KÄYTETYN POLTTOAINEEN SIIRTOJEN SÄTEILYTURVALLISUUS OLKILUODOSSA

Lappeenrannan–Lahden Teknillinen Yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Niklas Järvinen

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen

TkT Elina Hujala

Ohjaajat: TkT Elina Hujala

DI Janne Vahero (Teollisuuden Voima Oyj)

DI Kalle Vuorenmaa (Teollisuuden Voima Oyj)

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiajärjestelmät/LUT

Energiatekniikka

Niklas Järvinen

Käytetyn polttoaineen siirtojen säteilyturvallisuus Olkiluodossa

Energiatekniikan diplomityö

2023

91 sivua, 40 kuvaa, 11 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen ja TkT Elina Hujala

Ohjaajat: TkT Elina Hujala, DI Janne Vahero ja DI Kalle Vuorenmaa

Avainsanat: Ydinpolttoaine, siirtosäiliö, kontaminaatio, säteily, Olkiluodon voimalaitos

Ydinpolttoaineen käsittely on kriittinen osa ydinvoimalaitosten energiantuotantoa. Käytetyn polttoaineen käsittelyyn liittyvien riskien vuoksi polttoaineen siirtäminen on monimutkainen prosessi. Oleellisena osana tätä prosessia on säteilyturvallisuus. Tässä työssä keskityttiin käytetyn polttoaineen siirtoprosessien säteilysuojeluun ja pyrittiin löytämään ratkaisuja havaittuihin kehityskohteisiin. Tämä diplomityö tehtiin yhteistyössä Olkiluodon ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaation kanssa.

Kontaminaation hallinnassa oli tunnistettu kehityskohteita radioaktiivisten hippujen havaitsemisessa ja hallinnassa polttoaineen siirtosäiliön siirtojen aikana. Ratkaisuiksi esitettiin antistaattisten puhdistusliinojen käyttöä siirtosäiliön puhdistuksen yhteydessä, kontaminaatiolta suojaavien irrotettavien geelien käyttöä, sekä korkeassa taustasäteilykentässä toimivien pintakontaminaatiomittareiden käyttöä. Esitettyjen ratkaisujen soveltuvuutta tullaan testaamaan seuraavissa käytetyn polttoaineen siirtokampanjoissa.

Olkiluoto 3 laitoksen käytetyn polttoaineen siirtojärjestelmälle tehtiin MCNP-mallinnus, jolla tutkittiin siirtosäiliön lastauksen vaikutusta ympäröivän tilan annosnopeuksiin. Tulosten perusteella järjestelmän säteilysuojauksen todettiin olevan riittävä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Niklas Järvinen

Radiation protection of spent nuclear fuel transfers in Olkiluoto

Master's thesis

2023

91 pages, 40 figures, 11 tables and 3 appendices

Examiners: Professor D.Sc. (Tech.) Juhani Hyvärinen and D.Sc. (Tech.) Elina Hujala

Supervisors: D.Sc. (Tech.) Elina Hujala, M.Sc. (Tech.) Janne Vahero and M.Sc. (Tech.) Kalle Vuorenmaa

Keywords: Nuclear Fuel, Transfer Cask, Contamination, Radiation, Olkiluoto Nuclear Power Plant

Handling of nuclear fuel is a critical part of the nuclear power plant's energy production. Risks involved in the handling of spent nuclear fuel make the handling process a complicated one. Radiation protection is an integral part of this process. In this thesis areas requiring improvement were studied and solutions were suggested. This master's thesis was done in cooperation with the radiation protection organization in Olkiluoto nuclear power plant.

Areas for improvement were observed in detection and control of radioactive particulate contamination during spent fuel transfer cask transfers. Use of antistatic cloths in the cleaning process, strippable gel coatings as protection against contamination, and high-background-radiation surface contamination meters were suggested as solutions. The applicability of these solutions will be reviewed during next spent fuel transfer campaigns.

MCNP-modelling was done for Olkiluoto 3 fuel transfer system to study the radiation effect of transfer cask loading to the surrounding area. The results showed that the radiation shielding in the system was adequate.

KIITOKSET

Tämän työn myötä myös opintoni LUT:ssa saapuvat päätökseen, ainakin tältä erää. Hetki siinä meni, mutta sainpahan loppuun hyvän kirittäjän OL3:sta. Ja toiseksihan tuo jäi! Haluan kiittää opiskelutovereita sekä yliopiston henkilökuntaa näistä kuluneista vuosista. Erityismainintoina professori Juhani Hyvärinen sekä TkT Elina Hujala, jotka tämän työn ohjaamisen ja tarkastamisen lisäksi tarjosivat mielenkiintoisia luentoja ydinvoimatekniikan tiimoilta. Hyvät opit ja muistot taskussa on helppo jatkaa eteenpäin kohti uusia haasteita.

Kiitokset kuuluvat myös TVO:n säteilysuojeluorganisaatiolle sekä tämän diplomityön tarjoamisesta, että aikaisempien kesätöiden osalta. Kyllä olisi iso osa koulun opeista mennyt ohi ilman töiden tarjoamaa käytännön näkökulmaa. Kiitokset Kalle Vuorenmaalle ja Janne Vaherolle diplomityön aiheen tarjoamisesta sekä työn ohjaamisesta.

Kiitokset myös perheelle ja läheisille jatkuvasta tuesta, avusta, kannustamisesta ja tarvittaessa painostuksesta. Erityiskiitokset opiskelukavereilleni Kallelle ja Roopelle, joiden kanssa päitä yhteen hakkaamalla puskettiin yliopistovuosien läpi. Minä nyt troikan viimeisenä valmistuvana voin sammutella valot lähtiessäni ja mennä töihin.

Eurajoella 16.2.2023

Niklas Järvinen

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	Aktiivisuus	[Bq, s^{-1}, cps]
B	Palama	[MWd/tU]
c	Valon nopeus tyhjiössä	[m/s]
$D_{T,R}$	Absorboitunut annos	[Gy]
E	Energia, Efektiivinen annos	[J, eV], [Sv]
$\dot{E}$	Efektiivinen annosnopeus	[Sv/h]
H_T	Ekvivalentti annos	[Sv]
m	Massa	[kg, t]
R	Suhteellinen virhe	[-]
S	Keskihajonta	[-]
t	Aika	[min]
$\bar{x}$	Keskiarvo	[-]
k	Vuo-annos-muuntokerroin	[mSv cm^2s/h]
L	Pituus	[cm]

Kreikkalaiset

φ	Vuo	[cm^{-2} s^{-1}]

Alaindeksit

n	neutroni
γ	gamma
avg	keskiarvo

Lyhenteet

BWR	engl. *boiling water reactor*, kiehutusvesireatori
EPR	engl. *European perssurized water reactor*, eurooppalainen painevesireatori
FOM	engl. *Figure of Merit*, hyvyysluku
IAEA	engl. *interantional atomic energy agency*, kansainvälinen atomienergiajärjestö
IFBA	engl. *Integral Fuel Burnable Absorber*
INES	engl. *international nuclear and radiological event scale*, kansainvälinen ydinlaitostapahtumien ja ydinonnettomuuksien luokitusasteikko
KPA-varasto	Käytetyn polttoaineen varasto
MADAC	engl. *mobile analyzer for detection of activity in crud*, kiintoaineksen aktiivisuuden analyysilaite
OL1	Olkiluoto 1
OL2	Olkiluoto 2
OL3	Olkiluoto 3
PA	Polttoaine
TVO	Teollisuuden voima Oyj
PWR	Engl. *pressurized water reactor*, painevesireaktori
STUK	Säteilyturvakeskus
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VOV	Engl. *variance of the variance*, varianssin varianssi
YVL	Ydinturvallisuusohje

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

1 Johdanto ... 8
2 Käytetty ydinpolttoaine ... 10
2.1 Olkiluoto 1 ja 2 reaktoreiden polttoaine ... 14
2.2 Olkiluoto 3 reaktorin polttoaine ... 19
3 Käytetyn polttoaineen siirrot ... 23
3.1 Polttoainesiirtojen ydinturvallisuus ... 23
3.2 Siirtoprosessit ... 24
3.2.1 Siirrot Olkiluoto 1 ja 2:lta käytetyn polttoaineen varastolle ... 24
3.2.2 Siirrot Olkiluoto 3:lta käytetyn polttoaineen varastolle ... 29
3.2.3 Siirrot käytetyn polttoaineen varastolta Posivalle ... 34
3.3 Poikkeustilanteet ... 36
4 Siirtojen säteilysuojelulliset haasteet ... 38
4.1 Työntekijöiden säteilyannokset ... 38
4.2 Radioaktiivisen pintakontaminaation mittaaminen ... 42
4.3 Radioaktiiviset hiput ... 44
5 Kontaminaation leviämisen hallinta ... 49
5.1 2021 kontaminaation leviäminen ... 49
5.2 Käytäntö ennen 2021 siirtoja ... 51
5.3 2021 tapahtuman pohjalta tehdyt korjaavat toimenpiteet ... 52
5.4 Esitettävät lisätoimenpiteet ... 53
5.4.1 Radioaktiivisten hippujen saannon tutkiminen ... 55
5.4.2 Mittauskampanja tuleville käytetyn polttoaineen siirroille ... 57
5.5 Käyttökokemuksia Loviisasta ... 58
5.6 Olkiluoto 3:n ja Posivan tulevat käytännöt ... 58
6 OL3 telakointiaseman MCNP mallinnus ... 60
6.1 Monte Carlo mallinnus ... 60
6.2 MCNP 6.2 ... 62
6.3 Mallinnusprosessi ... 64
6.4 Laskennan tulokset ... 75
7 Yhteenveto ... 84

Lähteet 86

Liitteet

Liite 1. Kontaminaation tarttumisen mittauspöytäkirjat ja laskenta

Liite 2. MCNP mallin materiaalien tiheydet

Liite 3. MCNP mallin materiaalikoostumukset massaosuuksina

1 Johdanto

Hiilidioksidivapaan energian kysyntä on kovassa kasvussa (Energiateollisuus 2022a). Euroopan Unionin tavoite päästä hiilineutraaliksi vuoteen 2050 mennessä vaatii fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä ja muiden, vihreämpien energialähteiden lisäämistä kaikilla yhteiskunnan sektoreilla (Euroopan parlamentti 2019). Tässä taistelussa ydinvoimalla on suuri merkitys, sillä ydinvoimalla saadaan tuotettua suuria määriä lähes hiilidioksidivapaata sähköä. Ydinvoiman suosio suomalaisten keskuudessa on selkeässä kasvussa (Energiateollisuus 2022b) ja sen asemaa puhtaan energian tuottajana vahvistaa myös vastikään tehty päätös sisällyttää ydinvoima EU:n kestävän rahoituksen taksonomiaan (WNN 2022).

Vaikka ydinvoima onkin yksi päästöttömimmistä energian tuotantomuodoista, on sillä myös varjopuolensa. Ydinvoiman käytöstä syntyy ionisoivaa säteilyä sekä radioaktiivista jätettä. Yksi suurimmista haasteista ydinvoiman parissa on juuri ydinjätteen, etenkin käytetyn polttoaineen käsittely. Käytetty polttoaine on erittäin radioaktiivista ja vasta satojentuhansien vuosien jälkeen aktiivisuus on laskenut luonnollisen uraanimalmin tasolle (Posiva 2020a).

Olkiluodossa Eurajoella sijaitsee toinen Suomen kahdesta ydinvoimalasta. Ydinvoimalan omistajana ja käyttäjänä toimii Teollisuuden Voima Oyj (TVO). Laitos koostuu kolmesta laitosyksiköstä; Olkiluoto 1, 2 ja 3 (OL1, OL2 ja OL3). Keskenään identtiset OL1 ja OL2 ovat nettosähköteholtaan 890 MW kiehutusvesireaktoreita (BWR), jotka valmistuivat vuosina 1978 ja 1980. OL3 on puolestaan sähköteholtaan 1600 MW EPR-mallinen painevesireaktori (PWR), jonka säännöllisen sähköntuotannon alkamista valmistellaan keväällä 2023. (TVO 2022a) Posiva Oy on TVO:n ja Fortum Power and Heat Oy:n perustama ydinjätehuollon asiantuntijayritys, jonka vastuulla on Suomessa tuotettujen ydinjätteiden loppusijoittaminen (TVO 2022b). Posivalla on tutkimus- sekä loppusijoituslaitos Olkiluodon voimalaitoksen läheisyydessä sekä peruskallioon kaivetut loppusijoitustilat noin 455 m syvyydessä (Posiva 2020b).

Vuoden 2021 syksyllä tehdyissä OL1 ja KPA-varaston välisissä käytetyn polttoaineen siirroissa havaittiin siirtosäiliön mukana tulleita radioaktiivisia partikkeleita päässeen valvonta-alueen ulkopuolelle. Kontaminoituneen siirtosäiliön siirtäminen rikkoo turvallisuusteknisiä käyttöehtoja (TTKE), joissa määritellään vaatimuksia ja rajoituksia ydinvoimalaitoksella tehtäville toimenpiteille. Tapahtuma raportoitiin säteilyturvakeskukselle (STUK), joka luokitteli tapahtuman INES 1 -luokkaan, eli poikkeukselliseksi turvallisuuteen vaikuttavaksi tapahtumaksi. (Häikiö 2022, 74) INES-luokittelu on kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) käyttämä ydinvoimalaitostapahtumien ja -onnettomuuksien luokittelujärjestelmä, joka jakautuu kahdeksaan (0–7) luokkaan. Luokan 0 tapahtumilla ei ole merkitystä ydin- tai säteilyturvallisuuden kannalta ja luokan 7 tapahtumat ovat erittäin vakavia onnettomuuksia. (STUK 2019a)

Tämä diplomityö tehtiin yhteistyössä Olkiluodon voimalaitoksen säteilysuojeluorganisaation kanssa. Työn ensimmäisessä osassa tutkittiin käytetyn polttoaineen siirtoja etenkin säteilysuojelun näkökulmasta ja pyrittiin löytämään parannusehdotuksia menetelmiin. Tässä yhteydessä polttoaineen siirroilla käsitetään siirrot reaktorista väliaikaisvarastoon ja lopulta Posivan loppusijoituslaitokselle, ei reaktorisydämen sisäisiä siirtoja. Työn toisessa osassa tutkittiin OL3 siirtosäiliön telakointiaseman säteilyturvallisuutta MCNP-mallinnuksella. Siirtosäiliön ja polttoainealtaan välisen telakointiaseman rakenteessa on havaittu kohta, jossa säteilysuojaus ei välttämättä ole riittävä siirtosäiliön lastauksen aikana.

2 Käytetty ydinpolttoaine

Ydinvoimalaitosten perusperiaate on sama, kuin muissakin lauhdevoimalaitoksissa: lämmönlähteellä keitetään vettä ja syntyneen höyryn avulla tuotetaan sähköä. Ydinvoimalaitoksissa lämmönlähteenä toimii poltettavien polttoaineiden, kuten biomassan tai hiilen kemiallisten sidoksien hajoamisessa vapautuvan energian sijasta polttoaineen ydinreaktioissa vapautuva energia. Ydinreaktioissa vapautuu miljoonia kertoja enemmän energiaa palamisreaktioihin verrattuna. Esimerkiksi yhden uraani-235 atomin fissiossa vapautuva sidosenergia on keskimäärin 200 MeV, kun taas hiilen poltossa vapautuva energia on noin 4 eV atomia kohden (WNA 2022). Tämä tarkoittaa, että saman energiamäärän tuottamiseen tarvittavan ydinpolttoaineen määrä on tuhansia kertoja pienempi, kuin vastaava fossiilisten polttoaineiden määrä.

Ydinreaktorin toiminta perustuu neutronien ylläpitämään ketjureaktioon. Reaktorissa neutronit lentelevät ympäriinsä törmäillen atomeihin. Törmätessään sopivan atomin kanssa neutroni aiheuttaa fission, eli kohteena ollut atomi halkeaa uusiksi aineiksi samalla lähettäen uusia neutroneita. Reaktiossa syntyvien uusien tytäratomien yhteenlaskettu massa on pienempi, kuin alkuperäisen emoatomin. Tämä massavaje on muuttunut energiaksi Einsteinin kuuluisan yhtälön mukaisesti ja jakautunut fissiossa syntyneiden partikkeleiden liike-energiaksi sekä gammasäteilyksi. (WNA 2022)

$$E = mc^2 \tag{1}$$

jossa E on vapautunut energia [J], m on massavaje [kg] ja c on valonnopeus tyhjiössä [m/s].

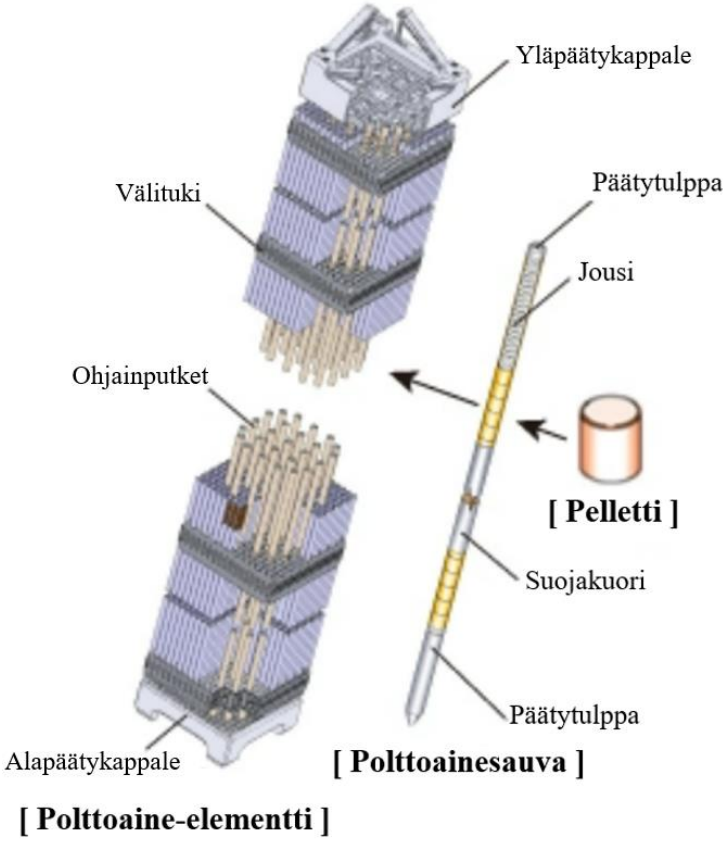
Reaktorin polttoaineen materiaalit on valittava siten, että vaadittava neutronivuo ja siten ketjureaktio on mahdollinen. Fissiili isotooppi kykenee fissioitumaan, eli hajoamaan millä tahansa siihen törmäävän neutronin energialla (Reuss 2008, 332). Hajotessaan fissiili aine tuottaa useamman kuin yhden neutronin, joka kykenee aiheuttamaan fissioitumisen seuraavassa vastaavassa nuklidissa. Esimerkiksi U-235:n fissiossa syntyy keskimäärin 2,4 uutta neutronia ja Pu-239:llä 2,9 (Lamarsh & Baratta 2001, 82). Tämä neutronien ylimäärä

riittää korvaamaan muissa vuorovaikutuksissa hävityt neutronit. Fissiilit nuklidit kykenevät siis ylläpitämään ketjureaktiota.

Kevytvesireaktoreissa, kuten OL1, -2 ja -3, käytetään polttoaineena uraanidioksidia. Luonnonuraanissa esiintyvä fissiili isotooppi on U-235, jota on noin 0,72 % luonnossa esiintyvästä uraanista. Suurin osa, yli 99 % luonnonuraanista on U-238 isotooppia. Näiden lisäksi on jäännösmääriä U–234 isotooppia (Lamarsh & Baratta 2001, 46). Jotta ketjureaktiolle saataisiin luotua otolliset olosuhteet, polttoaineen U-235 isotooppipitoisuus tulee rikastaa eli väkevöidä noin 3–5 m-%:iin. Rikastusprosessin jälkeen uraani on keraamisen uraanioksidin UO_2 muodossa. (WNA 2021)

Suurin osa polttoaineesta siis koostuu U-238 isotoopista, joka ei ole fissiili. U-238:kin pystyy fissioitumaan, mutta vain nopean, yli 1 MeV neutronin siihen osuessa. Tämä on kuitenkin suhteellisen harvinaista kevytvesireaktoreissa, joissa ketjureaktio perustuu termisiin noin 0,025 eV neutroneihin. U-238 kykenee kuitenkin neutronikaappauksen avulla muuttumaan U-239:ksi, joka kahden beetahajoamisen jälkeen muuttuu Pu-239:ksi, joka taas on fissiili nuklidi. Näin myös U-238 osallistuu energian tuottoon. Nuklideja, kuten U-238, jotka neutronikaappauksen jälkeen muuttuvat fissiileiksi aineiksi, kutsutaan fertiileiksi nuklideiksi. Sekä fissiileistä, että fertiileistä nuklideista käytetään yhteistä termiä fissioituvat nuklidit. (Reuss 2008, 318–319)

Polttoaineet ovat kevytvesireaktoreissa koottuna yksiköihin, joita kutsutaan elementeiksi tai tuttavallisemmin nipuiksi. Valmistajasta ja käyttökohteesta riippuen polttoaine-elementtien rakenteet ja materiaalit hieman vaihtelevat, mutta yleisesti kevytvesireaktoreiden polttoaineiden perusperiaate on sama. Kuvassa 1 on esitetty Mitsubishin valmistama PWR polttoaine-elementti. Yksi elementti koostuu sadoista yksittäisitä polttoainesauvoista, jotka ovat aseteltuina neliön tai kuusikulmion muotoon polttoainenipuksi. Yksi polttoainesauva sisältää satoja uraanioksidipellettejä. (WNA 2021)

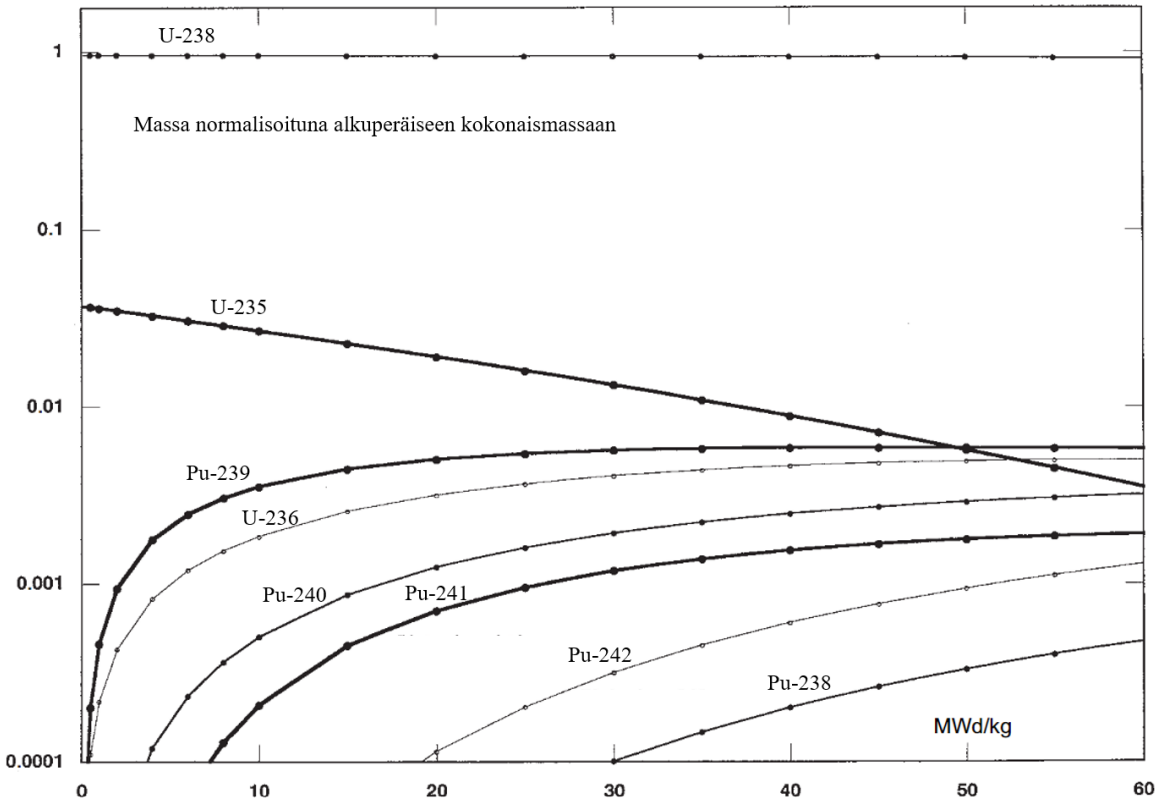


Kuva 1. Mitsubushin valmistama 17x17 PWR polttoaine-elementin rakenne (Mukaillen: Mitsubishi Nuclear Fuel).

