoltojätteen käsittelylaitteistoja on toimittanut esimerkiksi ruotsalainen Fagerström Industrikonsult AB. Alustavien kustannusselvitysten perusteella pelkän hydraulipuristimen hankintakustannukseksi tulisi noin 210 - 290 tuhatta euroa. Silppurilla, lajittelukaapilla tai molemmilla varustettuna laitteiston kokonaishinta kohoaa varustelusta riippuen aina noin 340 - 490

tuhanteen euroon. Kahden erillisen käsittelylaitteiston hankinnan sijaan tulisi arvioida mahdollisuus vain yhden, molempia laitosisyksiköitä palvelevan laitteiston hankintaan.

Nestemäisen jätteen käsittelylaitteistoista bitumointijärjestelmä ja tynnyrisekoitin tulee todennäköisimmin uusia vielä kerran OL1 ja OL2 laitosisyksiköiden suunnitellun käyttöiän aikana. Bitumointijärjestelmä uusittiin viimeksi vuosina 2006 ja 2007. OL1:lle ja OL2:lle toteutettujen muutosten kokonaiskustannuksiksi kohdistettiin yli miljoona euroa. Mikäli arvioidaan vuosittaiseksi kustannusten nousuksi 3,5 %, vastaavan työn toteutus esimerkiksi vuosina 2026 ja 2027 tulisi kustantamaan noin kaksi kertaa saman verran. Tynnyrisekoitin on hankittu vuonna 1995, jolloin sen hankintakustannus oli noin 20 000 euroa. Mikäli sen uusinta tulee ajankohtaiseksi 30 vuoden käytön jälkeen vuonna 2025, hankintakustannus tulee vastaavasti olemaan yli 50 000 euroa. Alipainehaihduttimet on hankittu vuonna 2008. Tarve näiden uusimiseen vielä OL1 ja OL2 laitosisyksiköiden suunnitellun käyttöiän aikana ei ole todennäköistä.

Metalli- ja sekaromun käsittelylaitteistoista 200 tonnin leikkuri ja puristin sekä näitä palveleva hydraulikoneikko tulee todennäköisimmin uusia kerran jäljellä olevan OL1 ja OL2 laitosisyksiköiden suunnitellun käyttöiän aikana. Laitteisto on hankittu vuonna 1995, jolloin sen hankintakustannus oli noin 100 000 euroa. Mikäli sen uusinta tulee ajankoh- taiseksi 30 vuoden käytön jälkeen vuonna 2025, hankintakustannus tulee vastaavasti olemaan noin 300 000 euroa. Jättemurskain on hankittu vuonna 2004. Tarve sen uusimi- seen OL1 ja OL2 laitosisyksiköiden suunnitellun käyttöiän aikana ei ole todennäköistä.

Taulukossa 8 esitetään yhteenvetona arvio nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien uusinta-ajankohdista ja hankintakustannuksista. Lisäksi on määritetty investoinneille kokonaiskustannus käyttäen annuiteettimenetelmää ja 5 %:n korkoa. Poistoaika on mää- ritetty oletetun hankintavuoden ja laitosisyksiköiden käytöstäpoistovuoden erotuksena. Arviota voidaan pitää ainoastaan suuntaa antavana, sillä todellisen uusintatarpeen ja hankintakustannusten ennakointi on mahdotonta. Muiden järjestelmien ja laitteistojen, kuten varastotilojen ja nostolaitteiden, uusimistarve ei ole suoraan sidottu käytettävään käsittelytekniikkaan. Näiden uusimistarvetta ja -kustannuksia ei siten ole tarpeen käsi- tellä tässä yhteydessä.

Taulukko 8. Arvio nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien uusinta-ajankohdista ja hankintakustannuksista.

Laitteisto	Hankintavuosi ja -kustannus, euroa						Kokonaiskustannus, €
	2016	...	2025	2026	2027	Yhteensä	
Huoltojätteen ¹⁾ hydraulipuristin	uusinta ¹⁾						
Bitumointilaitteisto				uusinta	uusinta		
Tynnyrisekoitin			uusinta				
200 tonnin leikkuri ja puristin			uusinta				
Yhteensä							

1) Voidaan hankkia vain yksi, molempia laitosesiköitä palveleva, käsittelylaitteisto tai oma laitteisto kummallekin laitosesikölle.

5.5.2 Jätteen määrän minimointi ja lajittelun tehostaminen

Pyrittäessä radioaktiivisen jätteen loppusijoitustilavuuden pienentämiseen ensisijainen, teknisesti helpoin ja edullisin tapa on panostaa jätteen määrän vähentämiseen. Radioaktiivisen jätteen määrää voidaan vähentää pääasiassa kahdella tavalla, ehkäisemällä jätteen syntyä ja erottelemalla puhdas tai vain hyvin vähän radioaktiivinen jäte niin, että se voidaan valvonnasta vapauttaa sen sijaan, että se käsiteltäisiin radioaktiivisena jätteenä.

Radioaktiivisen jätteen syntyä voidaan ehkäistä parhaiten huolellisella työn suunnittelulla ja prosessin ajoparametrien ja komponenttien uusinnan optimoinnilla sekä valvonta-alueella työskentelevien jätteenkäsittelytietoisuuden parantamisella. Työsuunnittelulla ehkäistään tarpeettomien materiaalien ja työkalujen tuominen valvonta-alueelle ja optimoidaan suoja-alueiden rajausta ja suojausta kontaminaation leviämisen ehkäisemiseksi. Suojausta suunniteltaessa on hyvä muistaa, että liian laajat suojatut alueet tai tarpeeton suojausten käyttö lisää työvaiheessa tuotetun jätteen määrää.

Prosessin ajoparametrien optimoinnin tuoma hyöty radioaktiivisen jätteen syntymisen ehkäisyssä havaitaan selkeimmin prosessivesien puhdistuksessa käytettyjen suodatin materiaalien käytössä. Suodatinmateriaaleina ioninvaihtohartsit muodostavat merkittävän osan loppusijoitettavasta jätteestä. Ioninvaihtohartsien uusimistaajuus on optimoitava prosessiveden laadun ja tarvittavan ioninvaihtohartsimäärän suhteen niin, että ioninvaihtohartsit uusitaan riittävän usein, jotta voidaan ylläpitää riittävä prosessiveden puhtaustaso, mutta niin, että tuotetaan kuitenkin mahdollisimman vähän ioninvaihtohartsia jätettä. Optimoimalla ioninvaihtohartsien kulutusta säästetään myös uusien ioninvaihtohartsien hankintakustannuksissa.

Komponenttien uusintaa suunniteltaessa ydinvoima-alalla on syytä pitää mielessä paitsi alan korkeat turvallisuus- ja käytettävyyssvaatimukset myös prosessista poistettujen radioaktiivisten komponenttien vaativa jätehuolto. Komponenttien säännöllisellä uusinnalla pyritään takaamaan luotettava ja turvallinen sähköntuotanto. Kuitenkin on huomioitava, että käytettyjen komponenttien käsittely ja loppusijoitus ovat muiden vaih-

totyön kustannuksen ohella merkittävä kustannuserä. Uusintatöissä, kuten ioninvaihtohartsien vaihtotaajuuksien määrittämisessäkin kyse on optimoinnista hyötyjen ja haittojen välillä.

Teknisen optimoinnin ja työskentelymenetelmien tehostamisen lisäksi jätteen syntyä voidaan ehkäistä parantamalla valvonta-alueella työskentelevien työntekijöiden tietoisuutta radioaktiivisen jätteenkäsittelystä ja sen kustannuksista. Tietoisuuden parantuessa työntekijät ymmärtävät ylimääräisen jätteen syntymisen vaikutukset ja osaavat käyttää materiaaleja ja työkaluja harkitummin niin suunnittelussa kuin itse työn toteutuksessa-kin.

Erottelemalla puhdas tai vain hyvin vähän radioaktiivinen jäte niin, että se voidaan valvonnasta vapauttaa sen sijaan, että se käsiteltäisiin radioaktiivisena jätteenä, voidaan säästää merkittävästi aikaa ja rahaa. Voimalaitosjätehuollon kannalta on tärkeää, että valvonnasta vapautettava jäte pystytään erottelemaan radioaktiivisesta jätteestä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Varhaisen erottelun etuina ovat jätteen syntypaikalla oleva tietämys jätteen alkuperästä, ja sen perusteella myös oletetusta kontaminaatio-tasosta, sekä kontaminaation leviämisen estäminen aktiivisemmasta jätteestä puhtaampaan jätteeseen. Kontaminaation siirtyminen jätekomponenttien välillä, eli niin kutsuttu ristikontaminaatio, voi johtaa valvonnasta vapautettavaksi kelpaavien jätekomponenttien likaantumiseen niin, että ne on käsiteltävä jatkossa radioaktiivisena jätteenä. Vastaavasti toteutettaessa aktiivisuusmittaukset syntypaikkalajittelomattomalle jätteelle esimerkiksi samaan säkkiin tai laatikkoon pakatut aktiiviset jätteet aiheuttavat koko mitattavan jäte-erän luokituksen loppusijoitettavaksi jätteeksi, vaikka osa jätteestä olisi riittävän puhdasta valvonnasta vapautettavaksi.

Jo karkea jätteen alkuperätietoihin perustuva lajittelu syntypaikalla saisi todennäköisesti aikaan merkittävän vaikutuksen loppusijoitettavan jätteen määrässä. Jätteiden aktiivisuustaso on usein arvioitavissa jo työn suunnitteluvaiheessa, mikä mahdollistaa työntekijöiden ohjeistamisen ennakkoon niin, ettei kontaminaatiotasojen tulkinta jää yksittäisen työntekijän vastuulle. Mikäli tavoitellaan täydellistä erottelua, tulisi jokaisen jätekomponentin annosnopeus mitata jo syntypaikalla. Tämä vaatisi kuitenkin mittalaitteita, osaavaa henkilökuntaa sekä tilaa työkohteiden välittömästä läheisyydestä, mikä vaarantaisi työn sujuvuuden ja mielekkyyden. Jätteiden määrän minimointi ja lajittelun tehostaminen yksinkertaisin toimenpitein tuovat säästöjä voimalaitosjätehuoltoketjussa käytettävästä käsittelymenetelmästä riippumatta.

5.5.3 Vanhentaminen

Olkiluodon nykyinen jätehuoltokonsepti perustuu jätteiden lajitteluun aktiivisuuspitoisuuden mukaisesti joko valvonnasta vapautettaviin tai loppusijoitettaviin jätteisiin. Loppusijoitettavat jätteet jakautuvat edelleen matala- ja keskiaktiivisiin jätteisiin. Lajittelu perustuu mittaushetkellä vallitsevaan aktiivisuuteen. Aktiivisuusmittaus suoritetaan jätelajista riippuen yhdessä tai useammassa vaiheessa jätteenkäsittelyn ja pakkaamisen edessä. Aktiivisuus on ominaisuutena fyysikaalisen luonteensa mukaisesti kuitenkin jatkuvasti muuttuva. Ydinjätteen tapauksessa, kun reaktorista tai muualta primääripiiristä

poistettu materiaali ei enää altistu aktivoitumiselle tai kontaminoitumiselle, aktiivisuus vähenee ajan funktiona.

Radioaktiivisten isotooppien luontaista hajoamista voidaan hyödyntää radioaktiivisen jätteen käsittelyssä. Varastoimalla jätteitä ennen käsittelyä mahdollistetaan niiden aktiivisuuspitoisuuden laskeminen tasolle, jolla niiden käsittely on helpompaa. Parhaimmillaan varastoitujen jätteiden aktiivisuuspitoisuus laskee niin alas, että ne voidaan vapauttaa valvonnasta, eikä niitä tarvitse käsitellä tai loppusijoittaa radioaktiivisena jätteenä. Radioaktiivisen jätteen pitkäaikaisvarastointia, jonka tarkoituksena on aktiivisuuspitoisuuden laskeminen, kutsutaan vanhentamiseksi.

Loviisan ydinvoimalaitoksella vanhentamista sovelletaan huoltojätteen aktiivisuuspitoisuuden laskemiseksi siten, että vanhennettu jäte voidaan varastoinnin jälkeen vapauttaa valvonnasta. Loviisassa vanhenemiskonsepti on rajattu viiden vuoden maksimi varastointiaikaan. Huoltojätetyynyreille suoritetaan aktiivisuusmittaus, jonka perusteella määritetään, voidaanko jäte vapauttaa valvonnasta heti tai viiden vuoden kuluessa vai loppusijoitetaanko jäte radioaktiivisena jätteenä. Viiden vuoden kuluessa valvonnasta vapautuksen mahdollistaman aktiivisuuspitoisuuden saavuttavat tynnyrit varastoidaan vapautusvuosittain siten, että samana vuonna vapauttamiskriteerit täyttävät huoltojätetyynyrit varastoidaan yhdessä. Ennalta määritetyn varastointiajan kuluttua jätteet voidaan vapauttaa valvonnasta ilman lisätoimenpiteitä tai -aktiivisuusmittauksia.