Polttoainesauvat toimivat suojakuorena pelleteille. Suojakuorelle on useita vaatimuksia, jotka asettavat haasteita materiaalivalinnoille. Sauvojen tulee suojata polttoainepellettejä korroosiolta, kestää korkeita lämpötiloja, olla mahdollisimman läpinäkyvää neutroneille, pitää fissiotuotteet sisällään, johtaa lämpö polttoaineesta jäähdytteeseen sekä kestää jäähdytteen tilavuuden ja lämpötilan muutoksia samamaan aikaan, kun jatkuva neutronisäteily aiheuttaa muutoksia rakenteessa. Polttoaineen suojakuoret ovat valmistettu pääasiassa zirkoniumista, mutta sisältävät myös muutamia massaprosentteja muita metalleja kuten tinaa, rautaa, kromia ja nikkeliä. Uraanioksidin oksidoitumisen estämiseksi, polttoainesauvat ovat täytetty inertillä heliumilla. (Tsoulfanidis 2013, 91–92)

Polttoaineen fissioreaktioissa syntyviä uusia aineita, kuten jodi ja cesium, kutsutaan fissiotuotteiksi. Aktinidit ovat taas neutronikaappauksella syntyneitä uraania raskaampia aineita, kuten plutonium ja kadmium. Käyttöjakson lopulla U-235:n rikastusaste on tippunut

alkuperäisestä 3–5 %:sta alle 1 %:iin (Leppänen, 2021). Kuvassa 2 on esitettynä uraanin ja plutoniumin tärkeimpien isotooppien massaosuuksia palaman funktioina. Polttoaineen kulumista tahoajon aikana kuvataan polttoaineen palamalla, joka kertoo polttoaineen tuottaman energian määrän uraanin massaa kohti. Palama esitetään yksikössä MWd/kgU.



Kuva 2. Uraanin ja plutoniumin isotooppien massaosuudet PWR-polttoaineessa palaman funktiona (Mukaillen: Reuss 2008, 325).

Useat polttoaineessa syntyvät fissiotuotteet ovat radioaktiivisia ja myös näiden hajoamisissa vapautuu lämpöenergiaa. Sammutettu reaktori tuottaa yhä jälkilämpöä noin 7 % täydestä lämpötehostaan (Lamarsh & Baratta 2001, 414). Mikäli sammutetun reaktorin polttoainetta ei jäähdytetä jatkuvasti, jälkilämpö voi aiheuttaa vahinkoa polttoaineelle. Ajan myötä fissiotuotteiden hajotessa ja aktiivisuuden pienentyessä myös lämmöntuotto pienenee. Reaktorista poistettaessa käytetyt polttoaineet ovat liian aktiivisia ja tuottavat liikaa lämpöä, jotta ne voitaisiin turvallisesti siirtää suoraan välivarastoon. Sen sijaan polttoaine-elementit säilötään altaissa, joissa niitä jäähdytetään usean vuoden ajan. Tänä aikana aktiivisuuskin vähenee huomattavasti.

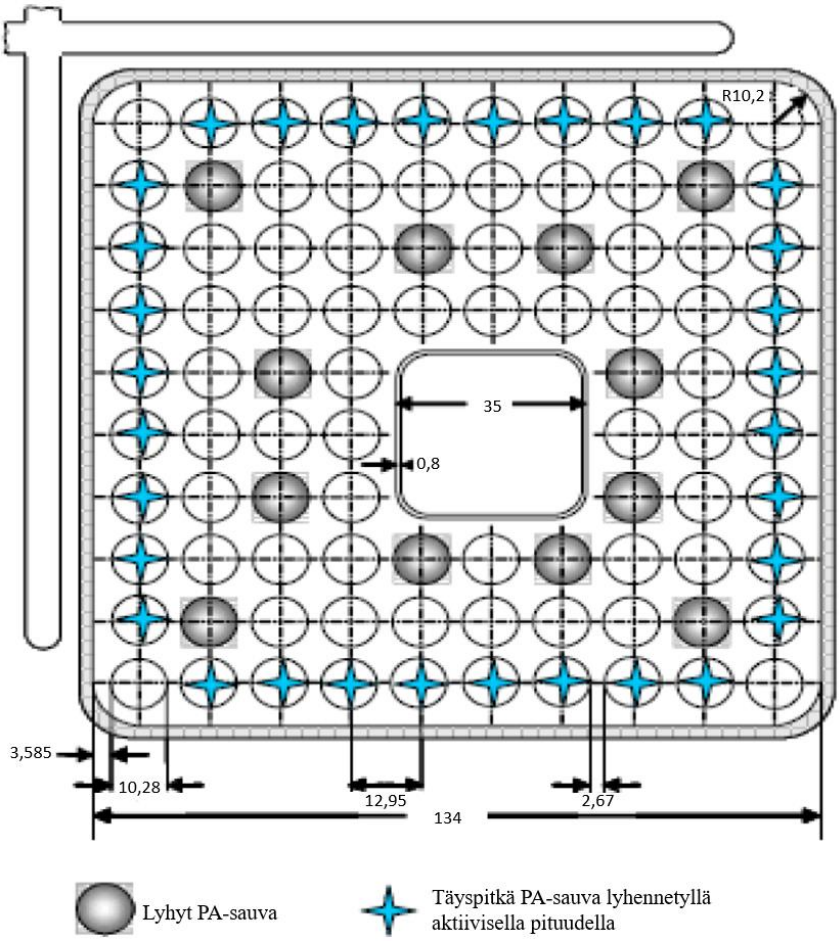
2.1 Olkiluoto 1 ja 2 reaktoreiden polttoaine

Kuten edellä mainittiin OL1 ja OL2 ovat identtisiä BWR-laitoksia. Laitosten reaktorisydämet koostuvat 500 polttoaine-elementistä. Kiehutusvesilaitoksissa veden kiehuminen tapahtuu reaktorissa, josta syntynyt höyry johdetaan turbiinille. Reaktorissa tapahtuva kiehuminen asetta rakenteellisia vaatimuksia polttoaineelle. (TVO 2007, 13–15)

BWR-polttoaineet ovat aksiaalisesti erittäin heterogeenisiä. Polttoaine-elementeissä on eri mittaisilla aktiivisilla pituuksilla olevia sauvoja siten, että elementin yläpäässä polttoaineen määrä on pienin. Tällä kompensoidaan reaktorissa tapahtuvaa veden ominaistilavuuden ja paineen muutosta, ja näistä syntyvää neutronien hidastuksen heikkenemistä. Polttoainenippua ympäröi metallinen kotelo, polttoainekanava, jonka tarkoituksena on estää veden ja vesihöyryn sivuttaisliikettä reaktorissa sekä parantaa irtoaineksen suodatusta (Michelsson 2019, 3). Lisäksi polttoainekanavien välissä kulkeva kiehumaton vesi tasoittaa paikallista tehojakaumaa sekä tehostaa nippujen reunoilla tapahtuvaa moderointia (Saarelainen 2016, 9). Reaktiivisuuden hallintaan käytettävät ristinmuotoiset säätösauvat ovat polttoaine-elementtien lomassa neljän elementin keskellä. (Tsoulfanadis 2004, 102–104)

Kuvassa Atrium 10XM polttoaine-elementin rakenne (Mukaillen: Michelsson 2019, 18).Kuva 3 on esitettynä poikkileikkaus TVO:lla käytettävän Atrium 10XM polttoaine-elementin rakenteesta. Kyseisessä polttoainetyypissä on 91 sauvaa, jotka on aseteltu 10x10 hilaan. Polttoainenipussa on kolmea erilaista polttoainesauvaa. Valkoisella on kuvattuna normaalit sauvat, joiden kokonais- ja aktiivinen pituus ovat 3979,4 mm ja 3680 mm. Reunoille asetetut ristillä merkityt sauvat ovat täyspitkiä, mutta joiden aktiivinen pituus on 3610 mm. Harmaalla merkityt ovat lyhyitä sauvoja, joiden kokonais- ja aktiiviset pituudet ovat 1854,5 mm ja 1580 mm. Aktiivisella pituudella tarkoitetaan polttoainesauvan uraanioksidia sisältävää osuutta. Keskellä nippua kulkee vesikanava. Kanavassa kulkeva nestemäinen vesi lisää hidastusta reaktorin kaksifaasialueella sekä tasoittaa paikallista tehojakaumaa (Manola & Evander 2004, 3). Kanava on yläpäästään liitetty nostokahvaan ja

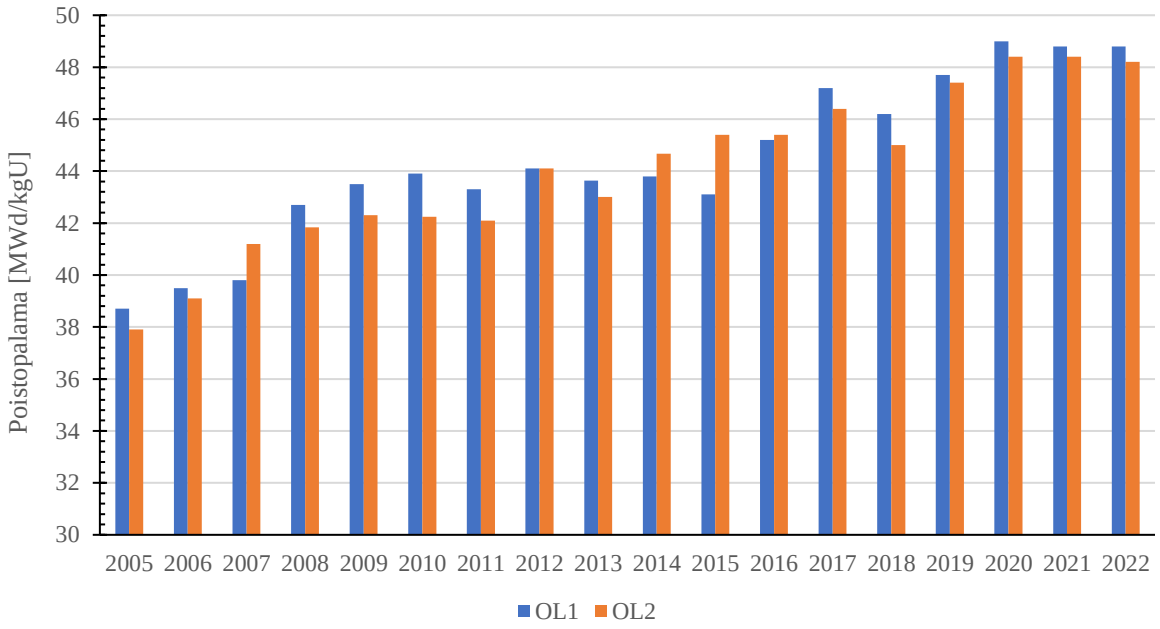
alapäästään elementin pohjalevyyn. Kuvassa on myös nähtävissä säätösauva elementin koteloinnin ulkopuolella. (Michelsson 2019, 9–16)



Kuva 3. Atrium 10XM polttoaine-elementin rakenne (Mukaillen: Michelsson 2019, 18).

Olkiluoto 1 ja 2 laitosten vuosihuolloissa reaktorin käytetystä polttoaineesta vaihdetaan noin neljännes, mikä tarkoittaa, että yksi polttoaine-elementti on noin neljä vuotta reaktorissa tuottamassa energiaa. STUK on säätänyt käytetylle polttoaineelle rajat keskimääräiselle nippupalamalle. Vuodesta 2010 alkaen STUK alkanut hyväksymään eri polttoaine-elementeille 50 MWd/kgU palamarajan ja 2016 alkaen kaikkia Olkiluodossa nyt käytössä olevia polttoaineita on saanut ajaa 50 MWd/kgU poistopalamalle (Tammela 2022, 5). Lisäksi 2018 lähtien TRITON11 testipolttoaineelle on hyväksytty 55 MWd/kgU raja (Tarkiainen 2022, 6). Kuvassa 4 on esitettynä vuosittain OL1 ja OL2 polttoainevaihdoissa poistettavien polttoaineiden keskimääräiset poistopalamat. Kuvasta nähdään, miten

palamien rajojen nosto näkyy keskiarvoissa lineaarisena nousuna rajan noston jälkeen. Nousu kestää noin neljä vuotta, eli polttoaineen käyttöajan verran, jonka jälkeen poistopalama tasoittuu.



Kuva 4. OL1 ja OL2 käytetyn polttoaineen poistopalamat vuosilta 2005–2022.

Olkiluodossa on tehty laskennallista tutkimusta polttoaineen koostumuksesta ydinturvallisuusorganisaation puolesta. Tutkimuksessa laskettiin koostumukset Atrium ja EPR polttoaineille 50 MWd/kgU ja 60 MWd/kgU poistopalamilla 0, 5 ja 100 vuoden jäähdytysajoilla. Laskennassa käytettiin 4,2 % väkevöintiä. Lisäksi tuloksia vertailtiin aiemmin tehtyyn tutkimukseen, jossa laskettiin TVO:n käytetyn BWR polttoaineen koostumus 45 MWd/kgU palamalla samoilla jäähdytysajoilla. (Alajärvi & Palomäki 2016, 3) Taulukossa 1 on esitettynä tutkimusten tulokset BWR polttoaineiden osalta. Ensimmäisessä sarakkeessa on BWR polttoaineen koostumus 45 MWd/kgU palamalla ja kahdessa seuraavassa on Atrium polttoaineen koostumukset 50 MWd/kgU ja 60 MWd/kgU palamilla. Taulukosta voidaan nähdä, että suurin osa käytetyn polttoaineen massasta koostuu yhä uraanista. Fissioiden ja aktivoitumisen seurauksena syntyneiden muiden aineiden osuudet polttoaineen massasta kyseisille palamille ovat 5,7 %, 6,2 % ja 7,4 %. Suurempi palama ja pidempi säteilytysaika kasvattavat fissiotuotteiden osuutta, joista suurimpana plutonium.

Taulukko 1. Käytetyn polttoaineen poistokoostumus BWR polttoaineille (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 5).

Alkuaine	BWR/45 [g/tU]	Atrium/50 [g/tU]	Atrium/60 [g/tU]	Alkuaine	BWR/45 [g/tU]	Atrium/50 [g/tU]	Atrium/60 [g/tU]
U	9,43E+05	9,38E+05	9,26E+05	Np	5,62E+02	6,71E+02	7,89E+02
Pu	9,43E+03	9,56E+03	1,03E+04	Rh	5,07E+02	5,86E+02	6,42E+02
Xe	7,10E+03	8,09E+03	9,78E+03	Kr	5,00E+02	5,50E+02	6,26E+02
Nd	5,23E+03	5,82E+03	6,96E+03	Rb	4,67E+02	5,22E+02	5,94E+02
Zr	4,82E+03	5,41E+03	6,27E+03	I	3,13E+02	2,96E+02	3,62E+02
Mo	4,45E+03	5,01E+03	5,96E+03	Am	2,27E+02	2,61E+02	4,04E+02
Cs	3,77E+03	4,26E+03	4,98E+03	Eu	2,32E+02	2,24E+02	2,77E+02
Ce	3,51E+03	3,96E+03	4,62E+03	Pm	1,28E+02	1,96E+02	1,84E+02
Ru	3,20E+03	3,63E+03	4,51E+03	Gd	1,61E+02	1,95E+02	3,23E+02
Ba	2,00E+03	2,25E+03	2,76E+03	Cd	1,59E+02	1,38E+02	2,10E+02
Pd	1,82E+03	1,99E+03	2,76E+03	Ag	9,80E+01	1,09E+02	1,40E+02
La	1,65E+03	1,84E+03	2,17E+03	Cm	8,40E+01	1,04E+02	2,13E+02
Pr	1,49E+03	1,66E+03	1,95E+03	Se	7,60E+01	8,00E+01	9,30E+01
Sr	1,20E+03	1,33E+03	1,49E+03	Sn	1,21E+02	7,40E+01	9,30E+01
Tc	1,02E+03	1,16E+03	1,33E+03	Nb	2,60E+01	3,00E+01	2,90E+01
Sm	1,01E+03	1,05E+03	1,26E+03				
Te	6,47E+02	7,09E+02	8,60E+02				
Y	6,33E+02	6,99E+02	7,88E+02				

Säteilysuojelullisesti massaosuuksia tärkeämpää on polttoaineen materiaalien radioaktiivisuus ja siitä syntyvä säteily. Taulukoissa 2 ja 3 on esitettyinä BWR polttoaineiden suurimpia nuklidikohtaisia aktiivisuuksia uraanitonnia kohden reaktorista poistettaessa ja viiden vuoden jäähtymisajoilla. Taulukoissa on eriteltynä aktinidit sekä fissiotuotteet. Säteilysuojelun kannalta tärkeimmät nuklidit ovat Cm-244, Cs-137, Ba-137m, Kr-85 ja I-129. Viiden vuoden jäähtymisajan jälkeen Cm-244:n spontaanit fissiot ovat dominoiva neutronilähde, jolloin ne muodostavat 80 % polttoaineesta syntyvästä neutroniannosnopeudesta. Taulukosta nähdään, että Cm-244-aktiivisuus kaksinkertaistuu, kun palama nostetaan nykyisestä 50:stä 60 MWd/kgU:een. Gammasäteilyn osalta Cs-137 ja Ba-137m ovat dominoivia. Cs-137 beeta-hajoaa Ba-137m:ksi 30,1 vuoden puoliintumisajalla. Ba-137m sen sijaan purkaa viritystilansa korkeaenergisenä gammasäteilynä 2,5 minuutin puoliintumisajalla muodostaen stabiilia Ba-137:ää. Tämä tarkoittaa, että korkeaenergisen gammasäteilyn tuotto kestää vuosikymmeniä reaktorista poiston jälkeen. Molempien osuus kasvaa palaman kasvaessa. Pienenergiset gammat sekä alfa- ja beetahiukkaset absorboituvat polttoaine-elementin rakenteisiin tai viimeistään polttoainetta ympäröivään veteen ja siirtosäiliön suojarakenteisiin. Kr-85 ja I-129 ovat

kaasumaisia ja voivat näin vapautuessaan hengitysilmaan aiheuttaa kehon sisäistä kontaminaatiota. Tästä syystä on tärkeää, että polttoaine säilyy ehjänä käyttöjakson ja siirtojen aikana. Myös molempien näiden aktiivisuudet nousevat poistopalaman noustessa.

Taulukko 2. Nuklidikohtaisia aktiivisuuksia BWR polttoaineissa poistohetkellä (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 6).

Aktinidit	**BWR [GBq/tU]**	**Atrium/50 [GBq/tU]**	**Atrium/60 [GBq/tU]**	**Fissio-tuotteet**	**BWR [GBq/tU]**	**Atrium/50 [GBq/tU]**	**Atrium/60 [GBq/tU]**
Np-239	5,09E+08	6,10E+08	6,75E+08	Ba-140	4,07E+07	4,79E+07	4,69E+07
Pu-241	4,59E+06	4,79E+06	5,07E+06	Cs-134	8,07E+06	8,60E+06	1,15E+07
Cm-242	2,34E+06	2,39E+06	3,04E+06	Pm-147	4,29E+06	6,62E+06	6,22E+06
Cm-244	1,87E+05	2,42E+05	5,34E+05	Cs-137	5,09E+06	5,82E+06	6,90E+06
Pu-238	1,31E+05	1,69E+05	2,40E+05	Ba-137m	4,82E+06	5,53E+06	6,56E+06
Pu-240	2,21E+04	2,35E+04	2,59E+04	Y-90	3,69E+06	4,34E+06	4,88E+06
Pu-239	1,05E+04	1,00E+04	9,64E+03	Sr-90	3,55E+06	4,15E+06	4,62E+06
Am-241	6,76E+03	6,36E+03	6,53E+03	Kr-85	4,34E+05	5,16E+05	5,65E+05
Am-243	1,22E+03	1,55E+03	2,60E+03	Eu-154	6,14E+05	3,26E+05	4,05E+05
Cm-243	1,35E+03	1,18E+03	1,75E+03	Eu-155	3,70E+05	1,60E+05	2,04E+05
Am-242m	3,11E+02	3,53E+02	3,55E+02	H-3	2,59E+04	3,24E+04	4,01E+04
Pu-242	1,15E+02	1,28E+02	1,87E+02	Sm-151	1,52E+04	1,40E+04	1,44E+04
U-234	4,27E+01	3,99E+01	3,28E+01	Tc-99	6,40E+02	7,32E+02	8,39E+02
Cm-245	9,56E+00	1,97E+01	4,63E+01	Zr-93	9,10E+01	9,90E+01	1,14E+02
Np-237	1,31E+01	1,56E+01	1,85E+01	I-129	1,53E+00	1,45E+00	1,78E+00
U-236	1,32E+01	1,40E+01	1,43E+01	Yhteensä	4,18E+09	4,95E+09	4,96E+09
U-238	1,16E+01	1,15E+01	1,14E+01				
Cm-246	2,94E+00	5,89E+00	2,04E+01				
Yhteensä	1,08E+09	1,30E+09	1,46E+09				

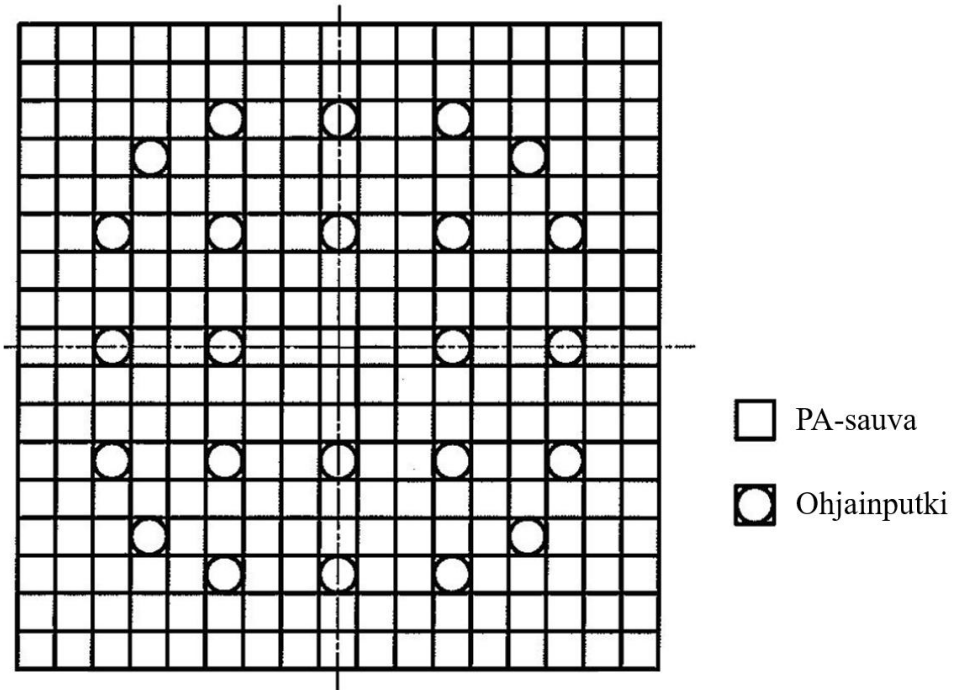
Taulukko 3. Nuklidikohtaisia aktiivisuuksia BWR polttoaineissa 5 vuoden jäähtymisajalla (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 8).

Aktinidit	**BWR [GBq/tU]**	**Atrium/50 [GBq/tU]**	**Atrium/60 [GBq/tU]**	**Fissio-tuotteet**	**BWR [GBq/tU]**	**Atrium/50 [GBq/tU]**	**Atrium/60 [GBq/tU]**
Pu-241	3,61E+06	3,75E+06	3,97E+06	Cs-137	4,53E+06	5,21E+06	6,16E+06
Cm-244	1,55E+05	2,00E+05	4,42E+05	Ba-137m	4,29E+06	4,89E+06	5,79E+06
Pu-238	1,38E+05	1,75E+05	2,47E+05	Sr-90	3,15E+06	3,69E+06	4,10E+06
Am-241	3,93E+04	4,05E+04	4,24E+04	Y-90	3,15E+06	3,69E+06	4,10E+06
Pu-240	2,22E+04	2,35E+04	2,62E+04	Pm-147	1,19E+06	1,82E+06	1,73E+06
Pu-239	1,07E+04	1,02E+04	9,84E+03	Cs-134	1,50E+06	1,61E+06	2,15E+06
Np-239	1,28E+03	1,55E+03	2,60E+03	Kr-85	3,14E+05	3,74E+05	4,08E+05
Am-243	1,28E+03	1,55E+03	2,60E+03	Eu-154	4,08E+05	2,16E+05	2,69E+05
Cm-242	1,25E+03	1,30E+03	1,58E+03	Eu-155	1,84E+05	7,54E+04	9,75E+04
Cm-243	1,19E+03	1,04E+03	1,55E+03	H-3	1,96E+04	2,45E+04	3,02E+04
Am-242m	3,04E+02	3,44E+02	3,47E+02	Sm-151	1,47E+04	1,37E+04	1,41E+04
Pu-242	1,15E+02	1,28E+02	1,87E+02	Tc-99	6,40E+02	7,36E+02	8,38E+02
U-234	4,46E+01	4,24E+01	3,61E+01	Zr-93	9,10E+01	9,92E+01	1,14E+02
Cm-245	9,55E+00	1,97E+01	4,63E+01	I-129	1,53E+00	1,45E+00	1,79E+00
Np-237	1,33E+01	1,60E+01	1,88E+01	Yhteensä	2,09E+07	2,40E+07	2,76E+07
U-236	1,32E+01	1,40E+01	1,43E+01				
U-238	1,16E+01	1,15E+01	1,14E+01				
Cm-246	2,94E+00	5,88E+00	2,04E+01				
Yhteensä	3,98E+06	4,22E+06	4,78E+06				

2.2 Olkiluoto 3 reaktorin polttoaine

Painevesilaitoksissa, kuten OL3:ssa, reaktorissa kiertävän primääripiirin veden paine pidetään niin korkeana, ettei se pääse kiehumaan. Reaktorin kuumentama vesi johdetaan erillisiin höyrystimiin, joissa turbiinin pyörittämiseen vaadittava höyry tuotetaan erillisessä sekundäärikierrossa. Painevesireaktorissa veden tilavuudessa ei tapahdu merkittävää globaalia muutosta. Tästä syystä polttoaineissa ei ole tarvetta käyttää erimittaisia polttoainesauvoja tai höyryn sivuttaisliikettä rajoittavaa kotelointia ja näin ollen PWR-elementit ovat aksiaalisesti homogeenisia. OL3 reaktorisydän koostuu 241 polttoaine-elementistä. Säätösauvoille on jokaisessa elementissä omat ohjainputkensa. Ohjainputkia voidaan käyttää säätösauvojen lisäksi myös neutronilähteille tai reaktori-instrumentoinnille. (TVO 2010, 13–17)

OL3:lla käytetään Arevan NP:n toimittamia AGORA HE-I-polttoaine-elementtejä. Kuvassa 5 on kuvattuna AGORA HE-I:n hilarakenne. Nipussa on 265 polttoainesauvaa ja 24 säätösauvan ohjainputkea järjesteltyinä 17x17 hilaan. Polttoainesauvat ovat tuettu 10 välituella, jotka ovat jaoteltu tasaisin välimatkoin sauvojen matkalle. Reunimmaiset välituet ovat suunniteltu kestämään suurta mekaanista rasitusta ja nämä hilat pitävätkin pääosin sauvat paikallaan. Keskimmäiset tuet ovat suunniteltu suurille lämpötiloille. Välitukien tarkoituksena on myös aiheuttaa virtaukseen pyörteitä, jolloin virtaus sekoittuu ja lämmönsiirto sauvoista veteen tehostuu. Elementin päädyissä on ala- ja yläpäätykappaleet, jotka ovat hitsattu kiinni ohjainputkiin. Yläpäätykappaleessa on kahva tarraimelle ja alapäätykappaleeseen on yhdistetty FUELGUARD-siivilä, joka suodattaa irtoainesta vedestä. Siivilä koostuu rinnakkain asetetuista pitkistä kourulevyistä. Rakenne tarjoaa tehokkaan irtokappaleiden suodatuksen heikentämättä veden läpivirtausta merkittävästi. (Kuch 2018, 9–10)



Kuva 5. AGORA HE-I polttoainenipun hilarakenne (Gebhardt 2018, 44).

Kappaleessa 2.1 viitatussa tutkimuksessa laskettiin myös polttoaineen koostumukset EPR-polttoaineelle. Koostumukset laskettiin 50 ja 60 MWd/kgU palamille ja polttoaineen väkevöinniksi oletettiin 4,0 %. Laskennan tuloksena saadut massaosuudet ovat taulukoituna

taulukossa 4. Tässäkin tapauksessa dominoiva alkuaine on uraani muiden aineiden osuuksien ollessa 6,5 % ja 7,7 % kyseisillä palamilla.

Taulukko 4. EPR-polttoaineen koostumus (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 5).

Alkuaine	EPR/50 [g/tU]	EPR/60 [g/tU]	Alkuaine	EPR/50 [g/tU]	EPR/60 [g/tU]
U	9,35E+05	9,23E+05	Y	6,66E+02	7,53E+02
Pu	1,22E+04	1,31E+04	Rh	6,11E+02	6,83E+02
Xe	8,06E+03	9,71E+03	Kr	5,27E+02	6,02E+02
Nd	5,68E+03	6,80E+03	Rb	4,96E+02	5,66E+02
Zr	5,24E+03	6,09E+03	Am	3,34E+02	4,97E+02
Mo	4,94E+03	5,89E+03	I	3,10E+02	3,78E+02
Cs	4,29E+03	5,05E+03	Eu	2,43E+02	3,01E+02
Ce	3,96E+03	4,62E+03	Gd	2,04E+02	3,23E+02
Ru	3,77E+03	4,65E+03	Pm	1,94E+02	1,88E+02
Ba	2,23E+03	2,73E+03	Cd	1,60E+02	2,36E+02
Pd	2,14E+03	2,91E+03	Cm	1,47E+02	2,81E+02
La	1,83E+03	2,16E+03	Ag	1,19E+02	1,49E+02
Pr	1,64E+03	1,94E+03	Se	7,80E+01	9,10E+01
Sr	1,27E+03	1,43E+03	Sn	7,80E+01	9,80E+01
Tc	1,13E+03	1,30E+03	Nb	3,50E+01	3,30E+01
Sm	1,06E+03	1,27E+03			
Np	8,08E+02	9,46E+02			
Te	7,17E+02	8,68E+02			

Taulukoissa 5–6 on kerättynä nuklidikohtaiset aktiivisuudet EPR-polttoaineelle 50 ja 60 MWd/kgU poistopalamilla heti reaktorista poistettaessa sekä viiden vuoden jäähtymisajalla. Myös tässä tapauksessa säteilysuojelullisesti tärkeimmät nuklidit ovat Cm-244, Cs-137, Ba-137m, Kr-85 ja I-129 aiemmin mainituista syistä. Kaikkien näiden nuklidien aktiivisuudet kasvavat poistopalaman noustessa. Suurin muutos aktiivisuudessa on Cm-244:lla, jonka aktiivisuus kaksinkertaistuu palaman kasvaessa.

Taulukko 5. Nuklidikohtaisia aktiivisuuksia EPR-polttoaineessa poistohetkellä (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 6).

Aktinidit	EPR/50 [GBq/tU]	EPR/60 [GBq/tU]	Fissio-tuotteet	EPR/50 [GBq/tU]	EPR/60 [GBq/tU]
Np-239	7,57E+08	8,00E+08	Ba-140	5,55E+07	5,46E+07
Pu-241	6,85E+06	7,45E+06	Cs-134	9,89E+06	1,30E+07
Cm-242	2,99E+06	3,89E+06	Pm-147	6,53E+06	6,32E+06
Cm-244	3,44E+05	6,96E+05	Cs-137	5,86E+06	6,95E+06
Pu-238	2,17E+05	3,12E+05	Ba-137m	5,56E+06	6,61E+06
Pu-240	2,48E+04	2,74E+04	Y-90	4,13E+06	4,65E+06
Pu-239	1,40E+04	1,40E+04	Sr-90	3,96E+06	4,45E+06
Am-241	8,58E+03	9,68E+03	Kr-85	5,02E+05	5,56E+05
Am-243	1,96E+03	3,10E+03	Eu-154	4,25E+05	5,38E+05
Cm-243	1,67E+03	2,52E+03	Eu-155	1,70E+05	2,16E+05
Am-242m	5,73E+02	6,45E+02	H-3	3,22E+04	3,96E+04
Pu-242	1,38E+02	1,92E+02	Sm-151	2,03E+04	2,17E+04
Cm-245	3,93E+01	8,86E+01	Tc-99	7,15E+02	8,21E+02
U-234	3,60E+01	3,02E+01	Zr-93	9,57E+01	1,10E+02
Np-237	1,87E+01	2,22E+01	I-129	1,52E+00	1,86E+00
U-236	1,31E+01	1,34E+01	Yhteensä	5,77E+09	5,77E+09
U-238	1,15E+01	1,14E+01			
Cm-246	9,01E+00	2,78E+01			
Yhteensä	1,62E+09	1,74E+09			

Taulukko 6. Nuklidikohtaisia aktiivisuuksia EPR-polttoaineessa 5 vuoden jäähtymisajalla (Mukaillen: Alajärvi & Palomäki 2016, 8).

Aktinidit	EPR/50 [GBq/tU]	EPR/60 [GBq/tU]	Fissio-tuotteet	EPR/50 [GBq/tU]	EPR/60 [GBq/tU]
Pu-241	5,38E+06	5,85E+06	Cs-137	5,21E+06	6,21E+06
Cm-244	2,85E+05	5,77E+05	Ba-137m	4,93E+06	5,83E+06
Pu-238	2,25E+05	3,22E+05	Sr-90	3,50E+06	3,94E+06
Am-241	5,70E+04	6,25E+04	Y-90	3,50E+06	3,94E+06
Pu-240	2,51E+04	2,78E+04	Cs-134	1,85E+06	2,42E+06
Pu-239	1,42E+04	1,42E+04	Pm-147	1,81E+06	1,75E+06
Np-239	1,96E+03	3,10E+03	Kr-85	3,64E+05	4,02E+05
Am-243	1,96E+03	3,10E+03	Eu-154	2,86E+05	3,59E+05
Cm-242	1,73E+03	2,18E+03	Eu-155	8,10E+04	1,03E+05
Cm-243	1,48E+03	2,23E+03	H-3	2,43E+04	3,00E+04
Am-242m	5,59E+02	6,29E+02	Sm-151	1,98E+04	2,12E+04
Pu-242	1,38E+02	1,92E+02	Tc-99	7,17E+02	8,26E+02
Cm-245	3,93E+01	8,85E+01	Zr-93	9,56E+01	1,10E+02
U-234	3,92E+01	3,48E+01	I-129	1,53E+00	1,88E+00
Np-237	1,92E+01	2,26E+01	Yhteensä	2,45E+07	2,82E+07
U-236	1,31E+01	1,35E+01			
U-238	1,15E+01	1,14E+01			
Cm-246	9,00E+00	2,77E+01			
Yhteensä	6,01E+06	6,85E+06			

3 Käytetyn polttoaineen siirrot

Käytetyn polttoaineen käsittelyyn liittyvien riskien takia polttoaineen siirtäminen on aina tarkka ja monimutkainen prosessi, jonka suorittamiseen osallistuu useita organisaatioita. Ydinenergialain (23.5.2008/342) pykälässä 7 h sanotaan: "Ydinlaitoksella on oltava tilat, laitteistot ja muut järjestelyt, joilla voidaan huolehtia turvallisesti laitoksen tarvitsemien ydinaineiden sekä käytössä ja käytöstä poistamisessa syntyvien ydinjätteiden käsittelystä ja varastoinnista.” Tässä kappaleessa käydään yksityiskohtaisesti läpi Olkiluodon voimalaitoksella suoritettavien käytetyn polttoaineen siirtojen prosesseja ja siirroissa käytettäviä laitteita.

3.1 Polttoainesiirtojen ydinturvallisuus

Polttoaineen tulee säilyä ehjänä koko siirtoprosessin ajan. Polttoaine-elementtien tarkoitus on pitää polttoaine ja fissiotuotteet sisällään. Käytetty polttoaine sisältää valtavat määrät aktiivisuutta ja täten tuottaa valtavasti säteilyä. Ionisoiva ja välillisesti ionisoiva säteily kykenee aiheuttamaan ionisaatiota ja virittymistä ympäröivän aineen atomeissa ja täten aiheuttamaan solumutaatioita elävässä kudoksessa. Tämän takia käytetyt polttoaineet pidetään jollain tavalla säteilysuojattuna siirron jokaisessa vaiheessa esimerkiksi tarpeeksi suurella vesikerroksella, kuten altaissa, tai siirtosäiliöiden rakenteella. Lisäksi siirtosäiliöt on suunniteltu sulkemaan radioaktiiviset aineet olomuodosta riippumatta sisäänsä polttoainerikon tapahtuessa.

Polttoaineen eheyden ja säteilyturvallisuuden lisäksi lämmönsiirto polttoaineesta ja kriittisyyden hallinta ovat tärkeitä kriteerejä. Kuten edellä mainittiin, käytetty polttoaine tuottaa yhä suuret määrät jälkilämpöä, joka riittämättömällä jäähdytyksellä voi aiheuttaa vaurioita polttoaine-elementin rakenteille tai jopa polttoaineen sulamista. Mikäli polttoaine pääsee siirtojen aikana kriittiseksi, mahdollisuudet polttoaineen vaurioitumiselle ja jopa sulamiselle kasvavat huomattavasti. Olkiluodossa käytettyä polttoainetta säilytetään jäähdytetyissä vesialtaissa. Vesi poistaa tehokkaasti jälkilämpöä polttoaineesta ja toimii samalla säteilysuojana. Vesi toimii kuitenkin myös hidastimena neutroneille, mikä on yksi

edellytys fissioketjureaktiolle. Polttoaine-elementtien varastointikorit on suunniteltu siten, että elementtien väliin jää tarpeeksi iso rako, ettei varastointiallas saavuta kriittistä massaa. Samoja metodeja on käytetty siirtosäiliöissä. Siirtosäiliöt on suunniteltu poistamaan syntyvä jälkilämpö ympäristöön, mutta siirtosäiliöissä ei ole tarpeeksi kattavia jäähdytysjärjestelmiä poistamaan kaikkea kriittisessä polttoaineessa syntyvää lämpöenergiaa. Siirtosäiliöiden tuleekin olla suunniteltu siten, että polttoaineet eivät saavuta kriittisyyttä siirtojen aikana.

3.2 Siirtoprosessit

Seuraavaksi kuvaillaan käytetyn polttoaineen siirtoprosessit Olkiluodon laitosalueella. Käytetyt polttoaineniput siirretään vuosihuolloissa reaktorista polttoainealtaaseen. Jäähtymisjakson jälkeen käytetyt polttoaineniput siirretään reaktorirakennusten varastointialtaista käytetyn polttoaineen varastolle (KPA-varasto) käyttöjakson aikaisina siirtokampanjoina. KPA-varastolta polttoaineet lopulta siirretään Posivan kapselointi- ja loppusijoituslaitokselle. Kaikki Olkiluodossa suoritettavat siirrot tapahtuvat märkäsiirtoina, eli siirrettävä polttoaine on koko siirron ajan veden peitossa. OL1- ja OL2-laitoksilla suoritettavat prosessit ovat identtiset pois lukien kuljetusreitit valvonta-alueen ulkopuolella. OL3:lla on erilaisen laitostyypin takia omanlaisensa polttoaineenkäsittelyjärjestelmät, joten siirtoprosessitkin poikkeavat OL1- ja OL2-laitosten prosesseista.

Tässä työssä puhutaan useaan otteeseen dekontaminoinnista. Dekontaminointi tarkoittaa kaikkia niitä toimenpiteitä, joilla kohteen pinnoilta poistetaan radioaktiivista kontaminaatiota. Tavallisimmat ja useimmiten riittävät metodit kontaminaation poistoon ovat rättipyyhintä vedellä tai liuotinaineella. Tarpeen vaatiessa voidaan turvautua myös rankempiin mekaanisiin irrotusmenetelmiin, kuten hiomiseen. Siirtosäiliön tapauksessa dekontaminointi rajoittuu rättipyyhintään.

3.2.1 Siirrot Olkiluoto 1 ja 2:lta käytetyn polttoaineen varastolle

Käytetyn polttoaineen siirtoprosessi alkaa, kun vuosihuolloissa noin neljännes reaktorisydämen polttoainenipuista vaihdetaan. Reaktorialtaan pinta on nostettu ylös sekä

polttoaine- ja reaktorialtaiden välinen allasportti avattu. Käytetyt polttoaineet nostetaan sydämen tukikorista polttoaineen siirtokoneella ja siirretään polttoainealtaaseen polttoainetelineeseen. Siirtojen lopuksi allasportti suljetaan. (Koski 2022, 16–18) Polttoainealtaassa polttoaine-elementtejä jäähdytetään noin viiden vuoden ajan ennen, kuin ne ovat valmiita siirrettäviksi KPA-varastolle (TVO 2022b). Viiden vuoden aikana polttoaineen aktiivisuus ja sen kautta jälkilämmön tuotto ovat pudonneet muutamaan tuhannesosaan reaktorista poiston tasosta.

Käyttöjakson aikaiset siirtokampanjat alkavat KPA-varastolta, missä käytetyn polttoaineen siirtosäiliötä säilytetään kampanjoiden välissä. Kuvassa 6 on OL1- ja OL2-laitoksilla polttoaineen siirtoihin käytettävä siirtosäiliö. Säiliö on GNS:n toimittama CASTOR TVO -tyyppinen märkäsiirtosäiliö, joka on mitoitettu 41 polttoainenipulle. Säiliö on materiaaliltaan pallografiittivalurautaa, joka on sisäpuoleltaan pinnoitettu nikkelillä korroosionkestoa varten. Säiliön kansi on ruostumatonta terästä. Pohjaan on lisätty kerros alumiinia mekaanisen rasituksen alaisille pinnoille. Säiliöön ei ole lisätty erikseen säteilyä absorboivia aineita, sillä paksu rautakerros vaimentaa gammasäteilyä tehokkaasti. (Helenius & Virtanen 2018, 4–9)

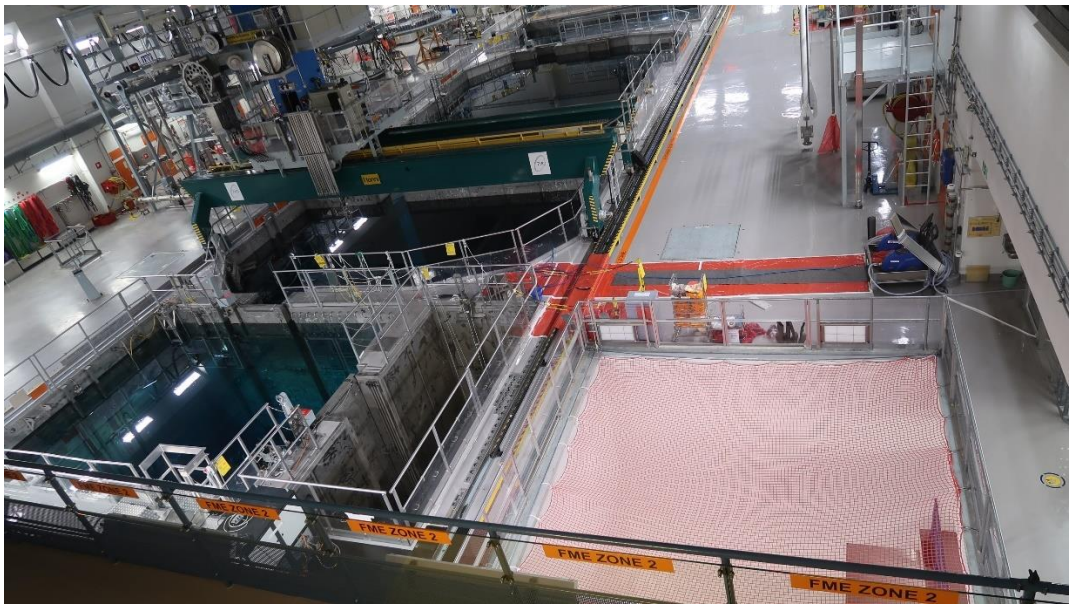
Kuva 6. OL1/OL2:lla käytettävä CASTOR TVO -siirtosäiliö.

Siirtoja varten säiliöön vaihdetaan oikea sisäkori, riippuen siirretäänkö polttoainetta vai katkaistuja säätösauvoja. Säätösauvojen siirtoprosessi on sama, kuin käytetyllä polttoaineella, mutta aktiivisuudet ja annosnopeudet huomattavasti alhaisemmat. Sisäkorin vaihdon yhteydessä säiliön sisusta myös imuroidaan tarvittaessa (Tuulensuu 2015, 6). Siirtosäiliön kyljet ja päällisosa pestään ja todetaan pinnoiltaan puhtaaksi sekä irtoliasta että kontaminaatiosta (Miettinen 2021, 5). Säiliö lasketaan kyljelleen KPA-varaston kuljetuskäytävälle kuvassa 7 esitetylle kuljetusalustalleen ja säiliön pohja pestään. Säiliö, kuljetusalusta, ajoneuvo sekä kuljetuskäytävä todetaan kontaminaatiovapaiksi (Miettinen 2021, 5) ja siirtosäiliö kuljetetaan OL1 tai OL2 reaktorirakennuksen kuljetuskäytävälle. (Koski 2021, 12–15)

Kuva 7. OL1/OL2 siirtosäiliö kuljetusalustallaan.