Olkiluodon ydinvoimalaitoksella vanhentamista voitaisiin hyödyntää vastaavasti huoltojätteen aktiivisuuden alentamiseksi valvonnasta vapauttamista varten. Vanhentamiskonseptin käyttöönotto vaatisi huoltojätteen aktiivisuuspitoisuusperustaisen lajittelun kehittämistä sekä tarvittavan varastointitilan varaamista. Koska valvonnasta vapautettavan ja loppusijoitettavan huoltojätteen käsittely poikkeaa toisistaan, lajittelu olisi tarkoituksenmukaisinta toteuttaa ennen käsittelyä. Tämä voitaisiin toteuttaa laitosyksiköillä nykyisen karkean, annosnopeusmittauksiin perustuvan ensimmäisen lajittelun yhteydessä.

Karkeassa lajittelussa laitosyksiköltä kerätyt huoltojättesäkit lajitellaan annosnopeusmittauksiin perustuen niin, että pinnalta mitattuna annosnopeudeltaan alle 10 $\mu\text{Sv/h}$ säteilevät säkit lajitellaan käsiteltäväksi valvonnasta vapautettavina jätteinä ja yli 10 $\mu\text{Sv/h}$ säteilevät säkit lajitellaan käsiteltäväksi loppusijoitettavina jätteinä. Tässä yhteydessä voitaisiin lisätä lajittelu jakeita niin, että lisäksi kerättäisiin jätejake, jonka valvonnasta vapautus olisi odotettavissa seuraavien viiden vuoden aikana. Koska huoltojätteesä, kuten Olkiluodon voimalaitosjätteesä yleensä, hallitseva radioaktiivisuutta aiheuttava nuklidi on koboltti-60, jonka puoliintumisaika on 5,3 vuotta, viiden vuoden vanhentamisvarastoinnilla, pystyttäisiin valvonnasta vapautukseen ohjaamaan noin kaksi kertaa niin aktiivista jätettä kuin nykyisellä konseptilla. Annosnopeuden osalta tämä tarkoittaisi alle 20 $\mu\text{Sv/h}$ pinnaltaan säteileviä säkkejä. Lajittelussa olisi hyvä edelleen erottaa alle 10 $\mu\text{Sv/h}$ pinnaltaan säteilevät säkit, jotta välttyään kaikkien muodostettavien huoltojätepaalien vanhentamiselta. Alle 10 $\mu\text{Sv/h}$:n säkit ja yli 10 $\mu\text{Sv/h}$:n, mutta alle 20 $\mu\text{Sv/h}$:n säkit paalattaisiin omina ryhminään. Lopullinen valvonnasta vapautus -päätös ja tarvittavan vanhentamisajan määrittäminen tehtäisiin, kuten nykyisessäkin konseptis-

sa, perustuen valmiille huoltojätepaalille suoritettavaan eri radionuklidit tunnistavaan niin kutsuttuun nuklidikohtaiseen aktiivisuusmittaukseen. Vanhennettavien huoltojätepaalien varastointi voitaisiin toteuttaa MAJ-varastossa.

Elokuussa 2015 varastoiduista, loppusijoitusta odottavista 119 huoltojätetyynyristä 27 oli sellaisia, joille on pakkaushetkellä analysoitu tynnyrin pinnasta $20 \mu\text{Sv/h}$:n tai sitä alempi pinta-annosnopeus. Mikäli huoltojätettä pystyttäisiin valvonnasta vapauttamaan viivästäjän jälkeen vastaavalla noin 23 prosentin osuudella, se tarkoittaisi kymmenessä vuodessa noin 29 m^3 :n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa.

Muiden jätelajien osalta menettelyä voitaisiin soveltaa metalli- ja sekaromun valvonnasta vapauttamiseen. Johtuen annosnopeusmittaukseen perustuvasta aktiivisuusmäärityksestä, metallijätteelle vaadittavaa vanhentamisaikaa ei kuitenkaan voida tarkasti määrittää ja valvonnasta vapauttaminen vaatii aktiivisuusmittausten uusimisen varastoinnin päätteeksi. Metalli- ja sekaromun vanhentamisvarastointi vaatii enemmän tilaa, koska valvonnasta vapautettavaa romua ei esikäsitellä laitossyöksiköillä vaan se toimitetaan kierrätykseen sellaisenaan. Tehostamalla varastointia romun vanhentamisvarastoinnille voitaisiin varata tilat MAJ-varaston yhteyteen rakennetusta komponenttivarastosta.

Metalliromun valvonnasta vapauttamisessa sovelletaan yleistä valvonnasta vapauttamista. Yleisen valvonnasta vapauttamisen raja-arvo aktiivisuuspitoisuudelle on kymmenes osa siitä, mikä tapauskohtaisen luvan puitteissa valvonnasta vapautettavan huoltojätteen aktiivisuuspitoisuuden raja-arvo on. Elokuussa 2015 varastoituna tai loppusijoitettuna oli yhteensä 234 betonilaatikkoa matala-aktiivista metalliromua, joista 126 betonilaatikolle oli raportoitu pinta-annosnopeus. Näistä 33 betonilaatikolle on pakkaushetkellä mitattu pinta-annosnopeudeksi nolla. Mikäli nolla-annosnopeuden matala-aktiivista metalliromua pystyttäisiin valvonnasta vapauttamaan viivästäjän jälkeen vastaavalla noin 14 prosentin osuudella, se tarkoittaisi kymmenessä vuodessa noin 170 m^3 :n säästöä loppusijoitustilavuudessa. Mikäli nolla-annosnopeuden matala-aktiivista metalliromua on vastaavassa suhteessa myös niissä 108 betonilaatikossa, joille ei ole raportoitu pinta-annosnopeutta pakkaushetkellä, viivästäjän jälkeen valvonnasta vapautettavissa olevan metalliromun potentiaalinen osuus nousisi 26 prosenttiin. Tämä vastaisi kymmenessä vuodessa noin 320 m^3 :n säästöä loppusijoitettavan jätteen tilavuudessa. Vanhentamista voidaan hyödyntää osana voimalaitosjätehuoltoa käytettävästä käsittelymenetelmästä riippumatta.

6 UUSIEN JÄTTEENKÄSITTELYRATKAISUJEN MAHDOLLISTAMA SÄÄSTÖPOTENTIAALI

Tilavuustehokkaiden käsittelymenetelmien kautta saavutettava säästö loppusijoituskustannuksissa on arvioitavissa loppusijoitustilojen investointikustannusten ja toiminnan edellyttämien materiaalikustannusten kautta. Säästöpotentiaalin määrittäminen on oleellista, jotta pystytään arvioimaan tehtävien investointien kannattavuutta. Loppusijoituskustannuksiin sidottu säästöpotentiaali antaa taloudellisesti merkittävimmän lähtökohdan jätteenkäsittelyn investointipäätösten tekemiseen. Taloudellista lähtökohtaa tärkeämpänä lähtökohtana on edelleen pidettävä säteilyturvallisuutta.

Suorien loppusijoituskustannussäästöjen ohella kustannussäästöjä ja toiminnan tehostamista voidaan hakea keskitettyjen toimintojen kautta. Lisäksi jätteenkäsittelyinvestointeja voidaan hyödyntää tarjoamalla jätteenkäsittelyn palvelutoimintoja ja asiantuntijapalveluita muille ydinalan toimijoille.

6.1 Säästöpotentiaali OL1:n ja OL2:n käytön aikana tuotetun jätteen loppusijoituskustannuksissa.

Taulukossa 9 esitetään OL1:lle ja OL2:lle luvun neljä voimalaitosjätehuoltokustannuksiin ja luvun viisi odotettuihin loppusijoitettavan jätteen tilavuustietoihin perustuen kullekin arvioidulle käsittelyratkaisulle odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa. Säästö on esitetty kahden voimalaitoksen yhteenlaskettuna säästönä. Kustannussäästö on määritetty nykycustannuksin huomioiden loppusijoituksen investointi- ja materiaalikustannukset. Laskennassa ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia jäljelle jäävän loppusijoitettavan jätteen loppusijoituskustannuksissa.

Taulukko 9. OL1:llä ja OL2:lla odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa käsittelyratkaisuihin.

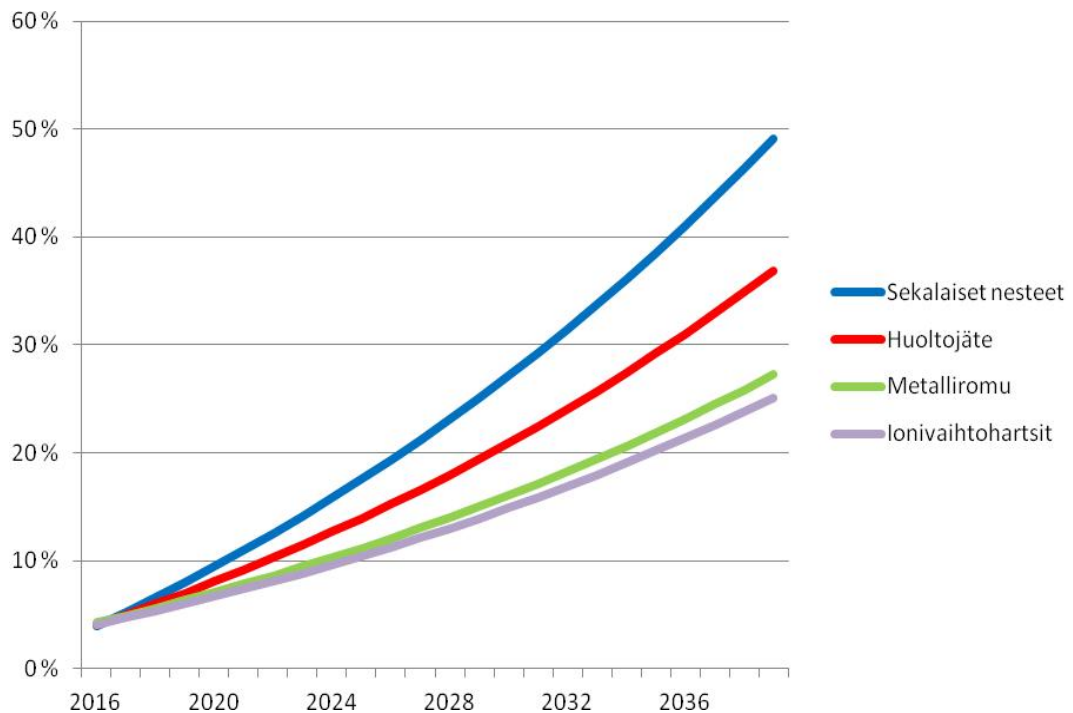
	Huoltojäte		Metalliromu		Hartsit		Sekalaiset nesteet		Yhteensä	
	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v
Lasitus	12,3		–	–	28		4,3		44,6	
Plas- masulatus	–	–	80		–	–	–	–	80	
NUWA	–	–	–	–	27		–	–	27	
Metallijät-¹ teen sula- tuskäsittely	–	–	57,5		–	–	–	–	57,5	
Org. jät-¹ teen polt- tokäsittely	11,5		–	–	–	–	–	–	11,5	
Vanhen- taminen	2,9		32		–	–	–	–	34,9	

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Laskennassa VLJ-luolan investoinnin 60 vuoden poisto-aika on sidottu alkamaan voimalaitosten käytön alusta vuodesta 1980, jolloin poisto-aika umpeutuu vuonna 2039. Poistoajan umpeutuminen ajoittuu samalle ajankohdalle käytössä olevien kahden voimalaitosjärjestelmän täyttymisen kanssa. Poistoajan sitominen voimalaitosten käyttöjakssoon, sen sijaan että se sidottaisiin VLJ-luolan käyttöönottoon, antaa realistisemmän kuvan vuosittain syntyvän voimalaitosjätteen loppusijoituskustannuksista. VLJ-luolan kapasiteetti vastaa tämän hetkellä jätteenkäsittelyratkaisulla OL1:n ja OL2:n 60 vuoden käyttöänsä aikana tuottaman voimalaitosjätteen määrää. VLJ-luolaan on sijoitettu myös kaikki käyttötoiminnassa ennen VLJ-luolan käyttöönottoa tuotetut jätteet. Mikäli poisto-aika sidottaisiin VLJ-luolan käyttöönottoon, vääristyisi loppusijoituskustannusten ajoitus niin, ettei ennen luolan käyttöönottoa tuotetulle jätteelle kohdistuisi lainkaan investointikustannuksia, ja toisaalta investointikustannuksia kohdistuisi myöhemmin jätteille, jotka eivät enää mahdu alkuperäisen VLJ-luolan siiloihin, vaan jotka sijoitetaan luolan laajennusosiin. Tällaisia jätteitä olisivat esimerkiksi OL3:n jätteet tai käytöstäpoisto-jätteet. Mikäli poisto-aika sidottaisiin luolan käyttöönottoon, mutta poisto-aikaa lyhennettäisiin loppumaan luolan täytyessä, investointikustannukset kohdistuisivat vastaavasti epätasaisesti ennen luolan käyttöönottoa tuotettujen ja luolan käytön aikana tuotettujen jätteiden kesken.