Kuljetuskäytävältä siirtosäiliö nostetaan reaktorihalliin ja lasketaan siirtosäiliöaltaaseen. Kuvassa 8 on esitetty OL2 reaktorihallin altaiden sijoittelu. Altaan veden pintaa on tässä vaiheessa laskettu siten, että siirtosäiliölle päästään tekemään vaadittavat toimenpiteet. Ennen altaan pohjalle laskua säiliön kannen mutterit avataan huoltotasolta ja kannen nostotyökalu asennetaan kiinni. Laskun aikana säiliön kylkiä huuhdellaan puhtaalla vedellä. Vedellä huuhtelu kyllästää säiliön pinnan pienet raot puhtaalla vedellä ja estää näin

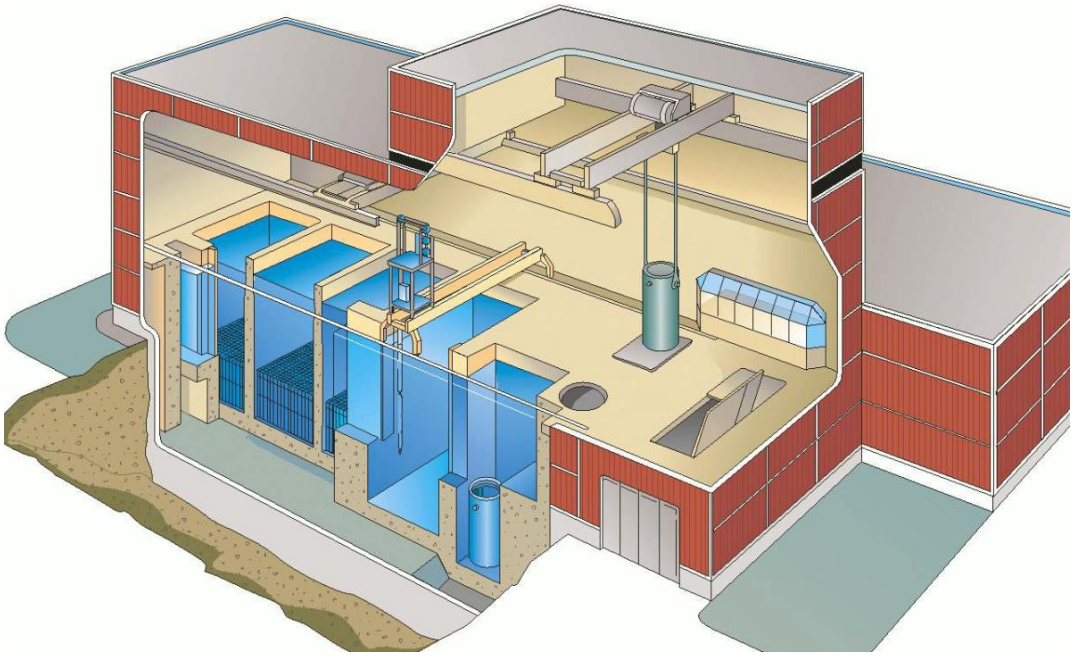
kontaminaatiota tarttumasta säiliön pintaan. Pohjalla säiliön kansi nostetaan pois ja siirretään säilytyspaikalleen reaktorihallin lattialle. Siirtosäiliöaltaan pinta nostetaan reaktorialtaan tasolle ja säiliön tiivistepinnan suoja asennetaan paikalleen. Lopuksi altaiden väliset portit avataan ja käytetyt polttoaineet lastataan säiliöön polttoaineen siirtokoneella. (Koski 2021, 16–22)



Kuva 8. OL2 reaktorihalli. Alhaalla vasemmalta oikealle ovat polttoaineallas, siirtosäiliöallas ja nostokuilu. Polttoainealtaan yläpuolella ovat reaktorialtaat. Altaiden päällä on kiskoilla kulkeva polttoaineen siirtokone.

Lastauksen jälkeen altaiden väliset portit suljetaan. Säiliön tiivistepinta tarkastetaan visuaalisesti epäpuhtauksien ja irtokappaleiden varalta, minkä jälkeen säiliön kansi nostetaan takaisin paikalleen. Altaan pinta lasketaan alas ja säiliö nostetaan altaan reunalle. Noston aikana säiliötä huuhdellaan puhtaalla vedellä kontaminaation pois pesemiseksi. Säiliön sisältä valutetaan vettä pois ja valutettavasta vedestä otetaan laboratorionäytteet, joilla todetaan polttoaineen eheys. Säiliön sisälle jäävä ilmatasku kerää mahdolliset polttoaineista vuotavat kaasut sekä mahdollistaa veden ominaistilavuuden muutokset (Seikola 2022). Kannen mutterit kiinnitetään huoltotasolta käsin, siirtosäiliö nostetaan pois altaasta ja säiliölle suoritetaan tiiveyskokeet. Tiiveyskokeiden jälkeen säiliön kyljet ja päällisosa dekontaminoidaan ja tarkistetaan kontaminaation varalta. Siirtosäiliö nostetaan alas kuljetuskäytävällä odottavalle kuljetusalustalle, jossa säiliön pohja pestään ja säteilyvalvonta suorittaa säteilymittaukset kuljetusyhdistelmälle, minkä jälkeen siirtosäiliö kuljetetaan KPA-varastolle. (Koski 2021, 22–27)

Kuvassa 9 on esitetty KPA-varaston rakenne. KPA-varastolla säiliö nostetaan varastohalliin ja lasketaan kuormausaltaan reunalle kannen aukaisua varten. Altaaseen laskun aikana säiliötä huuhdellaan vedellä kontaminaation tarttumisen ehkäisemiseksi. Ennen kannen aukaisua säiliö täytetään vedellä ja poistuva ilma mitataan jalokaasumonitorilla ja tarvittaessa säiliöstä otetaan vesinäyte. Näin varmistutaan, että polttoainesauvat ovat säilyneet ehjinä kuljetuksen aikana. Kannen mutterit avataan, kannen avaustyökalu kiinnitetään ja säiliö lasketaan altaan pohjalle. Kansi nostetaan pois ja siirretään säilytyspaikalleen. Tiivistepinnan suojus asetetaan paikalleen ja polttoaineet siirretään varastointialtaaseen polttoaineen siirtokoneella. (Koski 2021, 27–36)

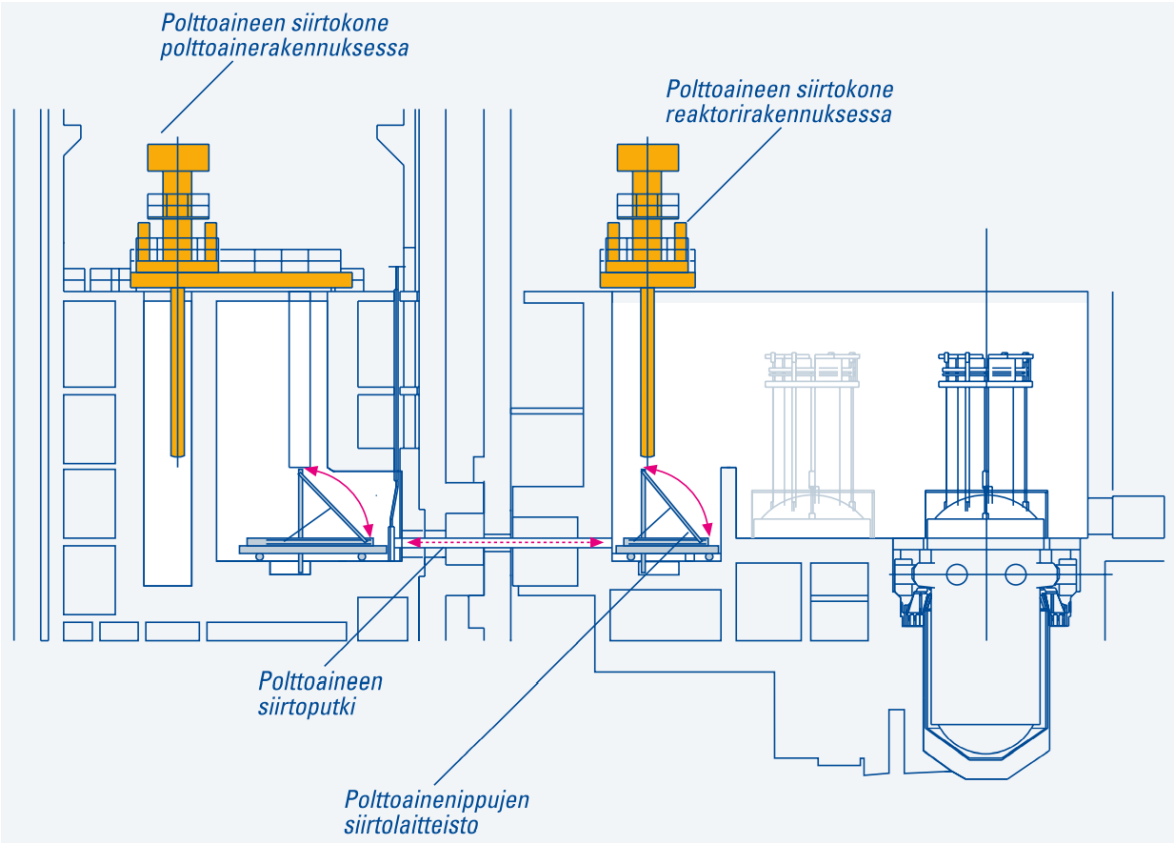


Kuva 9. KPA-varaston varastohalli. Oikeassa reunassa kuljetuskäytävälle johtava nostokuilu. Ensimmäinen allas oikealta on säiliön kuormausallas. Loput altaat ovat varastointialtaita. Kuvassa siirtosäiliö on esitetty sekä kuormausaltaassa, että nostolaiteessa. KPA-varaston varastointikapasiteettia on kasvatettu 2010–2014 lisäaltailla, joita ei näy kuvassa. (Palomäki & Ristimäki 2013, 28)

Viimeisenä vaiheena siirtosäiliö saatetaan siirtovalmiuteen. Siirtosäiliö nostetaan altaasta samaan aikaan vedellä huuhdellen kontaminaation kuivumisen ehkäisemiseksi. Noston aikana säiliön ympäristöstä mitataan annosnopeudet. Säiliö siirretään säilytyspaikalleen ja ulkopinnat dekontaminoidaan. Lopuksi kansi nostetaan säiliön päälle, kiristetään paikalleen ja säiliölle suoritetaan tiiveyskoe. (Koski 2021, 36–39)

3.2.2 Siirrot Olkiluoto 3:lta käytetyn polttoaineen varastolle

OL3-laitos pohjautuu ranskalaisen Framatomen N4- ja saksalaisen Siemensin KONVOI-laitosmalleihin (TVO 2010, 4). OL3:lla, kuten N4:ssä polttoaineita ei säilytetä reaktorirakennuksen sisäisissä polttoainealtaissa, vaan erillisessä tuoreen ja käytetyn polttoaineen varastointiin tarkoitetussa polttoainerakennuksessa (Berger et al. 1996, 193). OL3:n polttoaineen siirtojärjestelmää on kuvattu kuvassa 10. Polttoaineet siirretään veden alla reaktori- ja polttoainerakennuksen yhdistävän putken läpi, joka kulkee rakennusten siirtoaltaiden välillä.



Kuva 10. OL3 reaktori- ja polttoainerakennusten välinen polttoaineen siirtojärjestelmä (TVO 2010, 21).

Siirtojen alkaessa polttoaine- ja reaktorirakennusten siirtoaltaat täytetään vedellä. Reaktori- ja siirtoaltaan sekä varastointi- ja siirtoaltaan väliset allasportit avataan. Käytetty elementti nostetaan siirtokoneella pois reaktorista ja siirretään siirtoaltaaseen kelkkaan, joka on altaan pohjalla olevassa siirtolaitteistossa kiinni. Siirtolaitteella polttoaine kaadetaan kyljelleen ja

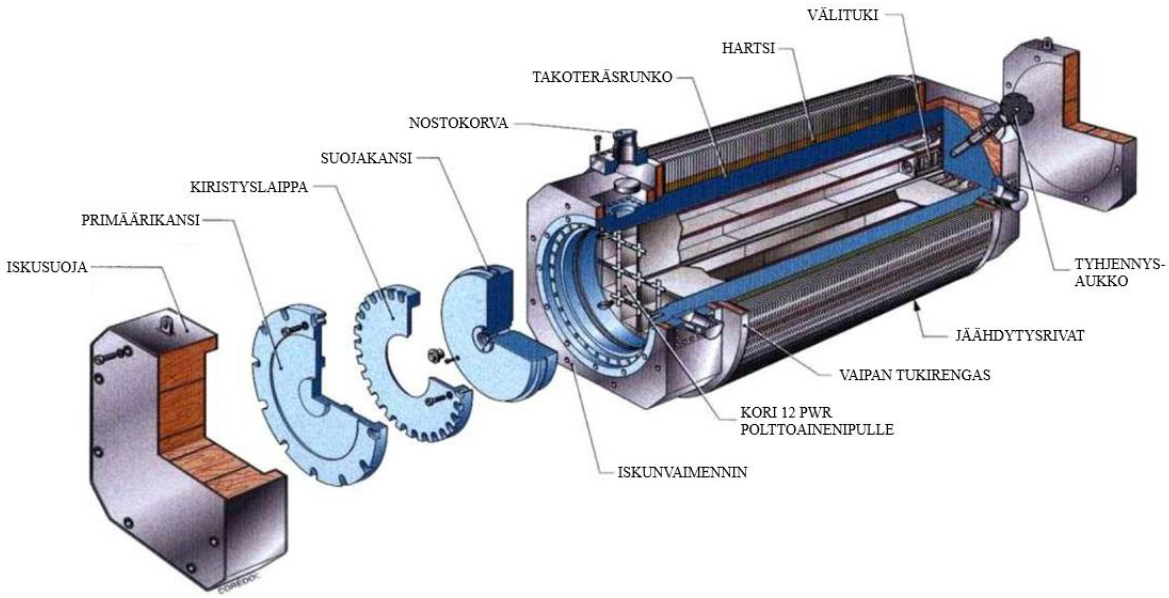
ajetaan kuljettimella polttoaineputken läpi. Toisella puolella on vastaavanlainen siirtolaitteisto, jolla elementti käännetään taas pystyyn ja nostetaan pois telakasta. Elementti siirretään siirtoaltaasta siirtolaitteella varastointialtaaseen, jossa polttoaineet viettävät seuraavat 4–5 vuotta jäähtyen. Kelkka ajetaan takaisin reaktorirakennuksen puolelle ja nostetaan pystyyn seuraavaa elementtiä varten. (Ehrmanntraut 2015, 17–18)

Myös OL3:lla tullaan polttoaineet siirtämään KPA-varastolle käyttöjaksojen aikaisissa siirtokampanjoissa. OL3:lla polttoainerakennuksen lastausallas on yhteydessä altaan alla kulkevaan lastaushalliin läpiviennin ja telakointiaseman kautta. Lastaushallia ja -allasta erottavat toisistaan kaksi kantta läpiviennin ylä- ja alapäissä. Molemmat kannet ovat suunniteltu kannattelemaan yläpuolisen altaan vesimäärän redundanssiperiaatteen mukaan. Lastaushallin katon läpiviennin alapäässä on telakointiasema, johon siirtosäiliö kiinnitetään vesitiiviisti lastausta varten. Hallissa sijaitsee myös kuvassa 11 esitetty siirtojuna, jolla kuljetetaan ja operoidaan siirtosäiliötä lastaushallissa. Siirtojunan toiminta on suunniteltu niin, että työntekijöiden ei tarvitse normaalitilanteessa olla lastauksen aikana lastaushallissa. Junaa ohjataan hallin viereisestä ohjainhuoneesta. Tämä vähentää työntekijöiden altistusta säteilylle. (Ehrmanntraut 2017, 15–16) Toisaalta taas siirtojuna on monimutkainen järjestelmä ja monimutkaisuuden myötä myös todennäköisyydet laitevioille ja toimintahäiriöille kasvavat. Mahdollisten laitevikojen korjaamiset yms. huoltotoimenpiteet lastatun siirtosäiliön ympärillä lisäävät työntekijöiden altistusta.

(a) (b)

Kuva 11. OL3 käytetyn polttoaineen siirtosäiliön siirtojuna telakointiasemassaan (a) ja junassa olevan säiliön suojasylinterin alaosa (b).

Kuvassa 12 on esitetty OL3:lla käytettävä Oranon valmistama TN 13/2 siirtosäiliö. Säiliö on mitoitettu 12 polttoainenipulle. Säiliön runko on valmistettu paksusta takoteräksestä, joka antaa mekaanisen kestävyyden lisäksi säteilysuojaa gammasäteilyä vastaan. Säiliön vaipassa on lisäksi kerros hartsia neutronisäteilysuojauksena. Säiliön vaipan ulkopinta on rivotettu tehokkaampaa lämmönsiirtoa varten. Altaisiin laskua varten ripaosuuden ympärille asennetaan peltikotelo kontaminaatiosuojaksi. Säiliössä on kaksiosainen kansi. Sisempi suojakansi on paksumpi ja sisältää hartsia ja volframia, jotka vaimentavat neutroni- ja gammasäteilyä tehokkaasti. Suojakansi kiristyy vesitiiviiksi kiristyslaipan avulla. Ulompi primäärikansi toimii varmistuksena säiliön vesitiiveydelle. Kuljetuksien ajaksi säiliön päätyihin asennetaan iskusuojat lisäsuojaukseksi. Lisäsuojat ovat peltikoteloitua balsapuuta. (Areva TN, 14–20)



Kuva 12. TN 13/2 siirtosäiliö (Mukaillen: Saubestre 2013, 3).

Siirtosäiliö nostetaan siirtojunan kyytiin nostimella lastaushallin ulkopuolella. Säteilyvalvonta perustaa lastauksen ajaksi lastaushalliin puhdasalueen eli rajaa ja mittaa alueen kontaminaatiosta vapaaksi (Vuorenmaa 2018, 1). Puhdasalueella varmennetaan, etteivät työntekijät tuo muualta laitosalueelta kontaminaatiota varusteidensa mukana ja näin helpotetaan siirtojunan mittaamista ja pesemistä myöhemmin. Juna ajetaan sisään halliin ja kytketään sähkö- ja vesijärjestelmiin kiinni. Säiliön primäärikansi irrotetaan kannen käsittelyasemassa ja nostetaan pois ja suojakannen kiristyslaipan pultit avataan. Juna ajetaan kuvassa 13a esitetylle suojakannen käsittelyasemalle, jossa kansi laippoineen irrotetaan säiliöstä. Samalla kuvassa 13b oleva läpiviennin alempi kansi avataan ja lasketaan siirtojunan kyytiin. Seuraavaksi juna ajetaan telakointiaseman alle ja suojakansi lasketaan jalustalleen junan kyytiin. Suojakannesta mitataan kontaminaatio ja tarvittaessa pestään (Vuorenmaa 2018, 1). Siirtosäiliö kohdistetaan telakan kanssa, kiinnitetään telakkaan vesitiiviisti ja säiliö sekä läpivienti täytetään vedellä. Läpiviennin ylempi kansi nostetaan auki, lastaus- ja varastointialtaan välinen allasportti avataan ja polttoaineen lastaaminen voi alkaa. (Ehrmanntraut 2017, 28–29)

(a) (b)

Kuva 13. OL3 siirtosäiliön suojakannen käsittelyasema ja säilytysjalusta (a) ja lastaushallin läpiviennin alempi kansi ja telakointiasema (b).

Lastauksen jälkeen allasportti sekä läpiviennin ylempi kansi suljetaan ja läpivienti huuhdellaan puhtaalla vedellä, tyhjennetään ja kuivataan paineilman avulla. Siirtosäiliöstä lasketaan vettä pois ja vedestä otetaan näyte booripitoisuuden määrittämiseksi. Seuraavaksi säiliö irrotetaan telakointiasemasta. Suojakansi nostetaan jalustaltaan ja juna ajetaan taas suojakannen käsittelyasemalle, missä suojakansi lasketaan säiliön päälle. Läpiviennin alempi kansi nostetaan junan kyydistä ja kiinnitetään paikoilleen. Junaa ajetaan eteenpäin primäärikannen käsittelyasemalle ja suojakansi kiristetään paikoilleen. Siirtosäiliön boorivesi korvataan suolanpoistetulla vedellä. Säiliön primäärikansi asennetaan paikoilleen ja säiliölle suoritetaan vuototestit. Siirtojuna irrotetaan sähkö- ja vesijärjestelmistä ja junalle suoritetaan kontaminaatiomittaukset sekä mahdollinen dekontaminointi ennen valvonta-alueen ulkopuolelle siirtoa. (Ehrmanntraut 2017, 29)

Säiliö nostetaan junan kyydistä lavetille ja iskusuojat asennetaan säiliön päihin. Lavetilla tehdään vielä annosnopeusmittaukset, minkä jälkeen säiliö siirretään KPA-varastolle. Varaston kuljetuskäytävällä säiliö nostetaan varastointihalliin, missä säiliön rivotuksen ympärille asennetaan kontaminaatiosuoja. Säiliön primäärikansi avataan ja siirretään säilytyspaikalleen. Säiliön vapaa tila täytetään vedellä ja poistuvasta ilmasta otetaan ilmanäyte, joilla varmennetaan polttoaineen eheys. Siirtosäiliö nostetaan valmistelualtaaseen puhtaalla vedellä huuhdellen, missä suojakannen kiristyslaippa poistetaan ja pultinreiät tulpataan. Säiliö siirretään kuormausaltaaseen ja suojakansi nostetaan pois altaasta puhtaalla vedellä huuhdellen. Polttoaineet siirretään säiliöstä

varastointikoreihin. Kuormauksen jälkeen siirtosäiliö nostetaan altaasta jatkuvasti huuhdellen. Säiliö nostetaan hallitasolle, pestään ulkopinnoiltaan ja säiliöstä otetaan kontaminaatiomittaukset. Mikäli siirtokampanja jatkuu, kontaminaatiosuoja irrotetaan. (Vuorenmaa 2018, 3–5)

3.2.3 Siirrot käytetyn polttoaineen varastolta Posivalle

Noin 40 vuoden jäähtymisajan jälkeen, polttoaineet siirretään KPA-varastolta Posivan loppusijoituslaitokselle, missä polttoaineet kapseloidaan ja loppusijoitetaan syvälle peruskallioon. KPA-varastoinnin aikana polttoaineiden aktiivisuus tippuu noin kymmenesosaan varastoinnin alkutasosta. Siirrot KPA-varastolta Posivan kapselointilaitokselle on tarkoitus suorittaa samoilla siirtosäiliöillä, kuin voimalaitoksilta KPA-varastolle. Selkeyden vuoksi tässä kuvataan siirtoprosessi vain OL3 siirtosäiliölle. Prosessi on OL1/OL2 säiliölle muilta osin sama, mutta kyseisessä säiliössä ei ole erillistä primäärikantta. OL1/OL2 säiliön kannelle tehdään samat toimet, kuin OL3 suojakannelle. Lisäksi OL1/OL2 siirtosäiliössä ei ole erillistä irrotettavaa kontaminaatiosuojaa tai iskusuojia.