Loppusijoituksen investointikustannukset on määritetty annuiteettiperiaatteella, joten investointikohtaiset kustannukset pysyvät vakiona koko poistoajan. Tulevaisuuden loppusijoituskustannuksia arvioitaessa VLJ-luolan investointikustannuksissa huomioidaan vuonna 2014 toteutettu nosturin ohjauksjärjestelmän uusinta sekä työn kirjoitushetkellä toteutuksessa oleva kiinteistöautomaation uusinta. Koska VLJ-luolan alkuinvestointi on moninkertainen myöhemmin toteutettuihin ja toteutettaviin muutos- ja perusparannusinvestointeihin verrattuna, ei myöhemmin toteutettavat muutos- ja perusparan-

nusinvestoinnit aiheuta merkittävää virhettä laskelmaan. Huomioitaessa kiinteistöautomaation uusinta ja materiaalikustannusten vuosittainen 3,5 %:n nousu, vuoteen 2030 mennessä huoltojätteen loppusijoituskustannus nousee noin 21 %, metalliromun 16 %, ionivaihtohartsin 15 % ja sekalaisen nesteiden 27 %. Vuoteen 2039 mennessä odotettu nousu on vastaavasti huoltojätteelle noin 37 %, metalliromulle 27 %, ioninvaihtohartsille 25 % ja sekalaisille nesteille 49 % verrattaessa vuodelle 2015 määritettyyn kustannustasoon. Kuvassa 22 esitetään vuosittaisen kustannusnousun vaikutus eri jätelajien loppusijoituskustannukseen suhteessa vuoden 2015 kustannustasoon.



Kuva 22. Vuosittaisen kustannusnousun vaikutus eri jätelajien loppusijoituskustannukseen suhteessa vuoden 2015 kustannustasoon.

Vuosittaisen säästöpotentiaalin ja vuosittaisen loppusijoituskustannusnousun arvioiden perusteella määritetty kokonaiskustannussäästöpotentiaali OL1:n ja OL2:n jäljellä olevan käyttöiän aikana on esitetty eri käsittelyratkaisuille taulukossa 10. Arvio on esitetty kahdella ajanjaksolla vuosina 2016–2039 ja 2020–2039. Ensimmäinen jakso kuvaa säästöpotentiaalia, mikäli uusi käsittelyratkaisu otetaan käyttöön viipymättä. Toinen jakso kuvaa uuden käsittelyratkaisun viivästynyttä käyttöönottoa, mikä kuvaa paremmin tilannetta investoitaessa uuteen käsittelylaitokseen. Mikäli käsittelylaitosinvestointi tulee ajankohtaiseksi, yhtenä vaihtoehtona on myös varastoida syntyviä jätteitä mahdollisuuksien mukaan, kunnes kustannustehokkaampi käsittelyratkaisu otetaan käyttöön. Tällöin kokonaiskustannussäästöpotentiaali asettuu taulukossa annettujen arvioiden välille. Koska lasitus ja plasmasulatus voidaan toteuttaa samaan käsittelylaitokseen hyödyntäen yhteisiä poistokaasujenpuhdistus- ja apujärjestelmiä, nämä on erillisten käsittelyratkaisujen lisäksi esitetty taulukossa myös yhtenä kokonaisuutena.

Taulukko 10. Käsittelyratkaisujen mahdollistama kokonaiskustannussäästöpotentiaali OL1:n ja OL2:n jäljellä olevan käyttöiän aikana.

Käsittelytekniikka	Yhteensä, €	
	2016-	2020-
Lasitus		
Plasmasulatus		
NUWA		
Org. polttokäsittely ¹		
Met. sulatuskäsittely ¹		
Vanhentaminen		
Lasitus + plasmasulatus		

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Kokonaiskustannussäästöpotentiaalin avulla voidaan määrittää taso vastaavan investoinnin maksimihankintakustannuksille. Käyttäen 20 tai 24 vuoden poistoaikaa (2020–2039 tai 2016–2039) ja 5 % korkoa, saadaan annuiteettimenetelmällä kullekin käsitte-lyinvestoinneille määritettyä taulukon 11 toisen ja kolmannen sarakkeen mukaiset maksimihankintakustannukset. Investoinnin maksimikustannuksen arvioinnissa on hyödyllistä huomioida myös nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien odotetut uusintakustannukset siltä osin, kuin ne voidaan kullakin uudella käsittelyratkaisulla korvata. Investoinnin maksimihankintakustannukset sisältäen niillä korvattavien nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien odotetut uusintakustannukset esitetään vastaavasti taulukon 11 neljännessä ja viidennessä sarakkeessa. Maksimihankintakustannuksia tarkasteltaessa on huomioitava, että kokonaishankintakustannukseen sisältyy paitsi investoinnin varsinainen hankintahinta myös hankintaan liittyvä TVO:n omatyö hankkeen toteuttamiseksi sekä uusien menetelmien käyttöön liittyvät luvituskustannukset. Vanhentamisen ei odoteta korvaavan nykyisiä jätteenkäsittelyjärjestelmiä. Orgaanisen jätteen polttokäsittely ja metalliromun sulatuskäsittely ovat palveluhankintoja, eikä niille täten ole määritetty investoinnin maksimikustannusta. Palveluhankintojen kannattavuus arvioidaan kunkin palvelusopimuksen laatimisen yhteydessä palvelun sen hetkiseen hintaan verraten.

Taulukko 11. Kokonaiskustannussäästöpotentiaalia vastaava investoinnin maksimihankintakustannus käsittelyinvestoinneille.

	Investoinnin maksimihankintakustannus, €		Investoinnin maksimihankintakustannus, €, sis. nyk. uusintatarve	
	2016-	2020-	2016-	2020-
Lasitus				
Plasmasulatus				
NUWA				
Vanhentaminen				
Lasitus + plasma				

6.2 Säästöpotentiaali OL3:n käytön aikana tuotetun jätteen loppusijoituskustannuksissa

Voimalaitosjäteluolan laajennussuunnitelman mukainen kustannusarvio uusien laitosyksiköiden käytön aikaisten voimalaitosjätteiden siiloille on kymmeniä miljoonia euroja [34]. Laajennus kattaa yhden matala-aktiivisen ja yhdenkeskiaktiivisen jätteen siilon. Siilojen on suunniteltu palvelevan sekä OL3:a että suunniteltua OL4:ää. OL4:n on oletettu tuottavan voimalaitosjätettä vastaavasti kuin OL3.

Loppusijoitussiilojen koko on suunniteltu jo käytössä olevien voimalaitosjättesiilojen ajo- ja louhintatasojen syvyytensä hyödyntäen. Kaikki laajennussuunnitelman siilot on suunniteltu samanhalkaisijaisiksi nosturien kierrättämisen mahdollistamiseksi siilojen välillä. Suunnitteluperusteet ovat johtaneet siihen, että siilot ovat jopa kaksi kertaa suurempia, kuin odotettavissa olevan jätemäärän perusteella olisi tarpeellista. OL3:n tuotannollisen käytön alkamisen jälkeen siilojen tilavuustarvetta on mahdollista tarkastella uudelleen jätemääräarvioiden tarkentuessa käyttökokemustietojen karttuessa. Kuitenkaan komponenttien yhteiskäytön mahdollistamien etujen ja käytettävyysetujen takia siilojen koon merkittävää pienentämistä ei suositella. [34]

Laitostoimittajan antamien arvioiden perusteella OL3:n voimalaitosjätteen tuotanto on huomattavasti vähäisempää kuin OL1:n ja OL2:n yhteensä tuottama jätemäärä. Jättemäärien vertailu toteutetaan yleensä OL1:n ja OL2:n yhteiseen jätetuotantoon, koska näiden yhteenlaskettu nettoteho on lähellä OL3:n odotettua nettotehoa. Toisaalta laitosyyppit ovat erilaisia, OL1 ja OL2 ovat kiehutusvesilaitoksia ja OL3 painevesilaitos, eikä laitosten jätemäärien vertailu näin suoranaisesti anna merkittävää lisäarvoa. Metallijä- ja sekaromua oletetaan kertyvän enemmän laitostyypin ikääntyessä. Verraten OL1:n ja OL2:n tällä hetkellä tuottamaan vuosittaiseen radioaktiivisen romun määrään ja huomioiden painevesilaitoksen höyrypiirin kontaminoitumattomuuden OL3:n käyttöiän keskimääräiseksi romun kertymiseksi arvioidaan 70 m³ vuodessa. Koska jätemääräarviot perustuvat muiden laitostyyppien ja erilaisten käyttöorganisaatioiden käyttökokemustietoihin, OL3:n tuotannossa kertyvien jätemäärien arvioita tulee tarkastella uudelleen omiin käyttökokemuksiin perustuen laitoksen käyttöönoton jälkeen.

Taulukossa 12 esitetään VLJ-luolan laajentamisen kustannusarvioon ja luvun neljä materiaalikustannuksiin perustuen kullekin jätelajille loppusijoituksen investointi- ja

materiaalikustannus sekä näiden summa. Loppusijoituksen investointikustannus on määritetty annuiteettimenetelmällä käyttäen 60 vuoden poistoaikaa, joka vastaa laitostyöyksikön suunniteltua käyttöikää, sekä 5 % korkotasoa. Materiaalikustannuksissa on pyritty huomioimaan laitostoimittajan alipainekuivaukseen suunnitteleman tynnyrin sekä keskiaktiivisen kuivatun hartsijätteen loppusijoituslaatikon korkeampi hankintahinta. Matala-aktiivisen kuivatun jätteen loppusijoituksen oletetaan vaativan korkeintaan vähäisiä muutoksia loppusijoituskonseptiin. VLJ-luolan laajentamisen esisuunnitelmas- sa ei ole eritelty keski-aktiivisen jätteen siilon vahvemman rakenteen vaatimaa lisäin- vestointia verrattuna matala-aktiivisen jätteen siiloon, joten laajennuskustannusten pai- notettu kohdistaminen siiloille ei ole mahdollista. Kaikki OL3:n voimalaitosjätehuollon kustannukset esitetään vuoden 2015 hintatasossa.

Taulukko 12. Loppusijoituksen investointi- ja materiaalikustannukset sekä näiden summa jätelajeittain OL3:lle.

	Loppusijoituksen investointikustannukset, €	Loppusijoituksen investointikustannukset, €/m ³	Materiaali- kustannukset, €/m ³	Yhteensä, €/m ³
Huoltojäte				
Metalliriomu				
Hartsit				
Sekalaiset nesteet				

Taulukossa 12 esitetyt investointikustannukset on määritetty suoraan loppusijoitustilavuuksien suhteessa huomioiden jätteiden sijoittumisen keski- ja matala-aktiivisen jätteen siiloon. Toisena vaihtoehtona on huomioida lisäksi kuivatun hartsijätteen vaikutukset sekalaisten nesteiden käsittelyyn ja loppusijoitukseen. Kuivattaessa sekalaisia nesteitä yhdessä hartsien kanssa myös sekalaisista nesteistä tulee osa keskiaktiivista jätettä ja niiden loppusijoituksen tilavuustehokkuus heikkenee. Taulukossa 13 esitetään vastaavat investointi- ja materiaalikustannukset kuin taulukossa 12, jos hartsijäte ja sekalaiset nesteet kuivattaisiin erikseen. Tällöin hartsijätteelle tulee kohdistetuksi kaikki ne kustannukset, jotka yhteiskuivauksen johdosta nostavat sekalaisen jätteen käsittelykustannuksia. Tehty jaottelu vaikuttaa sekalaisten nesteiden käsittelykustannusten lisäksi jätteiden tilavuusosuuksiin siiloissa, mikä nähdään edelleen pieninä muutoksina myös muiden jätelajien investointikustannuksissa. Hartsijätteen kuivaus ainoana jätteenä ei ole mahdollista korkean aktiivisuuskonsentraation ja raemaisen koostumuksen takia.

Taulukko 13. Loppusijoituksen investointi- ja materiaalikustannukset sekä näiden summa jätelajeittain OL3:lle, jos hartsijäte ja sekalaiset nesteet kuivattaisiin erikseen.

	Loppusijoituksen investointikustannukset, €	Loppusijoituksen investointikustannukset, €/m ³	Materiaalikustannukset, €/m ³	Yhteensä, €/m ³
Huoltojäte				
Metalliroomu				
Hartsit				
Sekalaiset nesteet				

Uudelleen jaotteluun perustuvat kustannusarviot ovat merkittäviä arvioitaessa vaihtoehtoisia käsittelymenetelmiä ioninvaihtohartsijätteelle. Mikäli hartsijäte käsitellään muulla tavoin kuin kuivaamalla yhdessä sekalaisen nesteiden kanssa, myös sekalaisen nesteiden loppusijoituskustannus alenee, vaikkei itse nestemäisen jätteen kuivausta korvattaisi vaihtoehtoisella käsittelymenetelmällä.

Taulukoissa 14 ja 15 esitetään vastaavasti OL3:lla odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa käsittelyratkaisuittain. Keskimääräinen vuosittainen tilavuussäästö on määritetty jätelajeittain perustuen luvussa viisi tilavuuden pienentymiskertoimiin ja vertaamalla niitä luvussa kolme esiteltyihin OL3:n jätteen käsittelyratkaisuihin. Koska OL3:lla tuotettavien jätteiden aktiivisuustasojakaumasta ei ole käytettävissä arvioita, metallijätteen sulatuskäsittelyn ja vanhentamisen osalta OL3:n jätteelle on käytetty samoja arvioita käsittelyyn kelpaavan jätteen osuuksista kuin OL1:n ja OL2:n jätteelle. Laskennassa ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia jäljelle jäävän loppusijoitettavan jätteen loppusijoituskustannuksissa.

Taulukko 14. OL3:lla odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa käsittelyratkaisuittain perustuen jätteiden sijoittumiseen keski- ja matala-aktiivisen jätteen sii-loon.

	Huoltojäte		Metalliroomu		Hartsit		Sekalaiset nesteet		Yhteensä	
	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v
Lasitus	11		–	–	1,3		1,5		13,8	
Plas-masulatus	–	–	46		–	–	–	–	46	
NUWA	–	–	–	–	1,2		–	–	1,2	
Metallijät- ¹ teen sulatuskäsittely	–	–	29,5		–	–	–	–	29,5	
Org. jät- ¹ teen polttokäsittely	10,3		–	–	–	–	–	–	10,3	
Vanhentaminen	2,6		18,2		–	–	–	–	20,8	

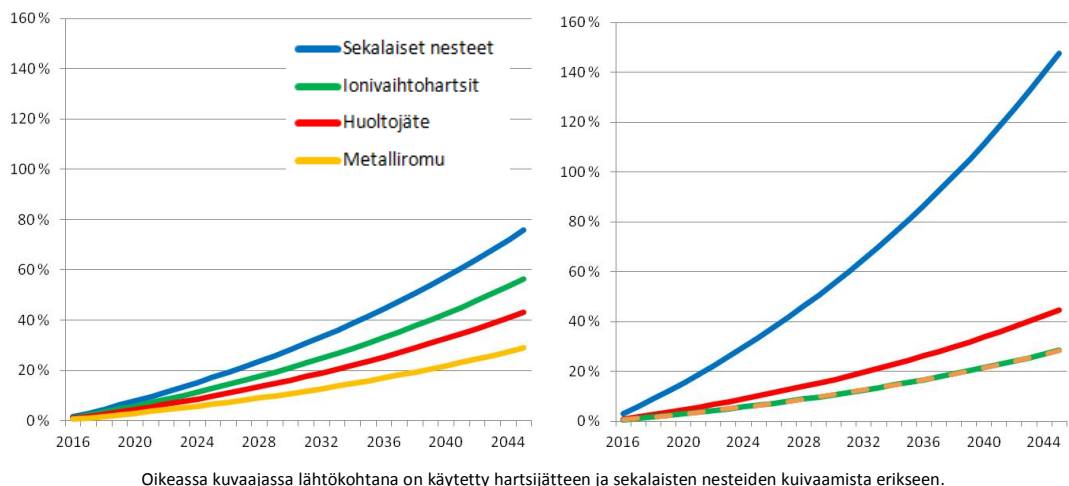
¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Taulukko 15. OL3:lla odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa käsittelyratkaisuittain, jos hartsijäte ja sekalaiset nesteet kuivattaisiin erikseen.

	Huoltojäte		Metalliromu		Hartsit		Sekalaiset nesteet		Yhteensä	
	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v	m ³ /v	€/v
Lasitus	11		–	–	1,3		1,5		13,8	
Plasmasulatus	–	–	46		–	–	–	–	46	
NUWA	–	–	–	–	1,2		–	–	1,2	
Metallijätteen sulatuskäsittely	–	–	29,5		–	–	–	–	29,5	
Org. jätteen polttoprosessointi	10,3		–	–	–	–	–	–	10,3	
Vanhentaminen	2,6		18,2		–	–	–	–	20,8	

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Erilaisen kustannusrakenteen takia materiaalikustannusten oletettu vuosittainen 3,5 %:n nousu vaikuttaa erilaisesti OL3:n kuin OL1:n ja OL2:n loppusijoituskustannuksiin. Kuva 23 esitetään vuosittaisen kustannusnousun vaikutus eri jätelajien loppusijoituskustannukseen suhteessa vuoden 2015 kustannustasoon. Vasen kuvaaja esittää kustannusten nousun, kun lähtötilanteena on käytetty kustannusten jaottelua jätteiden sijoittumisen perusteella. Oikea kuvaaja esittää kustannusten nousun, kun lähtötilanteena on käytetty hartsijätteen ja sekalaisen nesteen kuivaamista erikseen. Oikeassa kuvaajassa metalliromun ja ioninvaihtohartsijätteen suorat ovat päällekkäin.



Kuva 23. Vuosittaisen kustannusnousun vaikutus eri jätelajien loppusijoituskustannukseen suhteessa vuoden 2015 kustannustasoon OL3:lla perustuen kahteen eri laskentaperiaatteeseen.

Vuosittaisen säästöpotentiaalin ja vuosittaisen loppusijoituskustannusnousun arvioiden perusteella määritetty kokonaiskustannussäästöpotentiaali OL3:lle 30 ja 60 vuoden käyttöjaksoilla on esitetty eri käsittelyratkaisuille taulukossa 16. 30 vuoden tarkastelujakso on valittu mahdollisen käsittelyinvestoinnin oletetun käyttöiän ja sitä kautta poistoajan perusteella. 60 vuoden käyttöjakso vastaa laitousyksikön suunniteltua käyttöikä.

Taulukko 16. Käsittelyratkaisujen mahdollistama kokonaiskustannussäästöpotentiaali OL3:lla 30 ja 60 vuoden käyttöjaksojen aikana perustuen kahteen eri laskentaperiaatteeseen.

Käsittelytekniikka	Yhteensä, €		Yhteensä, €	
	30 v. jakso	30 v. jakso ²	60 v. jakso	60 v. jakso ²
Lasitus				
Plasmasulatus				
NUWA				
Org. polttokäsittely ¹				
Met. sulatuskäsittely ¹				
Vanhentaminen				
Lasitus + plasmasulatus				

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu ² Lähtökohtana on käytetty hartsijätteen ja sekalaisen nesteiden kuivaamista erikseen.

Kokonaiskustannussäästöpotentiaalin avulla voidaan määrittää taso vastaavan investoinnin maksimihankintakustannuksille. Käyttäen 30 vuoden poistoaikaa ja 5 % korkoa, saadaan annuiteettimenetelmällä kullekin käsittelyinvestoinneille määritettyä taulukon 17 mukaiset maksimihankintakustannukset. Investoinnin maksimihankintakustannus esitetään ainoastaan 30 vuoden tarkastelujaksolle käsittelyinvestoinnin oletetun käyttöiän perusteella. Koska lasitus ja plasmasulatus voidaan toteuttaa samaan käsittelylaitokseen hyödyntäen yhteisiä poistokaasujenpuhdistus- ja apujärjestelmiä, nämä on erillisten käsittelyratkaisujen lisäksi esitetty taulukossa myös yhtenä kokonaisuutena. Maksimihankintakustannuksia tarkasteltaessa on huomioitava, että kokonaishankintakustannukseen sisältyy paitsi investoinnin varsinainen hankintahinta myös hankintaan liittyvä TVO:n omatyö hankkeen toteuttamiseksi sekä uusien menetelmien käyttöön liittyvät luvituskustannukset. Toisaalta OL3:n nykyisen suunnittelun mukaisen kuivatun jätteen loppusijoituskonsepti on edelleen avoin ja sen ratkaiseminen tulee vaatimaan pääomaa jätetyypin pitkäaikaisturvallisuuden takaamiseksi sekä tarvittavan tekniikan hankkimiseksi. Nämä työ- ja luvituskustannukset kompensoivat osaltaan mahdollisesti käyttöönotettavan uuden jätteenkäsittelyteknologian vastaavia kustannuksia. Orgaanisen jätteen polttokäsittely ja metalliromun sulatuskäsittely ovat palveluhankintoja, eikä niille täten ole määritetty investoinnin maksimikustannusta. Palveluhankintojen kannattavuus arvioidaan kunkin palvelusopimuksen laatimisen yhteydessä palvelun sen hetkiseen hintaan verraten.

Taulukko 17. OL3:n 30 vuoden käyttöjakson kokonaiskustannussäästöpotentiaalia vastaava investoinnin maksimihankintakustannus käsittelyinvestoinneille perustuen kahteen eri laskentaperiaatteeseen.

	Investoinnin maksimihankintakustannus, €	
	30 v. käyttöjakso	30 v. käyttöjakso ¹
Lasitus		
Plasmasulatus		
NUWA		
Lasitus + plasma		

¹ Lähtökohtana on käytetty hartsijätteen ja sekalaisten nesteiden kuivaamista erikseen.

6.3 Säästöpotentiaali OL1:n, OL2:n ja OL3:n käytöstäpoistojätteen loppusijoituskustannuksissa

Voimalaitosjäteluolan laajennussuunnitelman mukainen kustannusarvio käytöstäpoistojätteiden siiloille on useita kymmeniä miljoonia euroja [34]. Laajennus kattaa neljä matala-aktiivisen käytöstäpoistojätteen siiloa, yhden kullekin voimalaitosyksikölle mukaan lukien mahdollisen OL4:n. OL1:n ja OL2:n käytöstäpoistojätteen loppusijoitustilojen investointikustannuksiksi voidaan siis vastaavasti asettaa puolet kokonaiskustannuksesta. Koska käytöstäpoisto ei varsinaisesti palvele tulevaa vaan jo mennyttä tuotantoa, investoinnin poistoajan määrittäminen käytöstäpoistojätteen loppusijoitustiloille on haastavaa. Kolmen laitosesyksikön käytöstäpoistojakson on suunniteltu kestävän 15 vuotta, joten poisto aika on laskelmassa sidottu tähän loppusijoittamistoiminnan aikaikkunaan.

OL1:n, OL2:n ja KPA-varaston loppusijoitettavan radioaktiivisen käytöstäpoistojätteen määräksi on arvioitu noin 15 000 tonnia ja tilantarpeeksi pakkauksineen noin 32 000 m³. Käytöstäpoistojätteestä aktivoituneen biologisen suojan osuus on noin 4 200 m³ ja kontaminoituneen purkujätteen osuus puolestaan noin 26 700 m³. Biologinen suoja on betonia, joten sen käsittelyyn on mahdollista käyttää plasmasulatusteknologiaa. Kontaminoitunut purkujäte metalliromua (noin 75 %) ja betonia (noin 25 %), joten näiden käsittelyyn voidaan soveltaa joko plasmasulatusteknologiaa tai kontaminoituneen metallijakeen osalta metalliromun sulatuskäsittelyä.

Laitostoimittajan arvioiden perusteella arvioitu OL3:n loppusijoitettavan käytöstäpoistojätteen kokonaistilantarve on noin 9 670 m³. Tästä aktivoituneen biologisen suojan osuus on noin 590 m³ ja muun kontaminoituneen purkujätteen noin 8 710 m³. Arvio siiloihin loppusijoitettavan käytöstäpoistojätteen tilavuustarpeesta on siis merkittävästi pienempi kuin OL1:n tai OL2:n vastaava tilavuustarve (noin 15 450 m³ laitosesyksikköä kohti). Loppusijoitusluolan laajennus on suunniteltu kaikille laitosesyksiköille OL1:n ja OL2:n käytöstäpoistojätteen tilavuustarvearviota vastaavalle tilavuudelle. Alkuperäissuunnittelua pienemmän tilavuustarpeen voidaan karkeasti olettaa laskevan investointi-

kustannuksia vastaavassa suhteessa. Kontaminoituneen purkujätteen oletetaan koostuvan betonista ja metalliromusta vastaavasti kuin OL1:n ja OL2:n kontaminoituneen purkujätteen.

Koelaitosmittakaavan kokeissa epäorgaanisen jätteen plasmasulatuksella on saavutettu tilavuudenpientymiskertoimeksi noin 3. Metallijätteen sulatuskäsittelyn tilavuudenpientymiskertoimen odotetaan puolestaan olevan vähintään 14. Taulukossa 18 esitetään OL1:n, OL2:n ja OL3:n käytöstäpoistojätteelle VLJ-luolan arvioituihin laajennuskustannuksiin ja loppusijoituspakkauskuusiin perustuen kummallekin käsittelyratkaisulle odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa. Säästö on esitetty kolmen voimalaitoksen yhteenlaskettuna säästönä. Kustannussäästö on määritetty vuoden 2015 kustannustasossa huomioiden jätepakkausten odotettu vuosittainen kustannusnousu 15 vuoden loppusijoitustoiminnan aikana. Loppusijoituspakkausten kustannukset on valittu perustuen nykyisen loppusijoituskonseptin mukaisiin pakkauksiin metalliromulle. Koska käytöstäpoistojätteen aktiivisuustasojakaumasta ei ole käytettävissä arvioita, metallijätteen sulatuskäsittelyn osalta käytöstäpoistojätteelle on käytetty samoja arvioita käsittelyyn kelpaavan jätteen osuuksista kuin OL1:n ja OL2:n jätteelle. Tässä yhteydessä kontaminoituneen metalliromun oletetaan kuitenkin olevan kokonaan matala-aktiivista jätettä. Laskennassa ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia jäljelle jäävän loppusijoitettavan jätteen loppusijoituskustannuksissa.

Taulukko 18. Käytöstäpoistojätteelle odotettavissa oleva säästö loppusijoituskustannuksissa käsittelyratkaisuittain.

	Biologinen suoja, betoni		Kontaminoitunut betoni		Kontaminoitunut metalliromu		Yhteensä	
	m ³	€	m ³	€	m ³	€	m ³	€
Plasmasulatus	3 193		5 385		18 222		26 800	
Metallijätteen¹ sulatuskäsittely	–	–	–	–	13 776		13 776	

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Kokonaiskustannussäästöpotentiaalin avulla voidaan määrittää taso vastaavan investoinnin maksimihankintakustannuksille. Käyttäen 15 vuoden poistoaikaa ja 5 % korkoa, saadaan annuiteettimenetelmällä plasmasulatuslaitosinvestoinnille määritettyä taulukon 19 mukainen maksimihankintakustannus. Nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien odotettuja uusintakustannuksia ei ole huomioitu käytöstäpoistojätteen käsittelyinvestoinnin maksimihankintakustannusten määrittämisessä, koska käsittelyjärjestelmien ei odoteta olevan käytössä enää käytöstäpoistovaiheessa. Metalliromun sulatuskäsittely on palveluhankinta, eikä sille täten ole määritetty investoinnin maksimikustannusta. Palveluhankintojen kannattavuus arvioidaan kunkin palvelusopimuksen laatimisen yhteydessä palvelun sen hetkiseen hintaan verraten.