Lastauksen ja suojakannen paikalleen laskun jälkeen säiliö nostetaan valmistelualtaaseen, missä suojakansi pestään ja kiristyslaippa asennetaan paikalleen. Tämän jälkeen säiliö nostetaan ylös taas vedellä huuhdellen. Siirtosäiliön tiiveys testataan, kontaminaatio mitataan ja ulkopinta dekontaminoidaan. Kontaminaatiosuoja poistetaan dekontaminoinnin jälkeen. Säiliö nostetaan allashallista alas kuljetuskäytävälle ja käännetään kyljelleen kuljetusalustan kyytiin. Säiliön pohja dekontaminoidaan ja säiliö-kuljetusalusta-yhdistelmälle tehdään annosnopeus- ja kontaminaatiomittaukset. Lisäksi siirtosäiliö sinetöidään siirron ajaksi ja säiliön päälle voidaan asentaa suoja suojaamaan säältä ja lialta. (Riihimäki 2021, 20–21)

Kuvassa 14 on esitetty Posivan kapselointilaitoksen rakenne. Siirtosäiliön saapuessa kapselointilaitokselle ajoneuvoyhdistelmän renkaat ja mahdollinen sääsuoja pestään tarvittaessa. Säiliö ajetaan sisälle vastaanottohalliin, missä sääsuoja avataan. Siirtosäiliön

iskusuojat poistetaan ja säiliö nostetaan siirtokäytävälle kiskoilla kulkevan vaunun kyytiin. Säiliö siirretään valmisteluasemalle, missä säiliön sisällä olevasta ilmasta otetaan näyte polttoainesauvojen eheyden varmentamiseksi. Primäärikansi avataan ja säiliön suojakannen kiristyslaippa poistetaan. Telakointiin tarvittavat tiivisteet ja ohjaimet asennetaan säiliöön, säiliö ajetaan käsittelykammion ja siirtokäytävän välisen telakointiaseman alle ja telakoidaan tiiviisti kiinni. Suojakansi nostetaan käsittelykammioon ja kannen päälle asetetaan suojakupu kontaminaatiosuojaksi. Polttoaine-elementit nostetaan säiliöstä kapselointiprosessiin. Polttoaineiden poistojen aikana siirtosäiliön vedenpintaa tarkkaillaan ja säiliöstä poistettavien polttoaine-elementtien tilavuus korvataan vedellä (Riihimäki 2021, 28). Nostojen jälkeen suojakansi nostetaan takaisin säiliön päälle. Säiliö irrotetaan telakasta ja säiliölle suoritetaan kontaminaatiomittaukset ja mahdollinen dekontaminointi. Telakointitiivisteet ja -ohjaimet puretaan, kiristinlaippa ja primäärikansi kiinnitetään ja säiliö siirretään takaisin vastaanottohalliin. (Riihimäki 2021, 24)

Kuva 14. Posivan kapselointilaitos. Oikealla on siirtosäiliön vastaanottotila. Vastaanottotilan vasemmalla puolella on polttoaineen käsittelykammio ja kammion alla kulkee kuvassa näkyvä kapseleiden käsittelykäytävä, jonka rinnalla kulkee siirtosäiliön siirtokäytävä. (Palomäki & Ristimäki 2013, 54)

3.3 Poikkeustilanteet

Kaikissa siirtoihin liittyvissä poikkeustilanteissa prioriteettina on pitää polttoaine-elementit ehjinä ja näin estää radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön. Erilaisia polttoaineen siirtojen aikana ilmeneviä poikkeustilanteita ovat esimerkiksi vuotavan polttoaine-elementin käsittely, polttoaine-elementin putoaminen tai törmääminen siirron aikana, siirtosäiliön putoaminen tai törmääminen siirron aikana, kontaminoituneen veden leviäminen ja siirtolaitteiden vioittumiset.

Käytetylle polttoaineelle tehdään varastointien aikana säännöllisesti tarkastuksia, joilla varmistetaan polttoaineen kunto allasvarastoinnin aikana sekä laitoksilla, että KPA-varastolla. Tarkastuksissa polttoaineen kunto varmistetaan visuaalisesti ja mitataan polttoainesauvojen oksidipaksuus. Varastointialtaiden vesikemiaa tarkkaillaan näytteenotoilla, joilla pystytään havaitsemaan mahdollisia polttoainevuotoja sekä varmennetaan varastointiin sopiva vesikemia. Mikäli vaurioituneita polttoainesauvoja havaitaan, kyseiset sauvat poistetaan nipuista ja varastoidaan hermeettisesti suljettuun kapseliin. Näitä kapseleita säilytetään varastointialtaissa omassa korissaan. (Huttunen 2022, 6–7)

Suurimpia riskejä polttoaineen siirroissa ilmenee lastatun siirtosäiliön nostojen aikana. Siirtosäiliöt on suunniteltu ja testattu kestämään erilaisia siirtojen aikana esiintyviä poikkeustilanteita polttoaineen vaurioitumatta. Säiliöille tehdyt testit sisältävät muun muassa vapaan pudotuksen yhdeksästä metristä joustamattomalle pinnalle, pudotus yhdestä metristä terävän kappaleen päälle, tulipalon, sekä säiliön sisäisen paineen nousun. Riskien minimoimiseksi nostot suoritetaan aina mahdollisimman lähellä lattiatasoa. Ainoa tilanne, jossa yhdeksän metrin nostokorkeus ylitetään, on kun OL1/OL2 siirtosäiliö nostetaan reaktorihalliin. Tässäkin tilanteessa nostokuilun pohjalla kuljetuskäytävän lattiassa on iskunvaimentimet, jotka pehmentävät iskua säiliön suunnittelukriteerien mukaiseksi. (Saubestre 2013, 7–13; Helenius & Virtanen 2018, 6)

OL3:n siirtosäiliön lastauksessa riskinä on telakoinnin vesitiiveyden menetys. Polttoainealtaiden vesi on kontaminoitunutta ja etenkin polttoaine-elementtejä käsitellessä aktiivista irtolikaa on vedessä runsaasti. Normaalisti käyttöjakson aikana lastausallas ja läpivienti ovat tyhjiä vedestä ja läpiviennin molemmat kannet ovat suljettuina. Mikäli telakoinnin vesitiiveys menetetään, kontaminoitunut allasvesi pääsee valumaan siirtojunan rakenteisiin ja lastaushalliin. Siirtojunan rakenne on erittäin monimutkainen ja sen mittaaminen ja peseminen ovat mittavia urakoita. Säiliössä oleva polttoaine aiheuttaa säteilyaltistusta säiliön ympäristössä työskenteleville. Telakointiaseman vesitiiveys turvattu kaksinkertaisilla suojauksilla ja jatkuvilla mittauksilla, jotka hälyttävät, mikäli ensimmäinen suojaus menetetään. Telakoinnin tiiveys myös testataan aina ennen polttoaineen lastausta. Kun hälytys vuodosta saadaan, käsittelyssä oleva polttoaine-elementti siirretään joko säiliöön tai takaisin polttoainealtaaseen ja läpiviennin ylempi kansi ja altaiden välinen allasportti suljetaan. Tämän jälkeen läpivienti voidaan tyhjentää vedestä ja aloittaa dekontaminointi- ja huoltotoimet. (Ehrmanntraut 2017, 29–30)

Poikkeustilanteen ilmetessä ohjeistuksena on saattaa työ turvallisesti keskeytykseen, ilmoittaa tilanteesta vuoropäällikölle ja odottaa lisäohjeita. Riippuen tilanteesta säteilysuojeluryhmä suorittaa säteily ja kontaminaatiomittaukset ja määrittelee siivoustarpeen ja jatkotöissä tarvittavat suojavarusteet. Esimerkiksi jos reaktorihallissa tapahtuu polttoaineen käsittelyonnettomuus, hallin ovet ja kuljetusaukot suljetaan ja halli tyhjennetään työntekijöistä. Hallin ilmastointi käännetään suodatetulle ilmastoinnille ja valvomo alkaa tarkkailla hallin ja ilmastointipiipun säteilytasoja. Säteilysuojeluryhmä käy suorittamassa säteily- ja ilmakontaminaatiomittaukset ja yhdessä valvomon mittaustulosten perusteella määrittelevät tarvittavat suojavarusteet. (Grönman 2017, 5–6)

4 Siirtojen säteilysuojelulliset haasteet

Säteilysuojeluorganisaatio on polttoainesiirtojen aikana vastuussa työntekijöiden annostarkkailusta sekä annosnopeus- ja kontaminaatiomittausten suorittamisesta ja on täten mukana lähes jokaisessa siirtoprosessin vaiheessa. Lisäksi onnettomuus- tai poikkeustilanteissa säteilysuojelun rooli on eristää alue, suorittaa tarvittavat mittaukset ja määrittää työn turvalliseen jatkamiseen vaadittava suojavarustus. Tässä kappaleessa käydään läpi käytetyn polttoaineen siirtoihin liittyviä säteilysuojeluorganisaation tehtäviä sekä säteilysuojelullisia haasteita.

4.1 Työntekijöiden säteilyannokset

Yksi säteilysuojelun toimia ohjaavista periaatteista on ALARA-periaate. Sen mukaan työntekijöiden saama säteilyannos tulee pitää niin pienenä, kuin on järkevästi mahdollista. Käytetyn polttoaineen parissa työskenteleville suurin riski aiheutuu suorasta säteilystä, joka syntyy polttoaineen fissiotuotteiden hajoamisista sekä jäljellä olevien fissiilien aineiden spontaaneista fissioista. Poikkeuksena tavalliseen laitosperäiseen säteilyannokseen, joka koostuu pääasiassa gammasäteilystä, polttoaine tuottaa lisäksi neutronisäteilyä. Neutroneilla ei ole sähkövarausta, joten neutronisäteily ei ole suoraan ionisoivaa säteilyä. Neutronit kuitenkin kykenevät vuorovaikutuksessa aineen kanssa luomaan viritystiloja, gammahiukkasia ja riittäviä rekyylienergioita, jotka voivat aiheuttaa ionisaatiota (Sandberg & Paltemaa 2002, 49–50). Tästä syystä neutronisäteilyä kutsutaan välillisesti ionisoivaksi säteilyksi.

Säteilyannosta kuvataan suureella absorboitunut annos $D_{T,R}$, joka kuvaa keskimääräistä kudokseen absorboitunutta energiaa kudoksen massaa kohden. Absorboituneen annoksen SI-yksikkö on Gray (Gy). Eri säteilylajeilla on biologisen haittavaikutuksensa perusteella määritellyt painotuskertoimet w_R. Efektiivisellä annoksella H_T tarkoitetaan säteilylajien, kuten alfa- ja beetasäteilyn painotuskertoimilla korjattua absorboitunutta annosta. Myös kehon eri osille on laskettu painotuskertoimet w_T perustuen säteilyn aiheuttamaan haittavaikutukseen. Ekvivalenttiannos E on eri kehon osien painotuskertoimilla korjattu

efektiivinen annos. Sekä efektiivisen, että ekvivalenttiannoksen SI-yksikkö on Sievert (Sv). Absorboitunut, efektiivinen ja ekvivalenttiannos ovat kytköksissä toisiinsa seuraavan yhtälön mukaisesti. (Marttila 2002, 79–81)

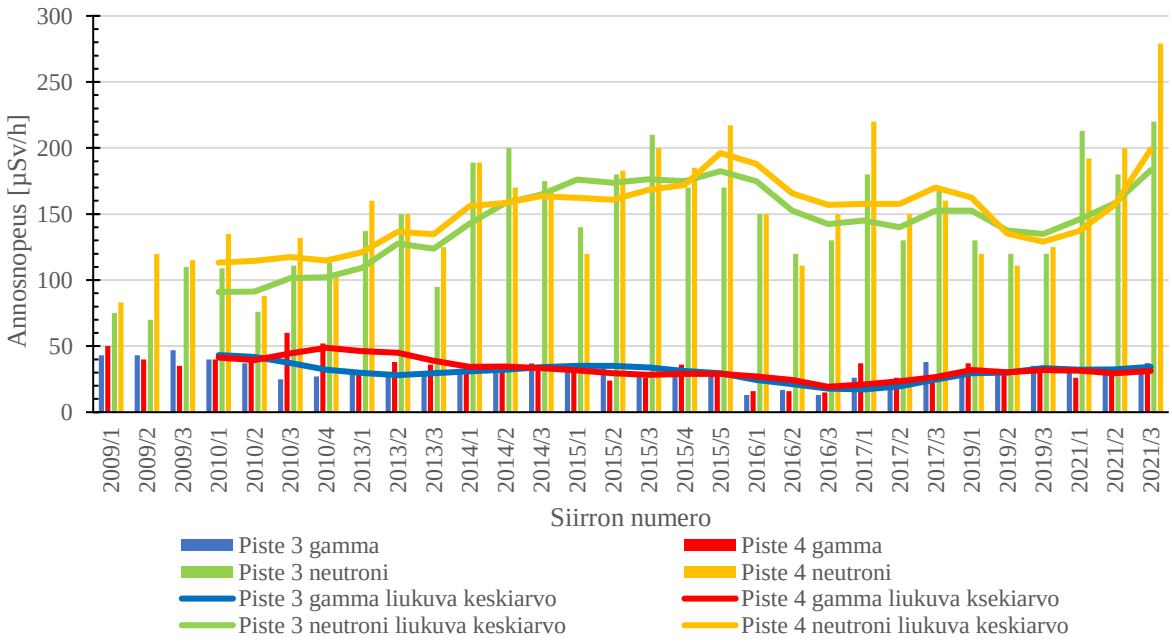
$$E = \sum_{\mathrm{T}} w_{\mathrm{T}} H_{\mathrm{T}} = \sum_{\mathrm{T}} w_{\mathrm{T}} \sum_{\mathrm{R}} w_{\mathrm{R}} D_{\mathrm{T,R}} = \sum_{\mathrm{R}} w_{\mathrm{R}} \sum_{\mathrm{T}} w_{\mathrm{T}} D_{\mathrm{T,R}} \tag{2}$$

Valtioneuvoston ionisoivan säteilyn asetuksen (22.11.2018/1034) pykälässä 13 määritellään vuotuiset annosrajat säteilytyöntekijöille:

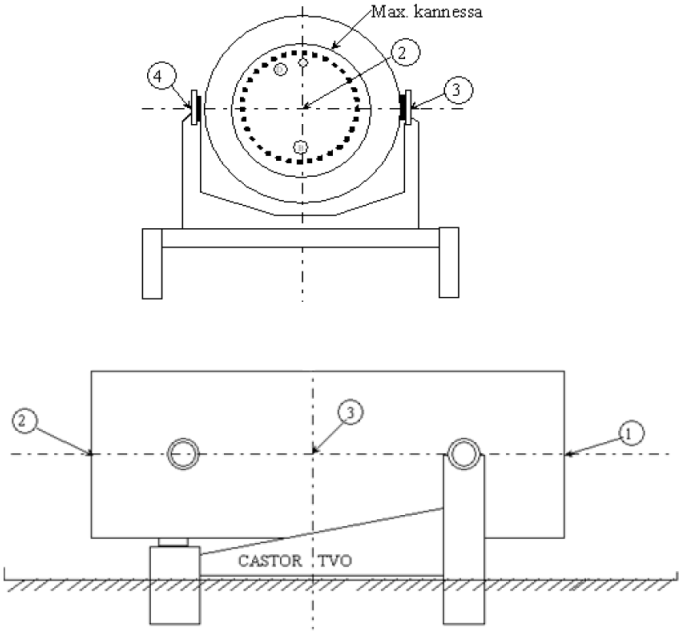
> "*Säteilytyöntekijälle aiheutuva efektiivinen annos ei saa olla suurempi kuin 20 millisievertiä vuodessa.*
>
> *Silmän mykiön ekvivalenttiannos ei saa olla suurempi kuin 100 millisievertiä viiden peräkkäisen vuoden ajanjaksona. Yksittäisenä vuotena annos ei kuitenkaan saa olla suurempi kuin 50 millisievertiä.*
>
> *Ihon ekvivalenttiannos ei saa olla eniten altistuneella yhden neliösenttimetrin suuruisella ihoalueella keskimääräisenä annoksena suurempi kuin 500 millisievertiä vuodessa.*
>
> *Käsien, käsivarsien, jalkaterien ja nilkkojen ekvivalenttiannos ei saa olla suurempi kuin 500 millisievertiä vuodessa.*"

Siirtokampanjaan osallistuvista työryhmistä suurimmat säteilyannokset aiheutuvat pesijöille, jotka työskentelevät eniten siirtosäiliön välittömässä läheisyydessä. Yleensä siirtosäiliötä joudutaan pesemään useampaan kertaan, jolloin altistusaikakin kasvaa. Pesijöiden lisäksi suurimmissa säteilykentissä joutuvat työskentelemään kansien pulttien kiinnittäjät. He ovat kuitenkin kentässä lyhyen aikaa, jolloin annoksetkin jäävät pieniksi.

Kuvassa 15 on kerättynä annosnopeustietoja 2009–2021 suoritetuista käytetyn polttoaineen siirroista OL1:llä. Mittaustulosten lisäksi kuvaan on laskettu neljän vuoden liukuva keskiarvo mittauksista. Mittaukset on otettu säiliön kyljestä säiliön ollessa kuljetusalustalla kuvan 16 mukaisesti. Kun tuloksia verrataan kuvan 4 poistopalamiin, havaitaan selkeä korrelaatio etenkin neutroniannosnopeuden ja poistopalaman välillä. Gamma-annosnopeus on mittausten perusteella pysynyt tasaisena rajojen nostoista huolimatta. Olkiluodossa on käytössä testielementtejä, joille on asetettu 55 MWd/kgU poistopalaman raja, joten keskipoistopalama tulee todennäköisesti tulevaisuudessa nousemaan. Poistopalamien myötä myös annosnopeudet tulevat nykyisillä järjestelmillä nousemaan.

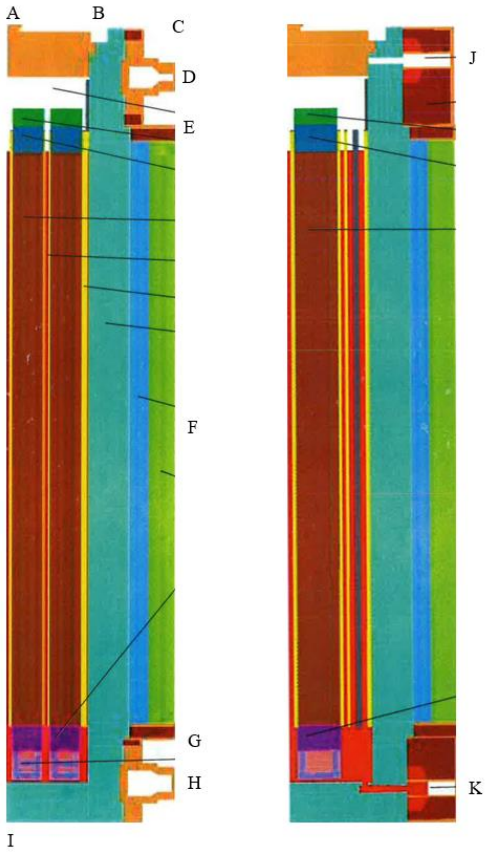


Kuva 15. OL1 siirtosäiliön annosnopeusmittauksia siirtokampanjoissa.



Kuva 16. OL1/OL2 siirtosäiliön annosnopeuksien mittapisteet.

Kuvassa 17 on kerättynä tuloksia Oranon tekemistä laskelmista yhteenlasketuista neutroni- ja gammasäteilystä johtuvista ekvivalenttiannosnopeuksista täyteen lastatun siirtosäiliön ympäristössä. Laskennassa käytettiin siirtosäiliön valmistajan ilmoittamia ääriarvoja polttoaineen ominaisuuksille: palama 60 MWd/kgU, väkevöinti 4,45 %, säteilytysaika 5 a ja jäähtymisaika 1 a (Paubel 2021, 4). Tuloksista nähdään, että suurimmat annosnopeudet ovat säiliön päädyissä, missä säteilysuojauksetkin ovat heikoimmat.



	Kontakti [mSv/h]	1 m [mSv/h]
A	0,129	0,144
B	1,39	0,156
C	0,176	0,029
D	0,027	0,033
E	0,046	0,033
F	0,083	0,038
G	0,035	0,032
H	0,014	0,018
I	0,15	0,045
J	0,131	0,037
K	0,023	0,019

Kuva 17.Täyteen lastatun OL3 siirtosäiliön laskennallisia annosnopeuksia (Paubel 2021).

Suoraan polttoaineesta tulevan säteilyn lisäksi siirtokampanjoissa on riskinä, että altaista nostettaessa joko nostettavaan kappaleeseen tai nostovälineisiin tarttuu altaasta korkea-aktiivista materiaalia. Vedestä pois nostettaessa tällainen korkea-aktiivinen materiaali voi nopeasti nostaa annosnopeustasoja liian korkeiksi työn turvallisen suorittamisen kannalta. Tämän takia kaikista altaista nostettavista komponenteista on mitattava annosnopeudet säteilysuojeluorganisaation toimesta jo nostovaiheessa.

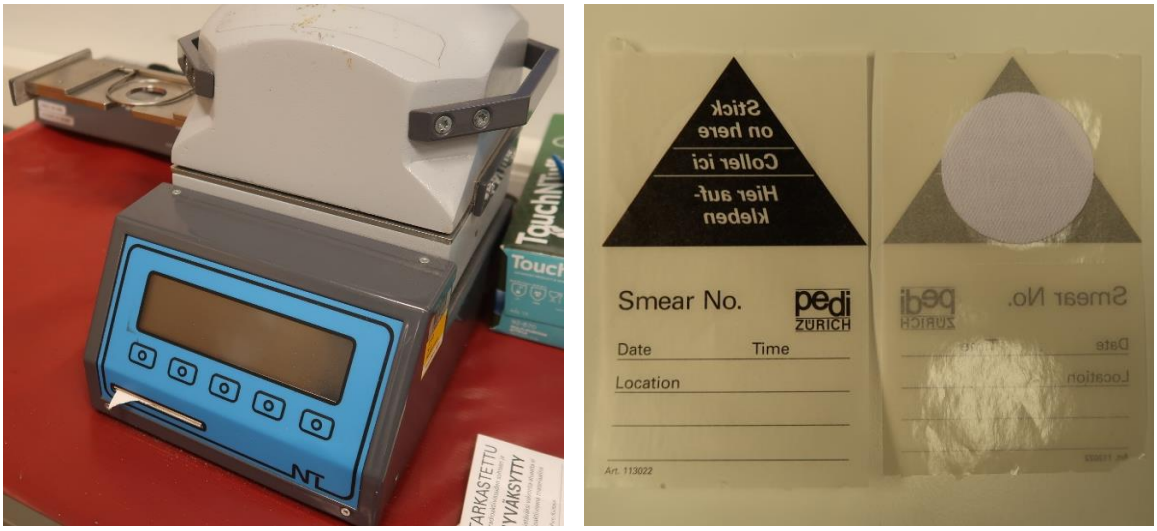
4.2 Radioaktiivisen pintakontaminaation mittaaminen

Kontaminaatiomittaukset ovat yksi säteilysuojelun päätyötehtäviä käytetyn polttoaineen siirtojen yhteydessä. Yksi säteilysuojelun pääperiaatteita on kontaminaation leviämisen estäminen valvonta-alueen ulkopuolelle (STUK 2019b). Käytetyn polttoaineen siirtoihin liittyen kaikki valvonta-alueelta lähtevä materiaali ja jokainen kuljetus todetaan puhtaaksi

ennen valvonta-alueen ulkopuolelle päästämistä. Kaikki nostot altaista on mitattava kontaminaation varalta nostovälineitä unohtamatta.

Pintakontaminaatiota mitataan kahdella tavalla. Suoralla mittaamisella tarkoitetaan nimensä mukaisesti kontaminoituneen pinnan mittaamista suoraan pintakontaminaatiomittarilla. Koko kontaminoitunut pinta-ala käydään läpi mittarilla, jolloin suurella todennäköisyydellä havaitaan pienetkin kontaminaatiomäärät. Epäsuorassa mittauksessa kontaminoituneesta pinnasta otetaan näyte, joka analysoidaan mittalaitteella. Näistä kahdesta suoraa mittaamista pidetään kattavampana ja luotettavampana mittaustapana ja Olkiluodossa pääsääntöisesti kaikki valvonta-alueen rajoilla suoritettavat lähtevän materiaalin kontaminaatiomittaukset ovat suoria mittauksia.