Taulukko 19. Käytöstäpoistojätteen kokonaiskustannussäästöpotentiaalia vastaava investoinnin maksimikustannus käsittelyinvestoinneille.

Käsittelytekniikka	Investoinnin maksimihankintakustannus, €
Plasmasulatus	

6.4 Muu mahdollinen säästöpotentiaali ja syntyvä liiketoiminta

Tarkasteltujen käsittelyratkaisujen voidaan odottaa mahdollistavan myös muita kustannussäästöjä tai vaihtoehtoisesti jopa tuottoja. Tarkastelua voidaan teoriassa laajentaa paitsi tuleviin jätteisiin ja jätteiden tuottajiin myös jo tuotettuihin tai jopa jo loppusijoitettuihin jätteisiin.

Mikäli ydinvoiman lisärakentaminen Olkiluodon laitospaikalle tulee myöhemmin ajankohtaiseksi, voidaan keskitetyn jätteenkäsittelyn avulla edellisissä luvuissa määritetyjä säästöpotentiaaleja soveltaa myös uusiin voimalaitosyksiköihin. Tulosten soveltamisessa on huomioitava laitossyksiköltä kertyvän jätteen määrä, laatu sekä loppusijoituskonsepti. Keskitetyn jätteenkäsittelyn avulla uusista voimalaitosinvestoinneista voidaan jättää varsinaiset jätteenkäsittelyjärjestelmät pois, jolloin saavutettava kustannushyöty konkretisoituu jo investointivaiheessa. Lisäksi keskitetty jätteenkäsittely voidaan laajentaa palvelemaan myös Posivan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen jätteen käsittelyä. Loppusijoituslaitoksen toiminnasta syntyy vähäisiä määriä matala- ja keskiaktiivista jätettä, joiden käsittely keskitetysti yhdessä voimalaitosjätteen kanssa mahdollistaa kustannustehokkaamman kokonaisuuden. Keskitetty jätteenkäsittely on mahdollista niin kauan kuin voimalaitospaikalla on ydinenergian tuotantoa tai käytöstäpoistotoimintoja. Näillä näkymin edellä mainittuja toimintoja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustoiminnan rinnalla tulee olemaan aina noin vuoteen 2090 saakka.

Mikäli jätteenkäsittelyinvestoinnin käyttöaste jää alhaiseksi, eikä ydinvoiman lisärakentaminen ole ajankohtaista, voidaan käsittelyn ylikapasiteettia myydä palveluna muille voimayhtiöille. Voimalaitosjätehuoltokonsepti on hyvin samankaltainen ainakin Suomen molemmissa tällä hetkellä tuottavissa ydinvoimayhtiöissä, joten tilavuustehokaiden käsittelymenetelmien voidaan olettaa tuovan vastaavia kustannussäästöjä myös muille alan toimijoille. Myös jätteenkäsittelypalvelun myyminen ulkomaan markkinoille on mahdollista. Tällöin palvelun toteutuksessa ja hinnoittelussa on kuitenkin huomioitava valtiorajojen ylittävien radioaktiivisten kuljetusten koordinointi ja luvitus sekä erityisesti kaikkien radioaktiivisten aineiden palauttaminen alkuperämaahan käsittelyn päätteeksi. Kuten luvun viisi yhteydessä tuotiin esille, tämä saattaa aiheuttaa ongelmia termisten menetelmien hiili-14 -isotoopin talteenottomenetelmien puutteen takia.

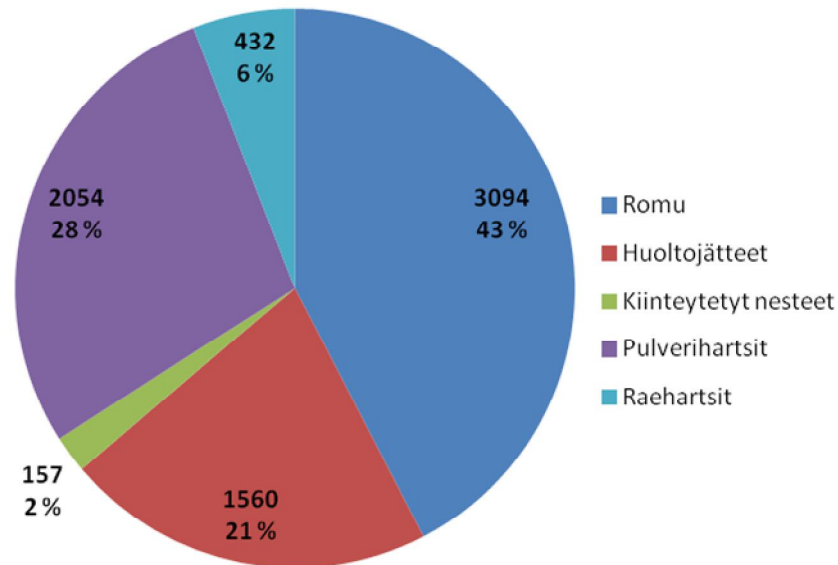
Ydinvoimayhtiöiden velvoite ydinjätehuoltorahastoon varattavaan korvaukseen on sidottu tuotetun ja käytöstäpoistohetkellä odotettavissa olevan jätteen määrään. Mikäli

voimalaitosjätehuollossa pystyttäisiin ottamaan käyttöön tilavuustehokkuudeltaan merkittävästi parempi jätteenkäsittelymenetelmä, odottavissa olevat loppusijoituskustannukset alenisivat huomattavasti. Alentuneiden loppusijoituskustannusten mahdollistama säästö voitaisiin konkretisoida osaltaan jo alhaisempina ydinjätehuoltorahaston varautumisvelvoitteina. Lisäksi varautumisvelvoitteen piirissä kerättävää KYT-ohjelman tutkimusrahoitusta voisi esittää osoitettavaksi uusien jätematriisien loppusijoituksen turvallisuustutkimukseen.

VLJ-luolaan sijoitetut jätteet käsitetään loppusijoitetuiksi pysyväksi tarkoitetulla tavalla. Jätesiilojen ja -pakkausten rakenne mahdollistaa kuitenkin käytännössä jätepakkausten nostamisen pois luolasta eli toisin sanoen loppusijoituksen purkamisen. Loppusijoituksen purkaminen menettelynä on kiistanalainen ja sen hyväksyttävyyys ja luvittavuus on arvioitava yhdessä viranomaisten ja päättäjien kanssa. Kuitenkin toisaalla käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen yhtenä suunnittelukriteerinä on ollut säilyttää mahdollisuus loppusijoituksen purkamiseen.

Arvioitaessa mahdollisuutta jo kertaalleen käsiteltyjen ja loppusijoitettujen jätteiden uudelleen käsittelyyn on huomioitava prosessien erilaisuus. Romun ja sekalaisen kiinteitettyjen nesteiden käsittelyyn voitaisiin todennäköisesti soveltaa epäorgaanisten jätteiden sulatukseen suunniteltua plamasulatusta. Bitumoitujen ioninvaihtohartsien uudelleen käsittely plamasulatusmenetelmällä ei taas tule kysymykseen orgaanisen bitumin ja ioninvaihtohartsin palamisominaisuuksien takia. Olomuodoltaan jäte ei sovellu myöskään termisesti käsiteltäväksi lasitus- tai NUWA-tekniikalla. Puristetun huoltojätteen termisen käsittely lasitusmenetelmällä tai orgaanisen jätteen polttokäsittelyssä on sitä vastoin helposti toteutettavissa. Plasmasulatuksen ja huoltojätteen termisten käsittelymenetelmien, lasitus- ja polttokäsittelyn, odotetut tilavuudenpientymiskertoimet ovat luvun viisi mukaisesti 3, 24 ja 10.

Kuvassa 24 esitetään VLJ-luolaan vuoden 2013 loppuun mennessä sijoitettujen jätteiden loppusijoitustilavuudet ja niiden suhteelliset osuudet. Loppusijoitustilavuuksissa on huomioitava tynnyreissä loppusijoitettavan jätteen suurempi tilan tarve. Kaikkiaan uudelleen käsittely voisi olla mahdollista jopa 60 prosentilla jätteistä.



Kuva 24. VLJ-luolaan vuoden 2013 loppuun mennessä sijoitettujen jätteiden loppusijoitustilavuudet (m³) ja niiden suhteelliset osuudet.

Mikäli oletetaan, että 90 % romusta ja kiinteytetyistä nesteistä pystyttäisiin käsittelemään plasmasulatustekniikalla, uudelleenkäsittely mahdollistaisi noin 1 950 m³ loppusijoitustilavuuden vapauttamisen muiden jätteiden loppusijoitukseen. Tästä tilavuudesta noin 190 m³ vapautuisi keskiaktiivisen ja 1 760 m³ matala-aktiivisen jätteen siilosta. Huoltojätteen uudelleenkäsittely vastaavalla 90 %:n uudelleenkäsittelyosuudella vapauttaisi matala-aktiivisen jätteen siilosta lasitusmenetelmää hyödyntäen noin 1 350 m³ ja orgaanisen jätteen polttokäsittelyä hyödyntäen noin 1260 m³ loppusijoitustilavuutta muiden jätteiden loppusijoitukseen. Kaikkiaan vuoden 2013 loppuun mennessä kertyneiden jätteiden loppusijoitustilavuus laskisi matala-aktiivisten jätteiden osalta noin 1 440 m³:iin ja keskiaktiivisen jätteen osalta noin 2 600 m³:iin. VLJ-luolan tilavuustäyttöasteena tämä tarkoittaisi keskiaktiivisen jätteen siilolle noin 47 %:n ja matala-aktiivisen jätteen siilolle noin 19 %:n tilavuustäyttöastetta.

7 TULOSTEN ARVIOINTI

Voimalaitosjätehuolto on monitahoinen kokonaisuus, jonka osatekijöiden tunteminen vaatii merkittävää perehtyneisyyttä. Arvioitaessa voimalaitosjätehuollon kustannuksia lähtötietojen saatavuus ja tarkkuus luovat perustan laadukkaille tuloksille. Lisäksi joudutaan tekemään useita oletuksia ja ennusteita jätevirtojen ja toimintaympäristön pysyvyydestä. Toteutuneiden kustannusten pohjalta voidaan tehdä arvioita uusien käsittelyratkaisuiden mahdollistamasta säästöpotentiaalista. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää vain suuntaa antavina osatekijöiden keskinäisten suhteiden muutosten vaikuttaessa yksikkökustannuksiin. Laskennassa ei analysoitu keskinäisten suhteiden muutosten aiheuttamia muutoksia jäljelle jäävän loppusijoitettavan jätteen loppusijoituskustannuksiin.

Tutkimuksen toteutettavuuden kannalta oli oleellista rajata käyttökustannukset tarkastelun ulkopuolelle. Käyttökustannusten tarkka määrittäminen esimerkiksi sähkön ja veden kulutuksen tai työtuntien osalta olisi ollut haastavaa. Toisaalta uusien käsittelyjärjestelmien käyttökustannustietoja ei ole käytettävissä, joten vertailua ei käsittelymenetelmien välillä olisi pystytty kuitenkaan suorittamaan. Jotkin käyttökustannukset on kiinnitetty toimintojen käyttöaikaan, ei loppusijoitettavan jätteen määrään. Tällaiset toiminnot, kuten VLJ-luolan ilmanvaihto, lämmitys ja valvonta, eivät muutu aikaintervalliin perustuvassa kustannusseurannassa. Toisaalta loppusijoitettavan jätetilavuuden pienentyessä nämä kustannukset korostuvat tarkasteltaessa tilavuusyksikkökohtaisia kustannuksia. Tällaiset kustannukset eivät ole merkittävästi riippuvaisia käytettävästä käsittelyteknologiasta, mutta vääristävät tilavuusyksikkökohtaisten tulosten vertailua. Investointi- ja loppusijoituskustannusten ollessa merkittävimpiä voimalaitosjätehuollon kustannustekijöitä, rajauksen ei oleteta vaikuttavan merkittävästi johtopäätöksiin.

Jätteenkäsittelyn kustannuksia koottaessa jouduttiin käyttämään useita lähteitä, mistä johtuen ilmoitettujen kustannusten tarkkuus vaihteli oleellisesti. Esimerkiksi investointien ja muutostöiden osalta toisista projekteista oli käytettävissä tietokannasta kerättyä kaikki kyseessä olevalle projektille kohdistetut kustannukset senttien tarkkuudella. Nämä kustannukset sisälsivät paitsi projektille kohdistetut hankintakustannukset myös projektin toteutuksen aikana projektille kohdistetut henkilöstön työtuntikustannukset. Joidenkin hankintojen osalta käytettävissä oli vain hankintakustannukset ilman työtuntikustannuskohdistuksia. Vanhimpien hankkeiden yhteydessä käytettävissä oli ainoastaan suurpiirteinen kokonaiskustannus tuhansien eurojen tarkkuudella, eikä kokonaiskustannuksissa huomioitu tarkempi sisältö ollut eriteltävissä. Mahdollisimman kattavan kustannustiedon saamiseksi, kussakin tapauksessa käytettiin niin tarkkoja ja laajoja kustannustietoja, kuin lähteiden antamissa puitteissa oli mahdollista. Lähtötietoja arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että tietokannasta koottujen yhteenvedojen sisällön tark-

kuuden määrittelee sinne syötettyjen tietojen tarkkuus. Varsinkin henkilöstön työtuntikustannusten kohdistaminen on ollut epätarkkaa tai puutteellista. Vuoden 2015 aikana TVO:lla on alettu kiinnittää aiempaa enemmän huomioita kustannusten kohdistamiseen ja seurantaan toiminnoittain. Lisäksi ollaan ottamassa käyttöön uutta toiminnan ohjausjärjestelmää, joka tukee resurssien ja kustannusten oikea-aikaista ja yksityiskohtaisempaa suunnittelua ja seurantaa. Kehityksen odotetaan helpottavan myös jätehuollon kustannusten tunnistamista tulevaisuudessa.

OL1:n ja OL2:n osalta kustannusarvioissa käytetyt jätemäärät perustuvat vuosina 2004–2013 raportoituihin jätemääriin. Näiden jätemäärien voidaan olettaa kuvaavan hyvällä tarkkuudella voimalaitoksilla käyttöjakson aikana tuotettavan jätteen määrää myös tulevina vuosina. Myös arvioita OL1:n ja OL2:n käytöstäpoistojätteen määrästä voidaan pitää luotettavina, niiden perustuessa laitossuunnittelun lisäksi myös tuotannon aikana toteutettuihin järjestelmien kontaminaatio- ja aktiivisuusmittauksiin. OL3:n osalta ei tätä vastoin ole käytettävissä käyttökokemuksiin perustuvia arvioita tuotettavan jätteen määrästä tai laitoksen kontaminoitumisesta. OL3:n kustannusarvioissa käytetyt jätemäärät perustuvat laitostoimittajan arvioon, jonka lähtökohtana ovat olleet laitossuunnittelu ja esikuvana toimineiden eurooppalaisten painevesilaitosten käyttökokemukset. Lisäksi arvioissa on pyritty huomiamaan TVO:n toimintatavat. Näitä arvioita on mahdollista tarkentaa vasta voimalaitoksen käyttöönoton jälkeen jätevirtojen vakiintuessa.

Nykyisten jätteenkäsittelyjärjestelmien uusintatarve on arvioitu perustuen laitteistojen ja järjestelmien tämän hetkiseen kuntoon ja laitteistoinvestointien suunnittelukäyttöikäen. Uusintakustannukset on arvioitu vanhojen investointi- ja uusintakustannusten perusteella olettaen vakioitu vuosittainen kustannusten nousu. Investointien toteutumisaikataulu voi muuttua laitteistojen oletettua pidemmän käyttöiän tai toisaalta rikkoutumisen tai muun käyttökunnottomuuden takia. Investointi aikataulu ja kustannusten nousun toteutuminen vaikuttavat kokonaiskustannuksiin. Erityisesti bitumointijärjestelmät ovat olleet toistuvasti käyttökunnottomia ja niiden uusinta tai perusparannus saattaa tulla ajankohtaiseksi jo arvioitua aikaisemmassa vaiheessa.

OL3:n kuivatulle jätteelle ei ole vielä vahvistettua loppusijoituskonseptia. Loppusijoituksen turvallisuus tulee osoitettavaksi VLJ-luolan laajennuksen yhteydessä. OL3:n keskiaktiivisen kuivatun jätteen loppusijoituksen tilavuustehokkuus perustuu tällä hetkellä käytettävissä olevaan alustavaan suunnitteluun. Matala-aktiivisen kuivatun jätteen loppusijoituksen tilavuustehokkuuden oletetaan olevan vastaava kuin nykyisellä loppusijoituskonseptilla. Lisäksi loppusijoituksen materiaalikustannukset on arvioitu hyvin karkeasti perustuen OL1:n ja OL2:n loppusijoituskonseptin kustannuksiin. Kuivatun jätteen loppusijoituksen tilavuustehokkuus ja materiaalikustannukset saattavat siis poiketa merkittävästi tutkimuksessa käytetyistä arvioista. Käytetyt arviot on pyritty valitsemaan konservatiivisesti siten, että mahdollisesti toteutuva poikkeama todennäköisemmin kasvattaa kokonaiskustannusäästöpotentiaali sen pienentämisen sijaan.

Uusien käsittelyratkaisujen arviointi perustuu menetelmien tilavuustehokkuuteen. Jätteen tilavuuden pienentyessä sen aktiivisuuspitoisuus nousee, jolloin jätepakkausten

käsittely ja kuljetus vaikeutuu. Säteilysojelullisista syistä jätepakkausten käsittelyyn voidaan joutua hankkimaan uusia säteilysojia tai parantamaan tilojen säteilysojelullisia ominaisuuksia. Joissakin tapauksissa liian korkea aktiivisuuspitoisuus voi johtaa tilavuustehokkuuden rajoittamiseen. Taulukossa 20 on esitetty vertailu käsittelyratkaisujen mahdollistamasta kokonaiskustannussäästöpotentiaalista OL1:n ja OL2:n jäljellä olevan käyttöiän aikana, kun vasemmalla tilavuustehokkuus on luvun 5 laskelmien mukainen ja oikealla tätä puolet pienempi. Viimeisessä sarakkeessa esitetään edellä mainittujen kokonaiskustannussäästöpotentiaalien erotus.

Taulukko 20. Vertailu käsittelyratkaisujen mahdollistamasta kokonaiskustannussäästöpotentiaalista OL1:n ja OL2:n jäljellä olevan käyttöiän aikana kahdella eri tilavuustehokkuudella määritettynä sekä niiden erotus.

Käsittelytekniikka	Yhteensä, € Alkup. tilavuuden- pientymiskerroin	Yhteensä, € Puolitettu tilavuuden- pientymiskerroin	Erotus, €
Lasitus	100 %	96 %	4 %
Plasmasulatus	100 %	50 %	50 %
NUWA	100 %	93 %	7 %
Org. polttokäsittely ¹	100 %	89 %	11 %
Met. sulatuskäsittely ¹	100 %	92 %	8 %
Vanhentaminen	100 %	50 %	50 %
Lasitus + plasmasulatus	100 %	78 %	22 %

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

Taulukossa 20 esitetyn tarkastelun asettelu vaikuttaa voimakkaimmin jätteenkäsittelyratkaisuihin, joilla on pieni tilavuudenpientymiskerroin. Tämä nähdään erityisesti plasmasulatuksen pienentyneenä kokonaiskustannussäästöpotentiaalina. Toisaalta niiden ratkaisuiden, joilla on pieni tilavuudenpientymiskerroin, tilavuudenpientymiskerrointa ei odoteta jouduttavan rajoittamaan. Riski tilavuudenpientymiskertoimen rajoittamiseen rajautuu pääasiassa keskiaktiivisen ioninvaihtohartsin käsittelyyn. Ioninvaihtohartsien termisillä käsittelymenetelmillä, lasituksella ja NUWA-tekniikalla, on korkea tilavuudenpientymiskerroin. Vaikka tilavuudenpientymiskerrointa joudutaisiin rajoittamaan rajustikin, vaikutus kokonaiskustannussäästöpotentiaaliin jää suhteellisen vähäiseksi.

Samaa taulukkoa 20 voidaan hyödyntää myös vanhentamiseen liittyvien epävarmuuksien havainnoinnissa. Erityisesti arvioitaessa vanhennettavaksi soveltuvan metallin ja sekaromun määrää tehtiin helposti saatavilla olevien annosnopeusmittaustietojen puuttuessa hyvin karkeita yleistyksiä jätteen aktiivisuustasoista arvioimalla vastaava aktiivisuusjakauma koko jätelajille. Mikäli aktiivisuusjakauma ei edusta koko jätelajia, saavutettavissa oleva kustannussäästöpotentiaali voi jäädä puoleen alkuperäisestä arviosta.

Myös loppusijoituksen turvallisuus korkeamman aktiivisuuspitoisuuden jätteille on arvioitava uudelleen. VLJ-luolaan loppusijoitettava kokonaisaktiivisuus ei muutu aktiiv-

visuuspitoisuuden kasvaessa, mutta aktiivisuus keskittyy pienemmälle alueelle. Aktiivisuuden tiheämpi esiintyminen loppusijoitustiloissa on huomioitava VLJ-luolan säteilyturvallisuusarvioissa. Kuten luvussa 3.2 on esitetty, VLJ-luolan nuklidikohtainen aktiivisuustäyttöaste on vuoden 2013 lopussa ollut suurimmillaankin vain noin 12 %. Toisin sanoen toistaiseksi loppusijoitetun jätteen aktiivisuus on ollut alempi, kuin mitä turvallisuusarvioihin perustuvat raja-arvot sallisivat. Nykyisin käytännössä VLJ-luolan tilavuus tulee täyteen paljon ennen asetettujen aktiivisuusrajojen täyttymistä. Loppusijoituksen säteilyturvallisuuden uudelleenarvointi ja aiempaa aktiivisempien loppusijoituspakkausten käsittelyn lisäsuojaustarve on huomioitava arvioitaessa TVO:n oman työn kustannusten osuutta kokonaisinvestointikustannuksissa. Ratkaisuvaihtoehtoja vertailtaessa on hyvä muistaa, että vastaavia turvallisuusarvioita tulee toteutettavaksi myös nykyisten jätteenkäsittelyratkaisuiden osalta.

Voimalaitosjätteen käsittelyn kokonaisratkaisujen valitsemisessa ja investointien toteutuksessa tulee harkittavaksi lisäksi eri ratkaisuille ominaiset riskit. Investointihankkeille määritetään perinteisesti riskejä liittyen rahoituksen saantiin, korkotasoihin sekä kustannusten ja aikataulujen toteutumiseen. Ydinlaitosinvestoinnin yhteydessä on erityishuomioita kiinnitettävä luvitustyön riskinarvointiin. Mikäli lainsäädännön velvoitteita ja vaatimuksia ei pystytä täyttämään, investointia ei saada tuottavaksi, vaikka kaikki muut osa-alueet olisi hoidettu mallikkaasti. Investointien kautta saatetaan myös sitoutua pitkäaikaiseen toimitussuhteeseen käsittelymateriaalien tai varaosien toimittajien kanssa. Tämä on todennäköistä esimerkiksi lasitustekniikkaan investoitaessa käsittelylaitostoimittajan hallinnoidessa myös lasimatriisin markkinoita. Mikäli voimalaitosjätteenkäsittely päätetään toteuttaa palveluhankintojen kautta, toimintojen toteutus ja kustannukset jäävät kokonaisuudessaan palveluntarjoajan toiminnan jatkuvuuden varaan. Varsinaisen käsittelypalvelun lisäksi vastaavat riskit on arvioitava jätteiden kuljetuksille. Palveluntarjoajien hinnoittelu ja palveluiden saatavuus vaikuttavat suoraan saavutettavissa oleviin säästöihin ja voimalaitosjätehuollon tasapainoon. Vaihtelua on mahdollista ennakoida pitkällä palvelusopimuksilla.

Kaikkiaan tutkimuksen tuloksiin vaikuttaa laaja joukko erilaisia epävarmuustekijöitä. Osa tekijöistä liittyy toteutettuun laskentaan. Tällaisia ovat esimerkiksi lähtötietojen laatu, jätemääräarviot sekä valittu korkotaso ja odotettu kustannusten nousu. Osa tekijöistä liittyy puolestaan laskennan ulkopuolelle rajattuihin tekijöihin kuten käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin sekä ydintekniseen luvitettavuuteen. Kaikkiaan tulokset antavat kuitenkin hyvän yleiskuvan voimalaitosjätehuollon kustannusrakenteesta, loppusijoitustoimintojen kustannuksista sekä uusien käsittelyratkaisujen mahdollistamasta säästöpotentiaalista.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Loppusijoituksen kustannukset muodostavat suurimman yksittäisen kuluerän voimalaitosjätteen käsittelyssä. Loppusijoituskustannukset ovat lähes yksinomaan sidottuja loppusijoitettavan jätteen määrään ja sitä kautta edelleen loppusijoitustilavuuteen. Loppusijoitettavaa jätettä syntyy paitsi ydinenergian tuotannon aikana myös käytöstäpoistovaiheessa.

Nykyaikaiset jätteenkäsittelyratkaisut ovat tilavuustehokkuudeltaan huomattavasti OL1:llä ja OL2:llä käytössä olevia ja OL3:lla käyttöönotettavia käsittelyratkaisuja edistyksempisiä. Johtuen ioninvaihtohartsijätteen käsittelyn huonosta tilavuustehokkuudesta ja metalliromun suuresta määrästä merkittävin kustannussäästöpotentiaali on saavutettavissa ioninvaihtohartsijätteen ja metalliromun käsittelyssä. Taulukossa 21 esitetään yhteenveto eri käsittelymenetelmillä saavutettavissa olevasta loppusijoitustilavuuden säästöpotentiaalista. Yhteenvetoon on koottu ydinvoimalaitosten koko elinkaari sekä kokonaispotentiaali käsittelymenetelmittäin. Lisäksi on tarkasteltu lasitusta ja plasmatulusta sekä NUWA-teknologiaa, metallijätteen sulatuskäsittelyä ja orgaanisen jätteen polttokäsittelyä yhdistelmittäin.