Suurin haaste pintakontaminaation suoralle mittaamiselle on taustasäteily. Olkiluodossa käytössä olevat pintakontaminaatiomittarit ovat gammaherkkiä, joten pienikin taustasäteily aiheuttaa mittariin suuria määriä ylimääräisiä pulsseja eli kohinaa. Näin oikeat mitattavan kontaminaation aiheuttamat pulssit jäävät kohinan alle ja mittaustulokset menettävät arvonsa. Tällaisissa tilanteissa käytetään epäsuoraa mittaustapaa. Mitattavat näytteet otetaan puuvillaisilla pyyhkäisynäytelapuilla ja analysoidaan Nutronicin valmistamissa NT200 tai NT900 mittalaitteissa. Kuvassa 18 on esitetty NT200 sekä pyyhkäisynäytelappu. Yhdellä näytelapulla pyyhittävä pinta-ala on 100 cm^2 ja mittalaitteiden laskennassa on oletettu kuivan pyyhkäisynäytteen saannoksi 10 % pyyhittävän pinnan kontaminaatiosta. Ongelmia epäsuorassa mittaustavassa aiheuttaa mitattava kohde. Mikäli kohteen pinta on riittävän karhea, muoto estää kattavan näytteen saamisen tai mitattava pinta-ala on tarpeeksi suuri, mittaustarkkuus heikkenee huomattavasti. Karhea pinta ja vaikeasti luokse päästävä muoto pystyvät estämään kontaminaation tarttumista näytelappuun ja suuria pinta-aloja ei ole ajankäytöllisesti kannattavaa pyyhkiä läpikotaisin. Näin etenkin pieniä kontaminaatiopartikkeleita ns. hippuja jää helposti mittausten ulkopuolelle.



(a) (b)

Kuva 18. NT200 analysointilaite (a) ja pyyhkäisynäytelappu (b).

4.3 Radioaktiiviset hiput

Tässä työssä viitataan useaan otteeseen radioaktiivisiin hippuihin. Radioaktiiviselle hipulle ei ole olemassa virallista määritelmää. Tässä työssä radioaktiivisilla hipuilla tarkoitetaan yksittäisiä pieniä pöly- tai likapartikkeleita, jotka sisältävät laitosperäisiä radioaktiivisia aineita. Pienestä massastaan huolimatta näiden hippujen aktiivisuudet voivat vaihdella suuresti riippuen hipun koosta ja koostumuksesta. Hippujen koot vaihtelevat hiekanjyvästä liian pieneksi paljaalla silmällä nähtäväksi eli noin 0,01–1 mm.

Pistemäisestä lähteestä syntyvän säteilyn intensiteetti heikkenee suhteessa etäisyyden neliöön, joten pienikin etäisyyden kasvattaminen heikentää säteilyn intensiteettiä tehokkaasti. Tämä yhdessä pienen koon kanssa tekee hippujen havaitsemisesta hankalaa. Pienestä koostaan huolimatta hippujen kontaktiannosnopeudet voivat olla hyvinkin suuria. Taulukossa 7 on koottuna 2021 siirtokampanjan seurauksena laitosalueelta löytyneiden hippujen tietoja sekä lisäksi kolmen muissa laitosten työtehtävissä havaitun hipun tiedot. Gamma-aktiivisuudet ja nuklidiosuudet on mitattu laboratoriomittauksin ja annosnopeudet säteilyvalvonnan toimesta kannettavilla annosnopeusmittareilla. Kuten tuloksista nähdään, aktiivisuudet ja sitä kautta annosnopeudet vaihtelevat mitättömän pienistä huomattavan suuriin.

Taulukko 7. 2021 siirtokampanjassa sekä muissa työtehtävissä havaittujen hippujen mittaustuloksia.

Pvm.	Aktiivisuus (gamma) [Bq]	Nuklidiosuudet aktiivisuudesta	Kontaktiannos-nopeus [mSv/h]	Lisätieto
22.10.2021	1,62E+06	Co-60 100 %	9	2021 siirtokampanja
26.10.2021	1,05E+04	Co-60 31,3 % Cr-51 2,8 % Sb-125 65,9 %	-	2021 siirtokampanja
26.10.2021	8,50E+02	Co-60 87,1 % Sb-125 12,9 %	-	2021 siirtokampanja
26.10.2021	9,33E+03	Co-60 56,4 % Sb-125 43,6 %	0,0018	2021 siirtokampanja
26.10.2021	1,32E+03	Co-60 71,0 % Sb-125 29,0 %	0,0015	2021 siirtokampanja
26.10.2021	1,70E+03	Co-60 58,8 % Sb-125 41,2 %	0,001	2021 siirtokampanja
9.11.2021	1,54E+03	Co-60 36,5 % Mn-54 0,5 % Sb-125 63,0 %	-	2021 siirtokampanja
18.11.2021	7,72E+03	Co-60 98,4 % Mn-54 1,6 %	-	2021 siirtokampanja
23.11.2021	5,91E+01	Co-60 73,8 % Sb-125 26,2 %	-	2021 siirtokampanja
20.12.2021	2,67E+05	-	0,12	Työntekijän suojalaseissa
14.5.2022	2,54E+05	-	0,2	Työntekijän ohimolla
21.6.2022	1,37E+05	-	0,35	Lisäkenkärajalla

Hipuista johtuva säteilyaltistus on yleensä häviävän pieni. Pienten hippujen säteily heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Esimerkiksi edellisen taulukon 20.12.2021 löytyneestä hipusta mitattu kontaktiannosnopeus oli 120 µSv/h, mutta noin senttimetrin päässä annosnopeus oli enää 51 µSv/h. Vasta iholle tai kehon sisälle päästessään voivat hiput aiheuttaa merkittäviä säteilyannoksia. Iholle tai kehon sisälle päästessään hiput voivat aiheuttaa kuitenkin huomattavia paikallisia säteilyannoksia. Esimerkiksi 500 kBq beeta-aktiivinen Co-60 hippu aiheuttaisi iholla noin tunnissa vuotuisen ihoannosrajan ylityksen (Arvela et al. 2003, 340–341).

Yksi teoria sille, miksi radioaktiivisia hippuja ei kovin helposti saada pestyä pyyhkimällä ja mitattua pyyhintänäytteillä on, että hippujen sähkövarauksen luoma sähkökenttä ja pyyhkäisynäytelapun tribosähköisen ilmiön eli kansankielellä hankaussähkön luoma sähkökenttä tekisivät hipuista erittäin herkkäliikkeisiä ja vaikeasti napattavia. Tribosähköisessä ilmiössä sähköeristeeseen syntyy sähkövaraus, kun se kontaktissa toisen

materiaalin kanssa luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja. Tästä johtuen toinen materiaaleista varautuu positiivisesti ja toinen negatiivisesti. Tribosähköinen sarja järjestää materiaaleja perustuen niiden varautumiskykyyn. (Piontech & Wypych 2007, 4–5) Varautumiskykyä kuvataan suureella varausaffiniteetti [C/J], joka kuvaa siirtyvän varauksen määrän energiaa kohden. Mitä korkeammalla materiaali on sarjan alkupäässä, eli mitä suurempi positiivinen varausaffiniteetti, sitä helpommin se luovuttaa elektroneja kosketuksessa. Vastaavasti mitä alempana sarjassa, eli mitä suurempi negatiivinen arvo, sitä voimakkaammin materiaali kaappaa elektroneja toiselta materiaalilta. Mitä kauempana materiaalit ovat toisistaan sarjassa, sitä voimakkaampaa molempien varautuminen on. Tehokkailla elektroninkaappaajilla, kuten polyuretaanivaahdolla varausaffiniteetin arvo on 60 nC/J ja voimakkailla luovuttajilla, kuten teflonilla affiniteetti on -190 nC/J. (Lee & Orr 2018)

Pyyhintänäytelaput koostuvat puuvillasta valmistetusta näytetyynystä ja silikonipäällystetystä tukipaperista. Pyyhintänäytteitä otettaessa näytteenottajalla on käsissään nitriilikumikäsineet. Siirtosäiliön ja kuljetusalustan pinnat on maalattu epoksipohjaisella maalilla. Tribosähköisen sarjan (Lee & Orr 2018) mukaiset varausaffiniteetit pyyhintänäytteen oton yhteydessä oleville materiaaleille ovat listattuna taulukkoon 8. Arvoista voidaan päätellä, että pyyhkäisynäytelappuun syntyy positiivinen, joskin verrattain heikko sähkövaraus.

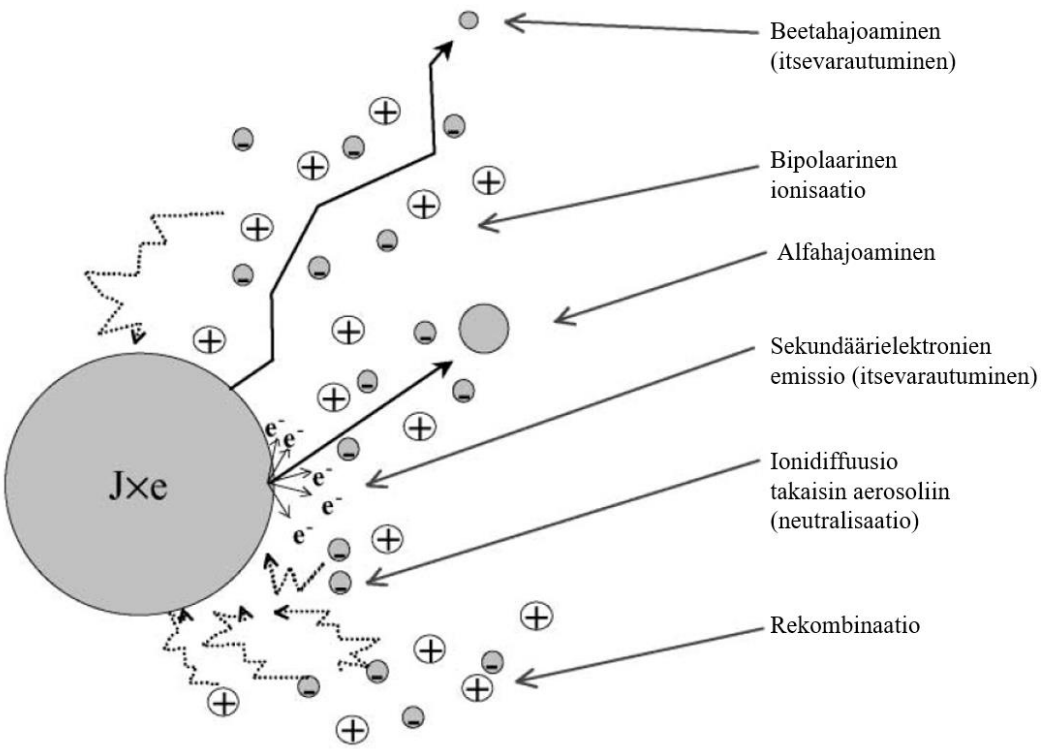
Taulukko 8. Pyyhkäisynäytteen otossa käytettävien materiaalien varausaffiniteetit.

Materiaali	**Affiniteetti [nC/J]**
Paperi	10
Puuvilla	5
Nitriilikumi	3
Epoksi	-32

Radioaktiivisten aerosolien sähköisestä varautumisesta on tehty runsaasti tutkimusta. Aerosoleissa tapahtuvia itsevarautumisen prosesseja voinee soveltaa myös isommille hiukkasille, kuten radioaktiivisille hipuille. Suurimmat erot aerosolien ja hippujen välillä ovat partikkeleiden koko ja käyttäytyminen kuljetinaineessa. Hiput ovat kooltaan isompia, kuin aerosolihiukkaset, jotka ovat yleensä 50–500 nm (Skubacz & Woloszczuk 2019, 61).

Aerosolihiukkaset jäävät pienen massansa ansiosta leijumaan ilmaan. Suuremman massansa vuoksi hiput eivät juurikaan leiju ilmassa, vaan laskeutuvat nopeasti pinnoille.

Radioaktiiviset aerosolit kykenevät sähköisesti varaamaan itse itsensä. Alfa- tai beeta-aktiivisen aerosolin itsevarautumista on kuvattu kuvassa 19. Alfa- ja beetahajoamisissa vapautuu sähköisesti varautuneita hiukkasia. Beetahiukkanen on elektroni, jolla on negatiivinen sähkövaraus ja alfahiukkanen on He-4 atomin ydin, joka on voimakkaan positiivisesti varautunut. Irrotessaan emonuklidista alfahiukkanen irrottaa sähkövarauksensa myötä myös useita sekundäärielektroneja. Molemmilla hajoamisreaktioilla jäljelle jäävän tytärnuklidin sähkövaraus jää siis positiiviseksi. (Boulaud et al. 2001, 1437–1439) Aerosolien varautuminen tehostuu olosuhteissa, joissa ionien tuotto ja/tai konsentraatio on vähäistä. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi aerosolin laimentuminen ilmaan, aerosolin joutuminen suljettuun geometriaan kuten putkeen, rakoon tai suodattimeen, ja sähkökenttien läheisyys. (Clement & Harrison 1999, 377–378)



Kuva 19. Radioaktiivisen aerosolin itsevarautumisen prosesseja (mukaillen: Boulaud et al. 2001, 1439).

Olkiluodossa suoritetaan vuosittain MADAC-mittaukset, joissa mitataan ja analysoidaan reaktoripiirissä esiintyvän aktiivisen aineksen koostumus gammaspektroskoopilla. MADAC-mittausten tulosten perusteella suurin osa Olkiluodossa esiintyvän kontaminaation aktiivisuudesta ja on peräisin Co-60:stä (50–90 %) ja muista beeta-aktiivisista nuklideista, kuten Co-58:sta ja Mn-54:stä (Itälä et al. 2021, 9).

Edellä kuvatun teorian mukaan sekä radioaktiiviset hiput, että näytteenottolappu olisivat molemmat positiivisesti varattuja ja täten hylkisivät toisiaan. Tämä teoria tukee kokemuksia siitä, kuinka hippuja on vaikea havaita pyyhkäisynäyttein.

5 Kontaminaation leviämisen hallinta

Kuten jo edellä mainittiin, yhtenä säteilysuojeluorganisaation tehtävänä on estää radioaktiivisen kontaminaation leviäminen valvonta-alueen ulkopuolelle. Käytetyn polttoaineen siirroissa piilee useita riskejä kontaminaation hallintaan riippuen. Tässä kappaleessa käydään ensiksi läpi 2021 polttoaineen siirroissa tapahtunut kontaminaation leviäminen ja sen syyt. Seuraavaksi kuvaillaan 2021 ja aikaisemmin käytetty menetelmä siirtosäiliön pesulle ja 2021 tapahtuman seurauksena tehdyt korjaustoimenpiteet. Tämän jälkeen esitellään ehdotuksia lisätoimenpiteille, joilla pystytään edelleen parantamaan kontaminaation hallintaa siirtojen yhteydessä sekä esitetään malli seuraavien siirtojen aikaiseksi mittauskampanjaksi, jolla kyetään todentamaan ja arvioimaan toimenpiteiden tehokkuus. Lopuksi käydään läpi käyttökokemuksia Loviisan voimalaitokselta käytetyn polttoaineen siirtoihin liittyen ja pohditaan, miten tässä työssä käsiteltyjä parannusehdotuksia voidaan ottaa käyttöön OL3:lle ja Posivalle.

5.1 2021 kontaminaation leviäminen

2021 OL1-laitoksen ja KPA-varaston välisissä käytetyn polttoaineen siirroissa kontaminaatiota pääsi leviämään valvonta-alueen ulkopuolelle radioaktiivisten hippujen muodossa. Tämä on ensimmäinen kerta Olkiluodossa, kun polttoaineen siirtojen seurauksena aktiivisuutta mitattiin valvonta-alueen ulkopuolella. Välittömästi havaitsemisen jälkeen työt keskeytettiin kattavampia mittauksia ja toimenpiteitä varten. Tapahtumasta ei aiheutunut ylimääräistä säteilyannosta henkilöstölle.

Tapahtumaan johtaneet syyt ovat moninaiset. Suurimpana tekijänä oli siirtosäiliön sisäkorin vaihto. Käyttöjaksojen aikana polttoaine-elementteihin ja säätösauvoihin kumuloitunut aktiivinen irtoaines kulkeutuu polttoaineen tai säätösauvojen mukana siirtosäiliöön ja säiliön sisäkoriin. 2015 tehdyn siirtosäiliön sisäpuolisen tarkistuksen yhteydessä irtoainesta arvioitiin olevan noin 2 dl. Oletuksena on, että irtoaineksen määrä on jotakuinkin sama vuodesta riippumatta. Sisäkoria vaihdettaessa irtoaines pöllyää allasveteen ja etenkin sisäkoria nostettaessa korista valuvan veden mukana kulkeutuva irtoaines varisee suoraan

alla olevan siirtosäiliön päälle. Sisäkorin vaihdon yhteydessä sekä sisäkoria, että säiliön sisustaa puhdistettiin irtoaineksesta vedenalaisimurilla. Imuroinnista huolimatta allasveteen jäi leijumaan runsas määrä pientä aktiivista irtoainesta, joka kontaminoi siirtosäiliötä. (Seikola 2022) Tämän lisäksi aiempina vuosina havaitut pienet polttoainevuodot ovat omalta osaltaan lisänneet sekä polttoainenippujen, että altaiden kontaminaatiota.

Lastauksen jälkeen säiliötä mitattaessa ja pestäessä havaittiin sen olevan tavallista kontaminoituneempi ja siivoukseen käytettiin normaalia enemmän aikaa. Kun säiliötä ei saatu kokonaan pestyä useista pesukerroista huolimatta, kasautuvat aikataulupaineet johtivat päätökseen suojata kontaminoituneet alueet muovilla ja siirtää säiliö. Kontaminoituneiden komponenttien suojaaminen muovilla siirtojen ajaksi on yleinen käytäntö Olkiluodossa. Siirtosäiliölle on kuitenkin turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE) määritelty raja-arvot pintakontaminaatiolle: alfa-aktiivisuudelle 3,7 kBq/m² = 0,37 Bq/cm² ja beeta- ja gamma-aktiivisuudelle 37 kBq/m² = 3,7 Bq/cm². Annosnopeusrajat siirroille ovat 1 mSv/h säiliön pinnasta ja 0,1 mSv/h kahden metrin etäisyydellä. Mikäli nämä rajat ylittyvät, ei siirtosäiliötä saa siirtää valvonta-alueen ulkopuolelle. Siirtosäiliötä siirrettäessä rikottiin siis TTKE-vaatimuksia pintakontaminaation osalta. (Lehti 2022, 14)

Siirtosäiliön ulkopinnat olivat kuluneet, kuten voidaan nähdä kuvasta 20. Rosterinen kansi ja pohjan alumiinirengas olivat naarmuilla ja säiliön maalipinta oli kulunut ja sitä on vuosien varrella paikkamaalattu useaan otteeseen. Maalipinnan alla on valurautaa, joka ruostuu helposti. Lisäksi tiivistyksistä huolimatta vesi oli pääsyt säiliön nostokorvien upotuksiin ja aiheuttanut ruostetta. Kontaminaatio tarttuu helpommin epätasaiseen ja kuluneeseen pintaan ja on vaikeammin pestävissä. Pullosta irtoava ruoste lisää altaiden likaisuutta.

(a) (b)

Kuva 20. OL1/OL2 siirtosäiliön pohjan pintavaurioita (a) ja nostokorvan upotuksessa olevia ruostumia (b).

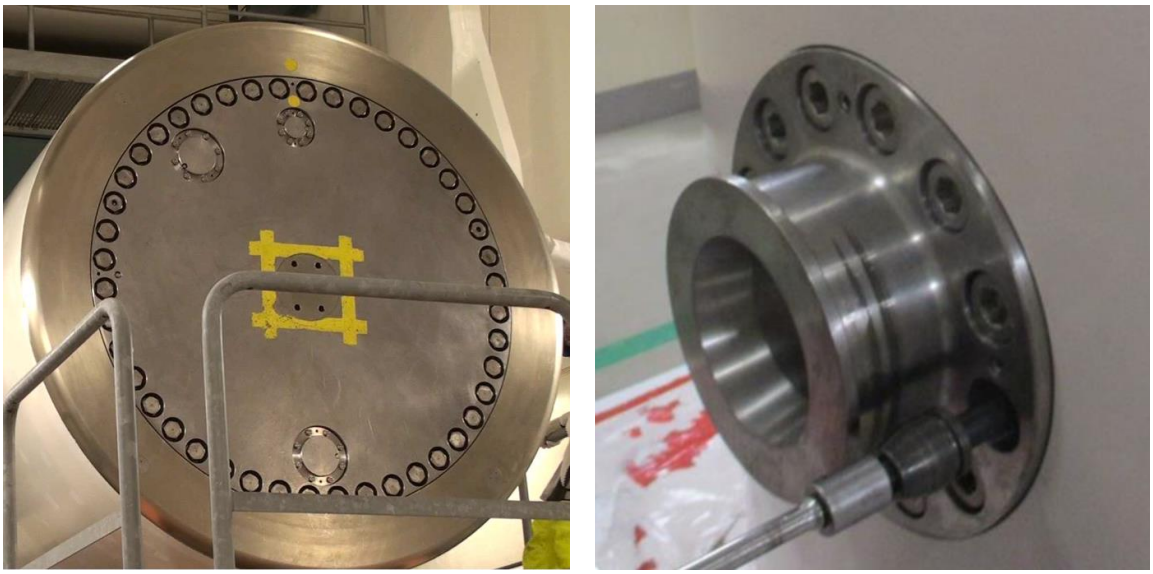
Siirtosäiliön nostaminen yli 10 cm korkeudelle lattiatasosta on kielletty turvallisuussyistä. Tämän rajoituksen takia säiliön pohjaa ei voi pestä KPA-varastohallissa eikä laitosten reaktorihalleissa, vaan pohjan pesu suoritetaan, kun säiliö on saatu laskettua kuljetusalustalleen kyljelleen. Noston aikana pohjasta voi varista hippuja käytävälle ja kuljetusalustalle. 2021 hippujen havaitsemisen jälkeen siirtosäiliön pohja suojattiin muovilla ennen nostoja hippujen varisemisen ehkäisemiseksi.

Yhtenä tekijänä on edellä mainitut mittaustekniikat ja niiden heikkoudet. Koska siirtosäiliö mitataan epäsuorasti pyyhkäisynäytteillä, ei koko pinta-alaa voida mitata.

5.2 Käytäntö ennen 2021 siirtoja

Siirtosäiliö pestään aina altaasta noston jälkeen. Säiliön vaippa ja kansi voidaan pestä reaktori- ja KPA-halleissa. Pohjan pesu suoritetaan henkilöturvallisuussyistä vasta kuljetuskäytävällä, kun säiliö on nostettu kuljetusalustan päälle kyljelleen. Säiliölle on myös olemassa KPA-varastolla erillinen pesuallas, jossa säiliötä voidaan pestä vesi- ja pesuainesuhkutuksella. Pesuallasta ei ole kuitenkaan käytetty moneen kymmeneen vuoteen pesutarkoituksessa, sillä sen pesutulos ei ole ollut tyydyttävä. KPA-varastolla pestävä säiliö on tyhjä polttoaineesta, jolloin säiliön pesusta ei aiheudu säteilyaltistusta pesijöille.

Säiliön pesemiseen käytetään vettä, industol-liuotinainetta ja kangasrättejä. Pesu suoritetaan kokonaan käsin. Kuten kuvasta 21 voidaan nähdä, kannen läpiviennit ja pultinreiät sekä nostokorvat luovat vaikeasti luokse päästäviä rakoja, joihin kontaminaatio voi helposti jäädä loukkoon. Näiden pesemiseen kuluukin suurin aika. Kokonaisuudessaan säiliön pesemiseen kertaalleen kuluu noin tunti. Kontaminaatiomittausten perusteella suoritetaan tarvittaessa lisäpesuja, jotka luonnollisesti lisäävät pesemiseen käytettävää aikaa. Pesujen ajaksi siirtosäiliön ympärille asennetaan työskentelyteline, jonka avulla korkea säiliö päästään pesemään kauttaaltaan. Työskentelyteline ja käsin suoritettava rättipesu tarkoittavat, että pesijän etäisyys säiliöstä työtä suoritettaessa on puolen metrin luokkaa. Etäisyyden kasvattaminen säteilylähteeseen vähentäisi siivoojien saamaa säteilyaltistusta, mutta nykyisillä menetelmillä tämä on lähes mahdotonta.



(a) (b)

Kuva 21. OL1/2 siirtosäiliön kansi (a) ja nostokorva (b).

5.3 2021 tapahtuman pohjalta tehdyt korjaavat toimenpiteet

OL1/OL2 siirtosäiliö on hiekkapuhallettu ja maalattu ulkopinnoiltaan syksyn 2022 ja talven 2023 aikana. Ehjä ja sileä pinta ehkäisee kontaminaation tarttumista siirtosäiliöön ja helpottaa siivoustöitä. Nostokorvien upotukset tiivistetään silikonitiivisteellä pinnoituksen yhteydessä. Vuosikymmenien aikana pullon maalipintaan oli pinttynyt matala-aktiivisia radioaktiivisia hippuja, joita ei ollut saatu irrotettua pinnasta ilman mekaanista työstöä.

Nämä poistettiin käsin hiomalla ennen hiekkapuhallusta. Siirtosäiliön kuljetusalusta puhallettiin ja maalattiin aikaisemmin kesällä 2022.

Säiliön pohja on päätetty suojata muovilla kuljetusalustalle noston ajaksi. Muovi estää tehokkaasti kontaminaation varisemisen alas kuljetuskäytävälle. Noston jälkeen muovitus poistetaan ja pohja pestään normaalisti.

Tuleviin käytetyn polttoaineen siirtojen käyttömääräimiin lisätään TTKE-vaatimukset myös säteilysuojelun osalta. Lisäksi on aloitettu selvitys TTKE-muutostarpeista siirtosäiliön siirtämiselle osittain muovitettuna. Töiden aikataulutukseen ja tehtävien vastuisiin tullaan kiinnittämään enemmän huomiota. Lisäksi TVO:n säteilysuojeluorganisaatiolle tullaan hankkimaan erillinen kontaminaatiomittalaite ulkoalueita varten. (Nordlund 2022, 25)

5.4 Esitettävät lisätoimenpiteet

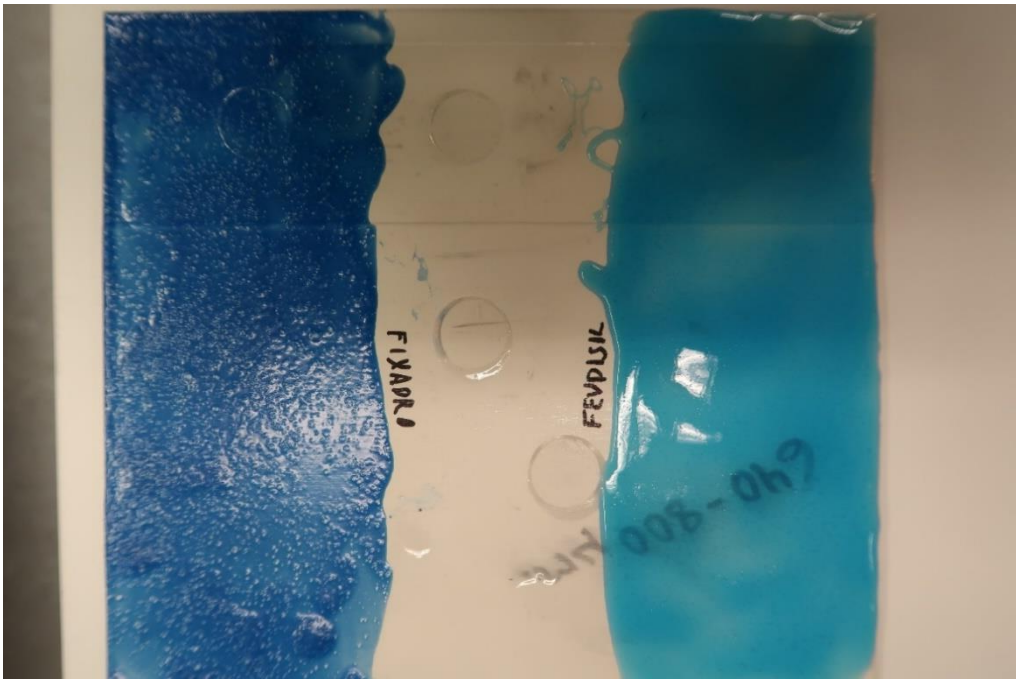
Siirtosäiliön uudelleenpinnoituksen lisäksi testattiin antistaattisten mikrokuituliinojen tehokkuutta kaappaamaan varauksellisia hiukkasia siirtosäiliön pinnalta. Nimensä mukaisesti antistaattinen liina ei varaudu sähköisesti ja täten sen pitäisi olla tehokas keräämään itseensä varautuneita partikkeleita.

Yhtenä lisätoimenpiteenä oli tehostaa kontaminaation mittaamista siirtosäiliöstä ja kuljetusyhdistelmästä. Tarkoituksena oli hankkia vuoden 2023 siirtoihin testiin Nuviatech Instruments:n valmistama NuCoMo-100 kannettava pintakontaminaatiomittari. Tämän mittarin tulisi kyetä havaitsemaan 100 µSv/h taustasäteilykentässä 4 Bq/cm² Co-60:a. Mittari olisi siis erittäin tehokas työkalu kontaminaation etsinnässä polttoaineella lastatun siirtosäiliön pinnoilta. (Vuorenmaa 2022)

Pohdinnassa oli myös ranskalaisen FEVDI:n valmistamat säiliön pinnoille levitettävät kontaminaatiosuojageelit, jotka kuivuessaan luovat vedenpitävän suojakerroksen.

Kontaminaatio tarttuisi suojattavan pinnan sijaan geeliin ja kuivunut geeli olisi helppo poistaa käsin repimällä, mikä helpottaisi siivoustyötä huomattavasti ja vähentäisi siivoojien saamaa säteilyannosta. Olkiluodon siirtosäiliöistä voitaisiin suojata ainakin vaikeimmin pestävät kohteet, kuten nostokorvien pultit. Geeli tulisi poistaa aina jokaisen altaaseen laskun jälkeen pihakuljetuksia varten. Geelin tulee olla laitoksen vesikemialle sopiva sekä siitä ei saa aiheutua irto-osariskejä. Geeliä ei siis tulisi levittää mekaanisen rasituksen alaisille pinnoille, kuten pohjaan ja nostokorviin. Lisäksi vastaavasta tuotteesta on käyttökokemuksia, missä geeli on aiheuttanut maalipinnan kuplintaa. Arvioinnit tällaisten tuotteiden soveltuvuudesta Olkiluotoon olivat kuitenkin vasta käynnissä. (Seikola 2022)

Tämän työ yhteydessä hankittiin testiin kuvassa 22 esitetyt FIXAPRO P03 ja FEVDISIL PB geelit. Näistä FEVDISIL PB osoittautui alustavien testien perusteella sopivammaksi, joskin kalliimmaksi vaihtoehdoksi. FIXAPRO P03 sisälsi runsaasti ilmakuplia, jotka aiheuttivat kuivuessaan reikiä kalvoon. Lisäksi FIXAPRO P03 oli huomattavasti vaikeampi irrottaa pinnasta ja ilmakuplien takia repeili helposti irrotettaessa. FEVDISIL PB:n kuivumisaika oli myös huomattavasti lyhyempi, kuin FIXAPRO P03:n.

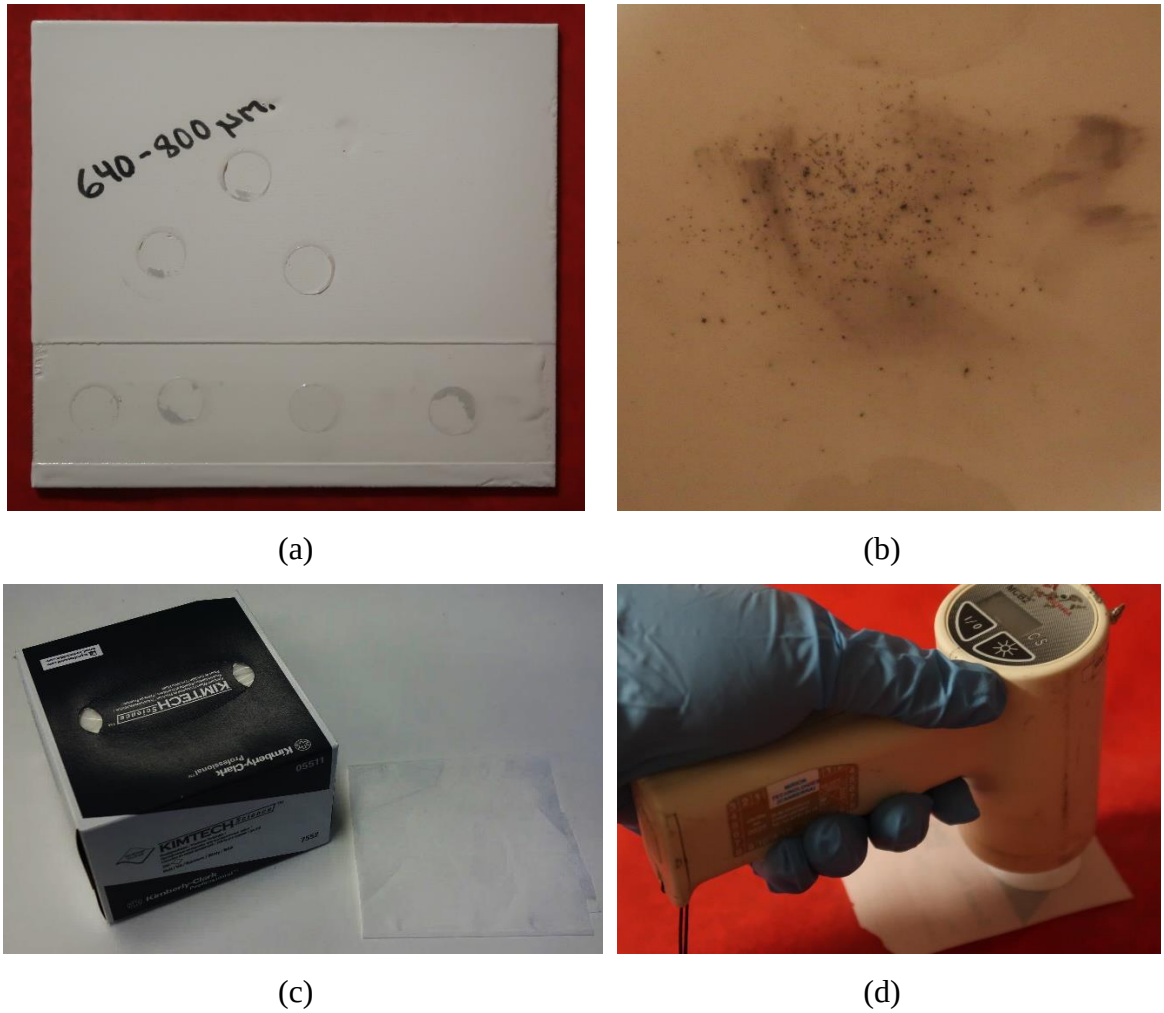


Kuva 22. FIXAPRO P03 ja FEVDISIL PB kontaminaatiosuojageelit kuivumisajan jälkeen. Geelit ovat levitettynä OL1/OL2 siirtosäiliön pintaa vastaavalle testilevylle.

Tulevia siirtoja varten tuli pohtia KPA-varastolla olevan pesualtaan käyttöä. Siirtosäiliön puhdistuksessa pesualtaasta ei ole suurta hyötyä, mutta pesualtaassa voisi pestä esimerkiksi säiliön sisäkoreja silloin, kun ne eivät ole käytössä. Tämä vähentäisi irtoaineksen määrää allasvedessä, mikä vaikuttaisi suoraan säiliön ulkopintojen kontaminoitumiseen. Pesualtaan käytön lisäksi lastausaltaaseen tulee pohtia allasveden suodatuslaitteistoa sisäkorien vaihdon yhteyteen. Tukikoria vaihdettaessa altaan veden pinta on niin alhaalla, ettei altaan normaali puhdistusjärjestelmä kykene kierrättämään ja suodattamaan altaan vettä.

5.4.1 Radioaktiivisten hippujen saannon tutkiminen

Tämän työn yhteydessä tutkittiin tribosähköisen ilmiön vaikutusta kuivan ja hippumaisen radioaktiivisen kontaminaation tarttumiseen pyyhintänäytelappuun. Testissä vertailtiin kontaminaation tarttumista kolmeen eri materiaaliin: pyyhintänäytelappuun, antistaattiseen pyyhintäliinaan ja puuvillakankaaseen. Mittauksissa pyrittiin simuloimaan polttoaineen siirtokampanjan aikaisia olosuhteita. Pyyhittävä alusta oli OL1/OL2 siirtosäiliön uudelleenpinnoituksia varten tehty testipala, joka oli valurautalevy pinnoitettuna samalla maalilla, kuin itse siirtosäiliökin. Testipalassa oli maalipinnan vetotestien jättämiä jälkiä, mutta myös tarpeeksi koskematonta tasaista maalipintaa kontaminaatiotestien suorittamiseksi. Testipala on esitetty kuvassa 23a. Testeissä käytetty antistaattinen liina oli kuvassa 23c esitetty Kimtechin valmistama paperinen liina, jota käytetään esimerkiksi valokuvauksessa linssien puhdistukseen. Mittarina käytettiin kuvassa 23d esitettyä Canberran MCB2 -mittaria, joka kykenee havaitsemaan sekä alfa-, beeta- että gammasäteilijä ja jonka detektorin mittauspinta-ala on 15,5 cm^2 (Mirion Technologies 2017, 1). Kaikki näytteet ja kontaminoidut alat olivat alle detektorin pinta-alan, jotta mittaustarkkuus ei heikkenisi.



Kuva 23. Testeissä käytetty testilevy (a), levylle levitettyä kontaminaatiota (b), Kimtechin antistaattinen puhdistusliina (c) ja MCB2-pintakontaminaatiomittari (d).

Testeissä levyn pinnalle levitettiin hippumaista kontaminaatiota kuvan 23b mukaisesti. Kontaminaation tarttumista kuhunkin materiaaliin testattiin pyyhkimällä kontaminoidun kohdan yli kerran pyyhintänäytelapun puuvillatyynyn kokoisella palasella. Jotta näytelappuun syntyisi hankauksesta johtuva sähkövaraus, pyyhittävän alueen pituus oli noin 15 cm ja kontaminaatio oli alueen loppupäässä. Testipalassa oleva aktiivisuus mitattiin kannettavalla pintakontaminaatiomittarilla ennen pyyhintää ja pyyhinnän jälkeen, sekä pyyhintänäytteeseen tarttunut aktiivisuus pyyhinnän jälkeen. Mittaustuloksista laskettiin kullekin materiaalille saantoprosenttien keskiarvot, jotka ovat esitetty taulukossa 9. Mittausten mittauspöytäkirjat ovat esitetty liitteessä 1.

Taulukko 9. Mittausten perusteella lasketut keskiarvosaantoprosentit.

Pyyhintänäytelappu	Antistaattinen liina	Puuvillaliina
67 %	59 %	72 %

Näiden tulosten perusteella ei voida varmuudella todistaa tribosähköisen ilmiön vaikutusta kontaminaation tai hippujen tarttumiseen pyyhintänäytteeseen. Pyyhintänäytelappujen puuvillatyyny on rakenteeltaan riittävän huokoinen kaappaamaan kuivaa ja irtonaista kontaminaatiota ja sulkemaan sen sisäänsä. Käytetyt antistaattiset liinat olivat paperimaisia ja rakenteeltaan paljon tiiviimpiä, jolloin kontaminaatio ei tarttunut näytelapun rakenteeseen yhtä tehokkaasti. Pyyhkäisynäytelapun ja antistaattisen liinan saantojen välinen ero ei kuitenkaan ole suuri, mikä viittaisi tribosähköisen ilmiön vaikutukseen. Tilannetta, jossa pyritään kaappaamaan yksittäisiä radioaktiivisia hippuja pinnalta, on vaikea simuloida todenmukaisesti ja hallitusti. Testeissä käytetty kontaminaatio oli matala-aktiivista aiemmin siirroissa havaittuihin hippuihin verrattuna. Testeissä suurin mitattu aktiivisuus oli 167 cps MCB2:lla mitattuna. Taulukossa 7 esitettyjen aktiivisimpien hippujen tapauksissa vastaavat mitatut lukemat olisivat useita tuhansia. Aktiivisemmat hiput luovat itselleen voimakkaamman sähkökentän, jolloin myös samanmerkkisten varauksien välinen hylkivä vuorovaikutus on suurempi. Vuoden 2023 käytetyn polttoaineen siirroissa tullaan tekemään lisää testejä antistaattisten liinojen käytöstä.

5.4.2 Mittauskampanja tuleville käytetyn polttoaineen siirroille

Jo tehtyjen ja testattavien parannusten tehokkuuden testaamiseksi siirtojen aikaisille mittauksille ehdotettiin seuraavaa mittauskampanjaa:

1. Säiliön nosto altaasta
2. Pyyhkäisynäytteet
3. NuCoMo-100 -testi
4. Säiliön pesu
5. Pyyhkäisynäytteet
6. NuCoMo-100 -mittaus
7. Antistaattisilla liinoilla pyyhintä ja liinojen mittaus

Siirtosäiliön lastauksen jälkeen säiliö nostetaan altaasta normaaliin tapaan pesupaikalleen reaktorihalliin. Ennen pesua otetaan pyyhkäisynäytteet, joilla voidaan todeta pinnoituksen vaikutus kontaminaation tarttumiseen. Pyyhkäisynäytteiden lisäksi testataan NuCoMo-mittarin toiminta säiliön korkeassa taustasäteilyssä. Säiliö pestään normaalisti rättipesuna ja todetaan pyyhkäisynäyttein puhtaaksi. Seuraavaksi säiliö mitataan kauttaaltaan NuCoMo-100 mittarilla hippujen havaitsemiseksi. Tämän jälkeen säiliö käydään läpi antistaattisilla liinoilla ja pyritään kaappaamaan havaitut hiput. Liinat mitataan pintakontaminaatiomittareilla ja tarvittaessa liinat voidaan lähettää laboratorioon tarkempaa analyysiä varten. Samaa kampanjaa sovellettaisiin kuljetuskäytävällä tehtäviin pesuihin ja mittauksiin.

5.5 Käyttökokemuksia Loviisasta

Loviisan ydinvoimalaitoksella valvonta-alueen ulkopuolelta kuljetettavan käytetyn polttoaineen siirtoprosessi vastaa suurin piirtein OL1/OL2 siirtoprosessia. Suurin poikkeus on Loviisassa reaktorihalleissa olevat pesukaivot, joissa siirtosäiliötä pestään koneellisesti käsinpesun sijaan. Vaikeasti pestävät kohdat pestään myös käsin. Hippujen ehkäisemiseksi Loviisaan on hankittu siirtosäiliön ulkokuljetuksia varten kankainen suojahuppu, joka asetetaan säiliön päälle ennen valvonta-alueen ulkopuolelle vientiä. Vaikka siirtoja ei tuulisella tai sateisella säällä tehdäkään, tarjoaa huppu suojaa myös sääolosuhteilta. Hupulle tehdään tutkimusta sen vaikutuksesta säiliön lämmönsiirtoon ennen, kuin sitä voidaan käyttää polttoaineen siirtoihin. Loviisan siirtosäiliö on hiekkapuhallettu ja pinnoitettu uudestaan 2021. Pinnoituksella on havaittu selkeä helpottava vaikutus säiliön pesemiseen. (Kontio 2022)

5.6 Olkiluoto 3:n ja Posivan tulevat käytännöt

Olkiluoto 3 laitoksella ja Posivan kapselointilaitoksella voidaan hyödyntää tässä työssä esitettyjä keinoja siirtosäiliön kontaminaation hallintaan soveltaen. Sekä OL3:lla että Posivalla siirtosäiliön käsittelyprosessit vastaavat toisiaan. Säiliötä ei upoteta altaisiin, vaan telakoidaan joko altaan tai käsittelykammion pohjaan, jolloin säiliön ulkopinta ei ole missään vaiheessa kosketuksissa radioaktiivisen kontaminaation kanssa.

Mikäli antistaattiset liinat todetaan toimivaksi metodiksi kerätä hippuja, voidaan ne helposti ottaa käyttöön sekä OL3:lla että Posivalla. Kontaminaatiosuojageelit soveltuvat pelkästään OL3 siirtosäiliön osalta, kun säiliö lasketaan KPA-varastolla altaaseen. Tällöin siirtosäiliön ripaosuuden ympärille asennettava suojakuori voidaan päällystää vielä geelillä, jolloin geeli toimii myös tiivistysaineena suojakuoren saumoille.

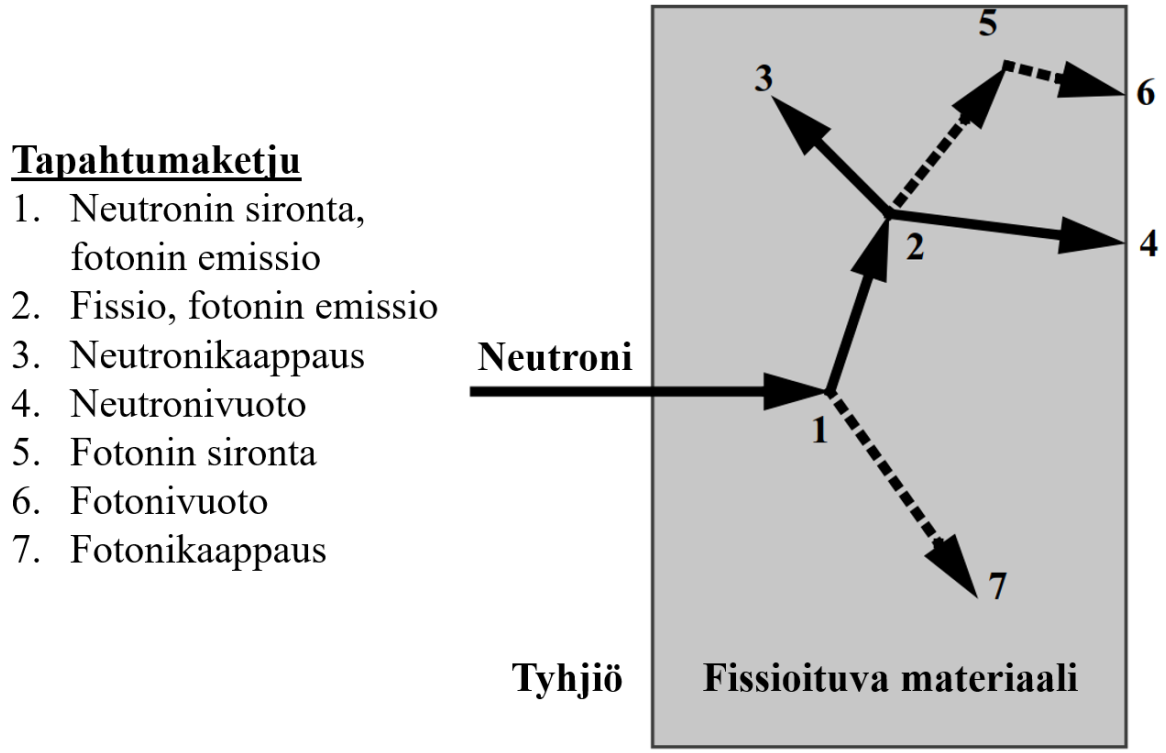
6 OL3 telakointiaseman MCNP mallinnus

TVO:n säteilysuojeluorganisaatio on havainnut mahdollisia puutteita OL3 siirtosäiliön telakointiaseman säteilysuojauksessa. Polttoainelastauksen aikana lastaushalliin ja hallin viereiselle kulkukäytävälle voi sirota säteilyä läpiviennin rakenteiden läpi. Tässä kappaleessa kuvataan mallinnusprosessia, jonka avulla pyritään arvioimaan tilannetta lastauksen aikana lastaushallissa. Aluksi selvennetään laskennassa käytetyt metodit ja laskentaohjelmat, jonka jälkeen kuvataan itse mallinnusprosessi ja lopuksi käydään läpi saadut tulokset.