Taulukko 21. Yhteenveto eri käsittelymenetelmillä saavutettavissa olevasta loppusijoitustilavuuden säästöpotentiaalista.

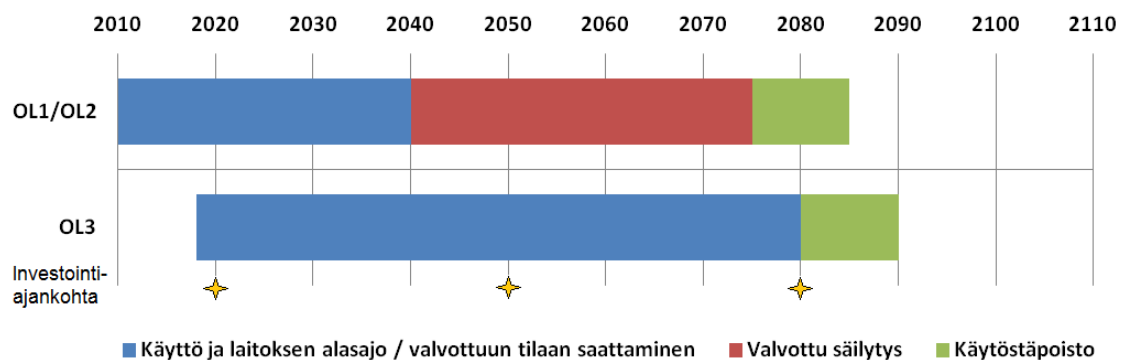
	OL1/OL2 m ³	OL3 m ³	Käytöstäpoisto m ³	Yhteensä m ³
Lasitus	1 070	828	0	1 898
Plasmatulatus	1 920	2 760	26 800	31 480
NUWA	648	72	0	720
Metallijätteen¹ sulatuskäsittely	1 380	1 770	13 776	16 926
Orgaanisen jätteen¹ polttokäsittely	276	618	0	894
Vanhentaminen	838	1 248	0	2 086

Lasitus + plasmatulatus	2 990	3 588	26 800	33 378
NUWA + metallijätteen sulatuskäsittely¹ + org. polttokäsittely¹	2 304	2 460	13 776	18 540

¹ Studsvik Ab:n tarjoama palvelu

VLJ-luolan laajentamisen esisuunnitelmassa esitetty loppusijoitussiilojen kokonaislaajennustarve on noin 79 800 m³. Taulukon 21 yhteenvedon perusteella nähdään, että saavutettavissa oleva säästöpotentiaali vastaa jopa 40 prosenttia laajennustarpeesta. Mikäli huomioidaan lisäksi OL3:n osalta laajennussuunnitelman laadinnassa käytetyt liian suuret jätemääräarviot, tämä voisi tarkoittaa kaikkiaan kolmen tai jopa neljän laajennussiilon louhimatta jättämistä. Keski-aktiivisen jätteen osalta tilavuustehokkaampi menetelmä ja kuivatun keskiaktiivisenjätteen loppusijoituksesta luopuminen mahdollistaisi kaiken keskiaktiivisen jätteen loppusijoittamisen jo olemassa olevaan KAJ-siiloon, jolloin VLJ-luolan laajennukseen tulisi louhittavaksi tiloja vain matala-aktiiviselle jätteelle. [34]

Voimalaitosyksiköiden jätehuollon toiminnot toteutetaan rinnakkain. OL3:n päivitettyyn valmistumisaikatauluun perustuen kuvassa 25 esitetään sähköntuotannon, valvotun säilytyksen ja käytöstäpoiston ajoittuminen OL1:llä ja OL2:lla suhteessa OL3:een. Kuvan aikajanalta nähdään, että rinnakkaisia toimintoja tulee olemaan paitsi samanlaisen sähköntuotannon aikana myös käytöstäpoistovaiheessa. Keskittämällä voimalaitosjätteen käsittely, voidaan investoinnin käyttöastetta kasvattaa ja yksikkökustannusta alentaa. 30 vuoden oletettuun käyttöikään perustuen voimalaitosjätehuollon elinkaari voidaan kattaa kolmella investoinnilla. Investointien mahdollinen ajoittuminen on kuvattu aikajanassa tähdillä. Vaikka suunnitteluperusteena käytetäänkin 30 vuoden käyttöikää, on realistista olettaa, ettei investoinnin uusinta vastaa laajuudeltaan alkuperäisinvestointia.



Kuva 25. Voimalaitosjätehuollon aikajana ja voimalaitosjätehuollon investointien ajoittuminen.

Kuvan 25 aikatauluun perustuen voimalaitosjätehuollon elinkaaren aikana käsittelymenetelmittäin saavutettavissa olevaa kustannussäästöpotentiaalia on hyvä tarkastella kokonaisuutena keskitettyjen voimalaitosjätehuollon investointien arvioimiseksi. Yhdistetyn kustannussäästöpotentiaalın avulla voidaan määrittää taso vastaavan investoinnin maksimihankintakustannuksille. Määritettyjen kustannussäästöpotentiaalın arvo on tutkimuksessa sidottu vuoden 2015 kustannustasoon, kuitenkin huomioiden materiaalikustannusten vuosittaisen nousun voimalaitosten käyttöiän aikana. Käyttämällä 5 % korkoa sekä kahdelle ensimmäiselle investoinnille 30 vuoden poistoaikaa ja kolmannel-

le investoinnille 10 vuoden poistoaikaa saadaan annuiteettimenetelmällä kullekin käsittelyinvestoinneille määritettyä taulukon 22 mukaiset maksimihankintakustannukset.

Taulukko 22. *Yhdistettyä kokonaiskustannussäästöpotentiaalia vastaava investoinnin maksimihankintakustannus käsittelyinvestoinneille.*

	Investoinnin maksimihankintakustannus, €	
	Yhdistelmä 1	Yhdistelmä 2
Lasitus		
Plasmasulatus		
NUWA		
Lasitus + plasmasulatus		

1 Lähtökohtana on käytetty hartsijätteen ja sekalaisten nesteiden kuivaamista erikseen.

Taulukossa 22 esitetään maksimihankintakustannuksena säästöpotentiaalia vastaava alkuperäisinvestoinnin hankintakustannus olettaen, että toisen investoinnin laajuus on puolet ja kolmannen investoinnin laajuus enää neljännes alkuperäisinvestoinnista, sekä soveltamalla voimalaitosten käytön aikana toteutettavaan toiseen investointiin 3,5 prosentin vuotuista kustannusten nousua. Kolmannessa investoinnissa on huomioitu enää plasmasulatus, koska käytöstäpoistojätteen ei odoteta sisältävän merkittäviä määriä orgaanista jätettä. Vasemmalla esitetään maksimihankintakustannus yhdistelmällä, jossa kustannussäästöpotentiaali lasketaan perustuen OL1:n ja OL2:n jätteen kertymään vuodesta 2020 alkaen sekä OL3:n jätteen jaottelua perustuen hartsin ja sekalaisten nesteiden yhteiskuivaukseen. Tämä edustaa vertailtavista yhdistelmistä pienintä kustannussäästöpotentiaalia. Oikealla esitetään maksimihankintakustannus yhdistelmällä, jossa kustannussäästöpotentiaali lasketaan perustuen OL1:n ja OL2:n jätteen kertymään vuodesta 2016 alkaen sekä OL3:n jätteen jaottelua perustuen hartsin ja sekalaisten nesteiden kuivaamiseen erillään. Tämä edustaa vertailtavista yhdistelmistä suurinta kustannussäästöpotentiaalia.

Selvitystyön ja tehtyjen laskelmien perusteella suositellaan voimalaitosjätehuollon yleisen kehityssuunnan linjaamista konsernissa. Ensimmäisessä vaiheessa tulisi määrittää halutaanko voimalaitosjätehuoltoa lähteä kehittämään uusien jätteenkäsittelyratkaisujen kautta vai halutaanko pitäytyä nykyisissä jätteenkäsittelyratkaisuihin ja -periaatteissa niitä mahdollisesti edelleen kehittäen. Mikäli kehitystä lähdetään tavoittelemaan jätehuoltokonseptin kokonaisvaltaisen uudistamisen kautta, on valittavissa kaksi käsittelyratkaisujen yhdistelmää, joilla pystytään kattamaan merkittävä osuus tuotetuista jätelajeista. Toinen yhdistelmä on lasituksen ja plasmasulatuksen yhdistelmä, jonka avulla voidaan käsitellä kaikki matala- ja keskiaktiiviset jätelajit niin voimalaitosten käytön aikana kuin käytöstäpoistovaiheessakin. Toinen vaihtoehto on puolestaan NUWA-tekniikan sekä metallijätteen sulatuskäsittelyn ja orgaanisen jätteen polttokäsittelyn yhdistelmä, joka kattaa vastaavasti kaikki jätelajit sekalaisten nesteiden käsittelyä lukuun ottamatta. Huolimatta siitä, millä laajuudella voimalaitosjätehuoltoa aletaan uudistaa, on hyvä muistaa, että tuotettavan jätteen määrän minimointi, lajittelun tehostaminen

yksinkertaisin toimenpitein ja matala-aktiivisen jätteen vanhentaminen tuovat säästöjä voimalaitosjätehuoltoketjussa käytettävästä käsittelymenetelmästä riippumatta.

Pitäytyminen nykyisissä jätteenkäsittelyratkaisussa ja -periaatteissa, ja niiden mahdollinen kehittäminen, tarjoaa oletusarvoltaan helpon ja suurimmalta osin valmiin ratkaisun. Ratkaisu ei sisällä merkittävää tilavuus- ja kustannussäästöpotentiaalia, mutta OL3:n kuivatun jätteenloppusijoituskonseptin määrittäminen ja luvittaminen sisältää riskejä ja velvoittaa investointeihin. Ongelmia saattaa aiheuttaa myös bitumointijärjestelmän toistuva käyttökunnottomuus, bitumin käyttöön liittyvä paloturvallisuusriski sekä bitumoidun jätteen sedimentoitumisilmiö. Myös VLJ-luolan laajennukseen liittyy investointiriskejä. Laajennustarvetta ja sitä kautta laajennusinvestointiin liittyviä riskejä on mahdollisuus pienentää käyttämällä tilavuustehokkaampia käsittelymenetelmiä.

Mikäli päätetään pitäytyä nykyisissä jätteenkäsittelyratkaisussa ja -periaatteissa, voimalaitosjätehuollon toiminnot pysyvät hajautettuina kunkin laitoksen käsitellessä pääasiassa vain omassa toiminnassaan tuotetut jätteet. Hajautetussa toimintamallissa resurssien ja asiantuntijuuden hyödyntäminen on haasteellisempaa eikä integroitujen toimintojen etuja pystyttyä hyödyntämään täysimääräisesti.

Lasituksen ja plasmasulatuksen yhdistelmä on puhtaasti käsittelylaitosinvestointiin perustuva vaihtoehto, jonka etuina ovat suurin tilavuus- ja kustannussäästöpotentiaali, jätteiden käsittely laitospaikalla sekä toiminnan ennustettavuus. Yhdistelmän merkittävimpinä riskeinä voidaan pitää korkeita investointikustannuksia, ydinteknisen luvituksen toteutusta keskiaktiivisen jätteen aktiivisuuden konsentroitumisen ja hiili-14 -päästöjen osalta sekä pitkäaikaista sitoutumista lasitusmatriisin toimittajaan.

NUWA-tekniikan sekä metallijätteen sulatuskäsittelyn ja orgaanisen jätteen polttokäsittelyn yhdistelmä sisältää ioninvaihtohartsijätteen käsittelylaitosinvestoinnin sekä jätteenkäsittelypalveluiden ulkoistamisen metalli- ja huoltojätteen osalta. Yhdistelmän etuina voidaan pitää alhaisempia investointikustannuksia ja täten myös alhaisempaa riskiä ydinteknisen luvituksen toteutukseen liittyen. Yhdistelmän riskeinä voidaan pitää puolestaan ulkoistettuun jätteenkäsittelyyn liittyvien selvitysten ja lupamenettelyjen monimutkaisuutta erityisesti, kun käsittely toteutetaan toisen valtion alueella. Lisäksi voimalaitosjätteenkäsittelyn konseptin sitominen ulkopuoliseen toimittajaan heikentää toiminnan jatkuvuuden ja kustannusten ennustettavuutta. Käsittelylaitosinvestoinnin osalta ydinteknisen luvituksen toteutukseen liittyvät samat riskit kuin lasituslaitoksen kohdallakin.

Voimalaitosjätehuollon kehittämisen linjauspäätökseen perustuen suositellaan ryhtyttäväksi viipymättä toimenpiteisiin toimintamallin käyttöönottamiseksi. Voimalaitosjätettä syntyy OL1:llä ja OL2:lla vuosittain 150–200 m³. Mitä aiemmin uudet menettelyt tai uusi teknologia saadaan käyttöönotettua, sitä suurempi on saavutettavissa oleva hyöty. Voimalaitosjätehuollon kokonaisvaltainen uudistaminen vaatii selkeät tavoitteet, resurssit ja toteutussuunnitelman. Uusille menetelmille on määriteltävä tekniset suorituskyky- ja turvallisuusvaatimukset sekä tehtävä perusteellinen soveltuvuus- ja kustannusarvio investointiriskien minimoimiseksi.

LÄHTEET

- [1] S. Virtanen, Voimalaitosjätehuolto prosessin kustannusten laskeminen toimintolaskennan avulla, pro gradu -tutkielma, Turun kauppakorkeakoulu. 2001, 80 s.
- [2] P. Nousiainen, Raskaan ja tilaa vievän kontaminoituneen romun säilytys Olkiluodossa, ver. 1, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 132533, 2009, 12 s. Rajattu jakelu.
- [3] E-S. Pöyhönen, Investointitarkastelu kiinteän jätteen käsittelylaitteistojen uusimiseksi, Teollisuuden Voima Oyj, julkaisematon, 2013, 3 s. Rajattu jakelu.
- [4] J. Tammela, Vitrification teknologian soveltuvuus selvitys, Teollisuuden Voima Oyj, julkaisematon, 2013, 3s. Rajattu jakelu.
- [5] E-S. Pöyhönen, Radioaktiivisten jätteiden määrät ja aktiivisuussisältö 31.12.2014, ver. 2, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 160659, 2015, 6 s. Rajattu jakelu.
- [6] K. Lundgren, OL1, OL2: Chemistry, radiation and fuel performance review 2011, ALARA-seminaari, Olkiluoto, Suomi, February 9, 2012, Studsvik ALARA Engineering, Studsvik Ab. 57 pp. Rajattu jakelu.
- [7] J. Sandberg, R. Paltemaa, Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet, teoksessa: T. K. Ikaheimonen (ed.), Säteily ja sen havaitseminen, Säteily- ja ydinturvallisuus 1, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2002, s. 11–63.
- [8] Mass Excesses and Decay Properties of Nuclei - Appendix F, in: J. S. Lilley, Nuclear Physics - Principles and Applications, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, UK, 2002, pp. 343–353.
- [9] R. Mustonen, A. Salo, Säteily ja solu, teoksessa: W. Paile (ed.), Säteilyn terveysvaikutukset, Säteily- ja ydinturvallisuus 4, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2002, s. 27–40.
- [10] Suomen perustuslaki, L 11.6.1999/731, 1999 Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990731>.
- [11] Ydinenergia laki, L 11.12.1987/990, 1987. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990>.
- [12] Ydinenergia-asetus, A 12.2.1988/161, 1988. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1988/19880161>.

- [13] Valtioneuvoston asetus ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuudesta, A 27.11.2008/736, 2008. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/20080736>.
- [14] Tasavallan presidentin asetus käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuutta koskevan yleis-sopimuksen voimaansaattamisesta, SopS 36/2001, 2001. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/2001/20010036>.
- [15] Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Registration No: 1729, International Atomic Energy Agency, 17.8.2015, 3 p. Saatavissa (viitattu 27.10.2015): http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv_status.pdf.
- [16] Ydinvoimalaitosohjeet (YVL-ohjeet), Säteilyturvakeskuksen ohjeistotietokanta, verkkoaineisto. Saatavilla (viitattu 25.10.2014): <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/luettelo/ydinvoimalaitosohjeet/>.
- [17] Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto, YVL D.4, Säteilyturvakeskus, 15.11.2013. Saatavissa (viitattu 25.10.2015): <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLD-4>.
- [18] Ydinjätteiden loppusijoitus, YVL D.5, Säteilyturvakeskus, 15.11.2013. Saatavissa (viitattu 25.10.2015): <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLD-5>.
- [19] Viranomaisohjeet, Säteilyturvakeskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.10.2014): http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/viranomaisohjeet/fi_FI/yvl/.
- [20] Organisaatio, Teollisuuden Voima Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.10.2015): <http://www.tvo.fi/Organisaatio>.
- [21] R. Saarimaa, Prosessiteknikko, Teollisuuden Voima Oyj, Eurajoki. Taulukko Summary.xls, henkilökohtainen sähköpostiviesti, 9.1.2014.
- [22] K.-H. Kleinschroth, O. Ludwik, J. Gau, Waste Management Concept for Operational Liquid and Solid, Topical report TR 1027, rev. E, Areva NP, Document number NGPM2/2004/en/0231, 2010, 87 p. Rajattu jakelu.
- [23] H. Hirvonen, E-S. Pöyhönen, O. Taivainen, P. Viitanen, Radioaktiivisten jätteiden määrät ja aktiivisuussisältö 31.12.XXXX (2005–2013) sekä Olkiluodon voimalaitoksen ympäristön säteilyvalvonnan vuosiraportti (2004), Teollisuuden Voima Oyj, 2004–2013. Rajattu jakelu.
- [24] J. Vahero, VLJ-FSAR L.2 – VLJ-luolan yleiskuvaus, ver. 2, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 127381, 2012, 8 s. Rajattu jakelu.

- [25] Voimalaitosjäte, Teollisuuden Voima Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.7.2014): <http://www.tvo.fi/voimalaitosjate>.
- [26] M. Palomäki. VLJ-FSAR L.1 – VLJ-luola: lopullinen turvallisuusseloste, ver. 4, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 107549, 2013, 18 s. Rajattu jakelu.
- [27] E-S. Pöyhönen, Radioaktiivisten jätteiden määrät ja aktiivisuussisältö 31.12.2013, ver. 2, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 156935, 2014, 5 s. Rajattu jakelu.
- [28] U-M. Piiparinen, VLJ-FSAR L.7 – Radioaktiiviset aineet VLJ-luolassa, ver. 6, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 107550, 2013, 20 s. Rajattu jakelu.
- [29] Valtioneuvoston päätös Teollisuuden Voima Oyj:n hakemukseen Eurajoen Olkiluodossa sijaitsevan VLJ-luolan käyttöluoheojen muuttamiseksi, 22.11.2012. Saatavissa: https://www.tem.fi/files/35052/Valtioneuvoston_paatos_22.11.2012.pdf.
- [30] P. Viitanen, VLJ-FSAR L.5 – VLJ-luolan suunnitteluperusteet, ver. 1, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 119930, 2007, 8 s. Rajattu jakelu.
- [31] Suomen virallinen tilasto (SVT): Kuluttajahintaindeksi, verkkoaineisto. ISSN=1796-3524. 2014, Rahanarvonkerroin 1860–2014. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa (viitattu 2.9.2015): http://www.stat.fi/til/khi/2014/khi_2014_2015-01-19_tau_001.html.
- [32] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennuskustannusindeksi, verkkoaineisto. ISSN=1795-4282. kesäkuu 2008, Rakennuskustannusindeksi 2000=100. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa (viitattu 2.9.2015): http://www.stat.fi/til/rki/2008/06/rki_2008_06_2008-07-11_tau_001.html
- [33] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennuskustannusindeksi, verkkoaineisto. ISSN=1795-4282. kesäkuu 2015, Liitetaulukko 8. Rakennuskustannusindeksi 2000=100. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla (viitattu 2.9.2015): http://www.stat.fi/til/rki/2015/06/rki_2015_06_2015-07-15_tau_009_fi.html
- [34] M. Nykyri, A. Gardemeister, P. Keto, M. Kokko, R. Riekkola, Työraportti VLJ-4/08, VLJ-luolan laajentamisen esisuunnitelma 2008, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 154075, Joulukuu 2008, 50 s. Rajattu jakelu.
- [35] Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, A 2.5.2013/331, 2013. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331>.

- [36] P. Koskinen, M. Leivo, K. Orantie, E. Vesikari, OL3 voimalaitosjätteen vaikutus VLJ-luolan KAJ-siilon kestävyYTEEN, VTT - Tutkimusselostus Nro RTE301/05, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 129355, 2005, 30 s. Rajattu jakelu.
- [37] K. Kangasniemi, VLJ-luolan KAJ-siilon kuljetuslaatikko OL3-voimalaitosjätteille, Finnmap Consulting Oy - Rakennekuvaus, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 129356, 2005, 2 s. Rajattu jakelu.
- [38] J. Tammela, Keski- ja matala-aktiivisten jätteen välivarastointi ja loppusijoitus, Technical Report TR 1027 Part 2, ver. 1, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 135148, 2011, 10 s. Rajattu jakelu.
- [39] YJH 2015 Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuollon ohjelma vuosille 2016–2018, Posiva Oy, Eurajoki, syyskuu 2015, 228 s. Saatavissa (viitattu 25.10.2015): http://www.posiva.fi/files/4057/YJH-2015_-_web.pdf.
- [40] R. Buckermann, Estimate of Radioactive Inventory prior to Decommissioning, rev. B, Areva NP, Document number NEPR-G/2008/en/1036, 2015, 25 p. Rajattu jakelu.
- [41] Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma, KYT2014 - Puiteohjelma tutkimuskaudelle 2011–2014, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu - Energia ja ilmasto 68/2010, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2010, 36 s. Saatavissa (viitattu 24.8.2014): http://kyt2014.vtt.fi/docs/puiteohjelma_TEM_68_2010_netti.pdf.
- [42] T. Haavisto, T&K -insinööri, Teollisuuden Voima Oyj, Eurajoki. Henkilökohtainen sähköpostikirjeenvaihto, 25.8.2014 ja 26.8.2014.
- [43] M.-J. Song, The vitrified solution, Nuclear Engineering International, February 2002, pp. 22–26.
- [44] C.-W. Kim, H.-J. Jo, Development of Ulchin Vitrification Facility for Vitrifying Radioactive Wastes Generated From Nuclear Power Plants, Proceeding of ICAPP 2013, Jeju Island, Korea, April 14–18, 2013, Central Research Institute (CRI) of KHNP, 6 p.
- [45] D.-M. Kim, J.-S. Jung, C.-W. Kim, Commercial Operation of Ulchin Vitrification Facility for LILW, Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., Republic of Korea, unpublished report, 6 p.
- [46] KHNP Vitrification Technology for Radioactive Waste Treatment, Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., marketing presentation, 19 p. Saatavissa (viitattu 22.2.2015): <http://ebook.khnp.co.kr/Viewer/TO29J1JP3QLP>.

- [47] M.-J. Song, C.-W. Kim, Vitrification of Combustible Dry Active Waste Generated from Korean Nuclear Power Plants, *Japanese Journal of Health Physics*, Vol. 39, No. 3, 2004, pp. 250–256.
- [48] C.-W. Kim, J. R. Choi, P. K. Ji, J.-K. Park, S.-W. Shin, J.-H. Ha, M.-J. Song, B. K. Ryu, F. Utsuno, I. Yasui, Crystal Growth Studies in a Lime-Aluminosilicate Glass System, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 113, No. 2, 2004, pp. 127–130.
- [49] H.-S. Jung, K.-D. Kim, S.-H. Lee, S.-K. Kwon, C.-W. Kim, J.-K. Park, T.-W. Hwang, Z.-S. Ahn, Characterization of Glass Melts Containing Simulated Low and Intermediate Level Radioactive Waste, *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 3, 2006, pp. 148–151.
- [50] C.-W. Kim, J.-K. Park, T.-W. Hwang, Analysis of Leaching Behavior of Simulated LILW Glasses by using the MCC-1 Test Method, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 48, No. 7, 2011, pp. 1108–1114.
- [51] Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta, A 14.2.2013/151, 2013. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130151>.
- [52] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen), EPNDir 2010/75/EU, 2010. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0075&qid=1446127958027&from=EN>.
- [53] M. Nieminen, NUWA - Volume Reduction of Organic Radioactive Nuclear Waste by Thermal Treatment (FI 20126130), VTT Oy, Espoo, technical presentation, 4.8.2015, 8 s. Rajattu jakelu.
- [54] M. Nieminen, Asiakaspäällikkö, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo. Henkilökohtainen tiedonanto 16.1.2015.
- [55] M. Nieminen, Asiakaspäällikkö, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo. Henkilökohtainen sähköpostiviesti, 28.9.2015.
- [56] B. Amcoff, B. Wirendal, Studsvik waste technology, Studsvik Ab, marketing presentation, 2013, 27 pp.
- [57] E-S. Pöyhönen, Radioaktiivisten jätteiden määrät ja aktiivisuussisältö 31.12.2012, ver. 1, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 144832, 2013, 5 s. Rajattu jakelu.

- [58] E-S. Pöyhönen, A. Raitanen, Z0556 MP-turbiinien romutus studsvikissa loppuraportti, ver. 2, Teollisuuden Voima Oyj, Asiakirjanumero 161989, 2015, 4 s. Rajattu jakelu.
- [59] B. Wirendal, A. Stenmark, G. Krause, Metallic scrap acceptance criteria - Melting services, Studsvik Ab, Document number STUDSVIK/N-09/041, 2009, 23 p. Saatavissa: <http://www.studsvik.com/Global/Melting%20Facility%20WAC.pdf>.
- [60] Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations - Table 3-1, in Commission recommendation: European Commission, Radiation protection 89, European communities, 1998. p. 8. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/89.pdf>.
- [61] S. Skoog, T. Vernersson, Waste Acceptance Criteria - Incineration Services, Studsvik Ab, Document number STUDSVIK/N-13/171, 2013, 46 p. Saatavissa: <http://www.studsvik.com/Global/Incineration%20Facility%20WAC.pdf>.
- [62] Envicont Solutions - Cutting and storage of less radioactive residue, Envicont GmbH, marketing presentation, 2013, pp. 5.