6.1 Monte Carlo mallinnus

1940-luvulla kehitetty laskentamenetelmä, Monte Carlo kehitettiin stokastisten prosessien mallintamiseen. Menetelmä kehitettiin ydinaseiden kehittämisestä tunnetussa Los Alamosin kansallisessa laboratoriossa mm. Stanislaw Ulamin, Enrico Fermin ja John Von Neumannin toimesta. Metodin todettiin antavan tarkkoja tuloksia vaatien kuitenkin suuren määrän prosessointikykyä laskentakoneilta. (Brown 2000, 1-4) Monte-Carlo laskenta perustuu tilastodataan ja satunnaislukuihin ja saa nimensä Monacolaisesta kasinosta. Kasinopelit, kuten säteilyhiukkasten kulkeutuminenkin pohjautuvat todennäköisyyksiin ja satunnaisuuksiin. (Reuss 2008, 413)

Monte Carlo -mallinnuksessa simuloidaan valtava määrä yksittäisiä tapahtumaketjuja eli historioita, joiden eri vaiheet määritellään tilastollisten todennäköisyyksien ja satunnaislukujen avulla. Säteilyhiukkasten kulkeutumista mallinnettaessa historioilla kuvataan hiukkasen kulkeutumista geometriassa ja vuorovaikutuksia väliaineen kanssa tilastollisten vuorovaikutustodennäköisyyksien avulla. Yksittäinen historia sisältää alkuperäisen hiukkasen radan lisäksi mahdollisten syntyvien sekundäärihiukkasten radat. Kuvassa 24 on kuvattuna esimerkkihistoria neutronille. Kun tarpeeksi suuri määrä historioita on simuloitu, saadaan luotettavaa tietoa suuremmasta kokonaisuudesta. Miljardien historioiden mallintaminen vaatii runsaasti prosessointikykyä, mutta tietokoneiden kehityttyä Monte Carlo menetelmää käytetään yhä enemmän. (Brown 2000, 19)



Kuva 24. Esimerkki satunnaisesta neutronihistoriasta fissioituvassa materiaalissa. (Mukaillen: X-5 Monte Carlo Team 2008, 1-3)

Monte Carlo metodi ratkaisee ongelmaa kuvaavan yhtälön integraalimuotoa. Säteilyn kulkeutumista simuloidessa ratkaistaan Boltzmannin kulkeutumisyhtälöä, joka on integraalimuodossaan

$$\Psi(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}) = \int \left[\int \Psi(\boldsymbol{r}',\boldsymbol{v}')C(\boldsymbol{v}' \to \boldsymbol{v},\boldsymbol{r}')d\boldsymbol{v}' + Q(\boldsymbol{r}',\boldsymbol{v}) \right] T(\boldsymbol{r}' \to \boldsymbol{r},\boldsymbol{v})d\boldsymbol{r}' \qquad (3)$$

jossa $\boldsymbol{r}$ on partikkelin paikkavektori, $\boldsymbol{v}$ on nopeusvektori, $\Psi(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v})$ on partikkelin törmäys- eli reaktiotiheys, $Q(\boldsymbol{r}',\boldsymbol{v})$ on lähdetermi, $C(\boldsymbol{v}'\to\boldsymbol{v},\boldsymbol{r}')$ on törmäystermi, joka kuvaa partikkelin nopeuden muutosta törmäys pisteessä ja $T(\boldsymbol{r}'\to\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}')$ on kulkeutumistermi, joka kuvaa partikkelin paikan muutosta vakionopeudella. '-yläindeksillä kuvataan lähtötilanteen arvoja. Yhtälön lähdetermi voidaan kirjoittaa auki

$$Q(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}) = S(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}) + \int \Psi(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}')F(\boldsymbol{v}' \to \boldsymbol{v},\boldsymbol{r})d\boldsymbol{v}' \qquad (4)$$

jossa $S(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v})$ on kiinteä säteilylähde ja $F(\boldsymbol{v}'\to\boldsymbol{v},\boldsymbol{r})$ on fissiotermi, joka kuvaa törmäyksissä syntyviä uusia neutroneita. (Brown 2000, 1-12–1-13)

Monte Carlo malli käyttää useita oletuksia ratkaistessaan Boltzmannin yhtälöä, esimerkiksi:

- staattinen, homogeeninen väliaine
- aikariippumaton
- Markov-malli, eli yksittäinen vuorovaikutus ei ole riippuvainen edellisistä vuorovaikutuksista, ainoastaan hiukkasen nykyisistä ominaisuuksista
- säteilyhiukkaset eivät ole vuorovaikutuksessa toistensa kanssa
- ei pitkän matkan vuorovaikutusvoimia kuten painovoimaa, jolloin hiukkaset liikkuvat suorassa linjassa törmäysten välillä
- väliaineen materiaaliominaisuudet eivät muutu säteilyn vaikutuksesta. (Brown 2000, 1-14)

6.2 MCNP 6.2

MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) on Los Alamosin kansallisessa laboratoriossa kehitetty kulkeutumiskoodi, jolla voidaan mallintaa jatkuvaenergisen ja aikariippuvaisen säteilyn kulkeutumista 3D-geometriassa. Koodin viimeisin versio MCNP 6.2 julkaistiin 2018. Koodia käytetään laajasti säteilymallinnuksiin useissa käyttökohteissa, kuten säteilysuojelussa ja -turvallisuudessa, reaktorifysiikassa, lääketieteessä ja radiografiassa. (LANL 2022)

MCNP 6.2 -koodia käytetään komentokehotteella, jonka kautta ajetaan input-tekstitiedostoja. Input-tiedostossa määritellään mallinnettava ongelma kokonaisuudessaan. Input-tiedosto koostuu korteista ja sen rakenne seuraa seuraavaa peruskaavaa:

- Solukortti
    - geometrian solut
- Pintakortti
    - pintojen muodot ja paikat
    - macrobodyt
- Datakortti
    - materiaalit
    - säteilylähteiden ominaisuudet
    - tallyt
    - varianssin vähennystekniikat

Mallinnettava laskentageometria rakennetaan pintakortissa määriteltyjen pintojen avulla. Pinnat rajaavat geometrian haluttuihin soluihin, jotka määritellään solukortissa. Solukortissa kullekin solulle osoitetaan tiheys ja materiaali. Laskentageometrian rakentamisessa voidaan käyttää myös ns. macrobodyja, jotka ovat valmiita sisäänrakennettuja geometrisia perusmuotoja. Näiden käytön on kuitenkin todettu aiheuttavan ongelmia ja epävakautta laskennassa, joten tasojen käyttäminen, vaikkakin hieman monimutkaisempaa ja enemmän aikaa vievää, on suositellumpi tapa.

Datakortti sisältää suurimman osan ongelman määrityksestä. Se kattaa sekä materiaalien ja säteilylähteen määritykset, että laskennan ohjaamiseen ja tiedon kirjoitukseen liittyvät komennot. Materiaalien koostumukset annetaan alkuaine- tai nuklidikohtaisina massaosuuksina. MCNP 6.2 sisältää laajat kirjastot eri nuklidien vuorovaikutuspinta-aloista. Massaosuuksien määrittämisen ohessa kullekin alkuaineelle tai nuklidille osoitetaan kirjasto, josta vuorovaikutuspinta-alatiedot haetaan. Säteilylähteille määritellään säteilyhiukkanen, kokonaisaktiivisuus ja energiajakauma sekä usean säteilylähteen ollessa kyseessä myös keskinäiset suhteelliset aktiivisuudet.

Simuloitaville partikkeleille määritetään maalialueita eli tallyja, joilla kerätään laskennan tulokset. Käytännössä geometria tai geometrian osa jaetaan pieniin säännöllisiin laskentanoodeihin. Simuloitavan historian aikana hiukkasen osuessa maalialueelle, ohjelma kirjaa käyttäjän määrittämät arvot output-tiedostoon. Tarkkojen tulosten saamiseksi laskentanoodin on osuttava riittävä määrä historioita. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa: mitä kauempana säteilylähteestä noodi on ja mitä enemmän absorboivaa ainetta on säteilylähteen ja noodin välillä, sitä heikompi tarkkuus noodiin saadaan. Tulosten graafiseen tarkasteluun vaaditaan erillinen grafiikkaohjelma, kuten tässä työssä käytetty Xming.

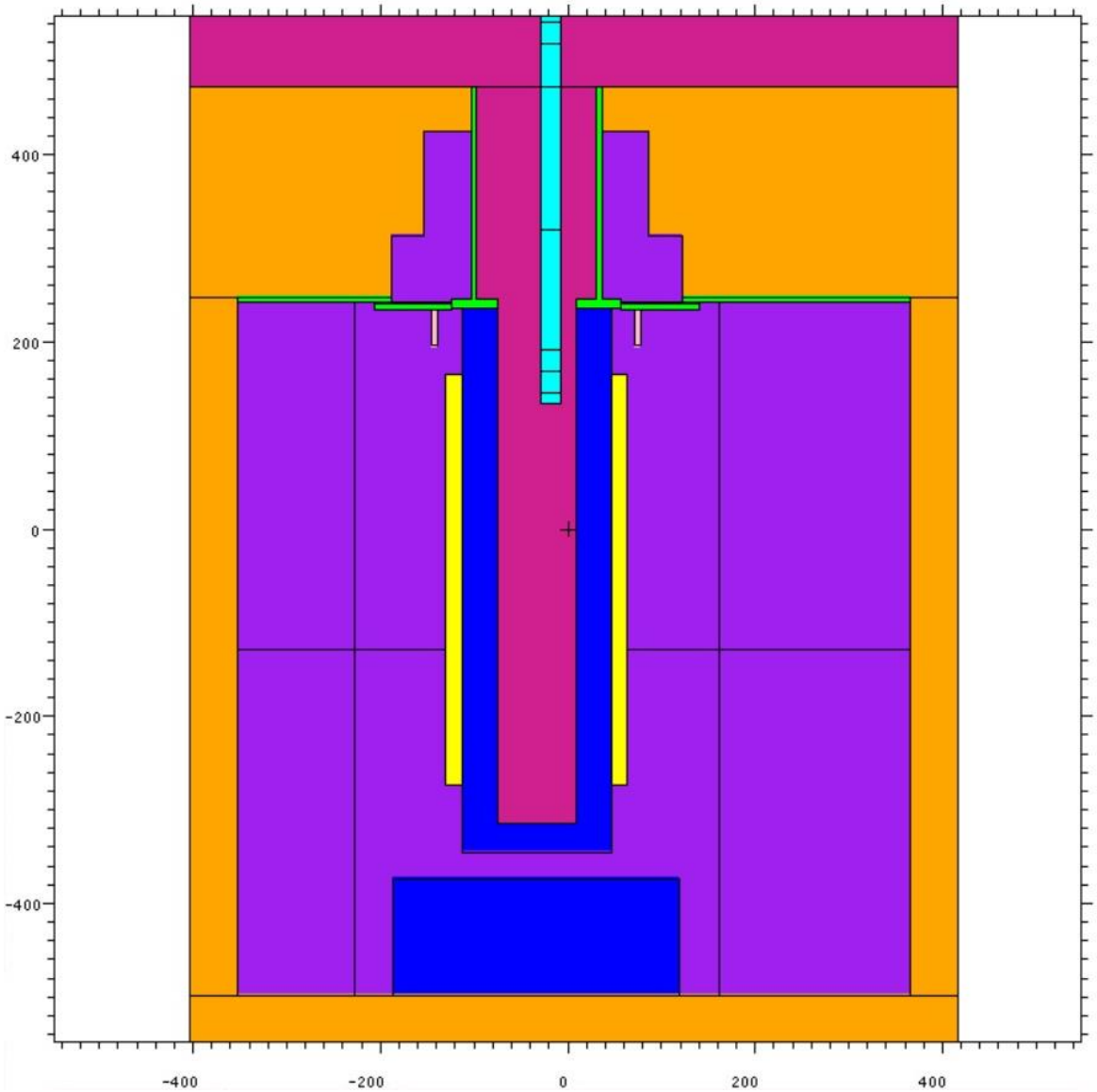
6.3 Mallinnusprosessi

Tässä kappaleessa viitataan useaan kertaan Orano NPS:n tekemiin raporttiin ja mallinnuksiin, joissa tutkittiin OL3 siirtosäiliön säteilysuojauskykyä (Paubel 2012). Jatkossa näihin viitataan Oranon raporttina. Oranon raportissa polttoaineelle oletettiin 60 MWd/kgU keskipalama, 4,55 m-% rikastusaste, 545 kg raskasmetallimassa, viiden vuoden säteilytys reaktorissa ja yhden vuoden jäähtymisaika. Käytetyn polttoaineen siirto vain yhden vuoden jäähtymisajan jälkeen on harvinaista. Todenmukaisempi jäähtymisaika on viisi vuotta. Käytännössä alle viiden vuoden jäähtymisajalla siirretään vain vioittuneita polttoainenippuja.

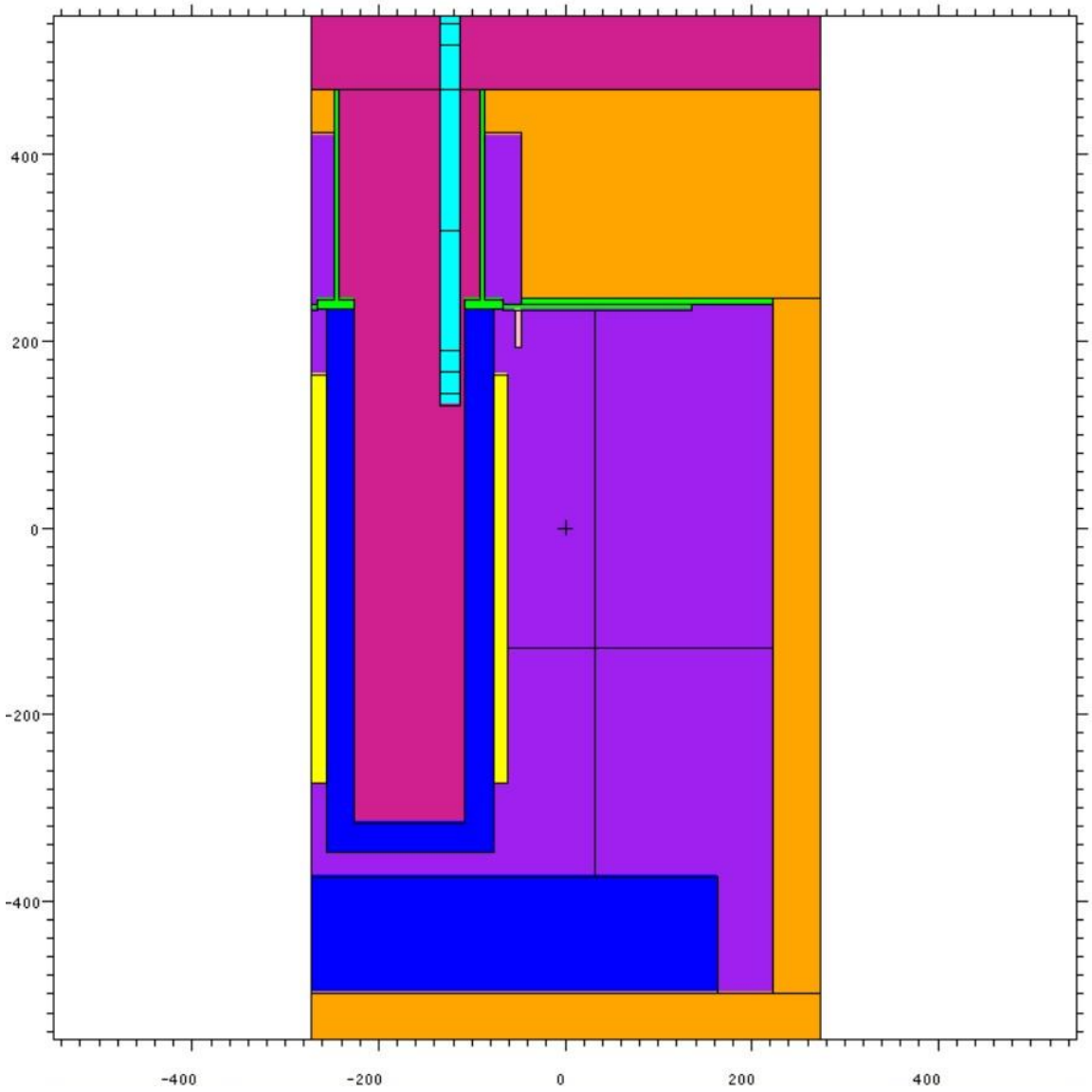
Tässä työssä valittiin mallinnettavaksi tilanne, jossa OL3 siirtosäiliö on telakoitu läpiviennin pohjaan ja on täynnä boorivettä. Polttoaine-elementtiä lasketaan tukikorin reunimmaiseen positioon ja elementin aktiivisin alue on läpiviennissä. MCNP-mallin geometria rakennettiin OL3 teknisten piirustusten pohjalta. Taulukossa 10 on mallissa käytetyt päädimensiot ja kuvissa 25–27 on esitettynä laskennassa käytetyn geometrian poikkileikkaukset kolmesta suunnasta. Kuvissa geometrian eri materiaalit ovat kuvattu eri värein: vaaleansininen on polttoaine, magenta on boorattua vettä, tummansininen on rautaa, keltainen on hartsia, vihreä on ruostumatonta terästä, oranssi on betonia, violetti on kuivaa ilmaa ja pinkki on lyijyä. Kuvissa nähdään käytännössä edellisessä kappaleessa selitetty MCNP-geometrian rakentuminen. Solut ovat rajattu mustilla viivoilla ja jokainen solu käsittää oman osansa geometriasta.

Taulukko 10. Mallinnuksen geometriassa käytetyt päädimensiot.

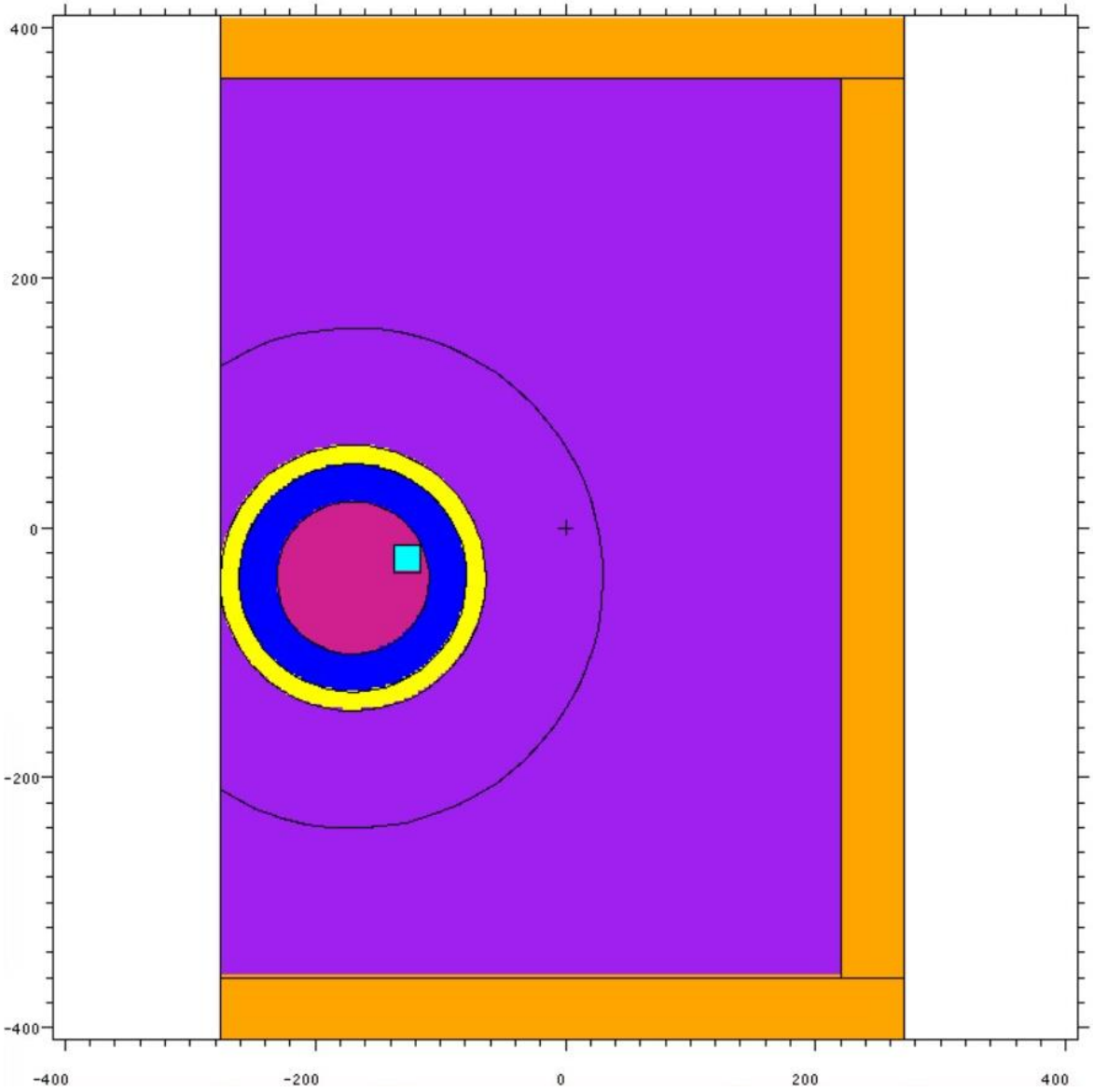
Päädimensiot	**[cm]**	**Päädimensiot**	**[cm]**
Säiliö		**Polttoaine**	
Korkeus (z)	582	Korkeus (z)	420
Sisähalkaisija	122	Leveys/syvyys (x/y)	21,4
Ulkohalkaisija	182	**Läpivienti**	
Hartsikerroksen paksuus	15,3	Korkeus (z)	235,8
Pohjan paksuus	31,8	Halkaisija	155
Lastaushalli		**Lyijysuoja**	
Korkeus (z)	740	Korkeus (z)	39
Leveys (x)	390	Sisähalkaisija	114
Syvyys (y)	719	Paksuus	6



Kuva 25. MCNP-mallin geometria positiivisen x-akselin suunnasta. Poikkileikkaus polttoainenipun keskipisteen kohdalta. Akselit ovat yksikössä cm.



Kuva 26. MCNP-mallin geometria positiivisen y-akselin suunnasta. Poikkileikkaus polttoainenipun keskipisteen kohdalta. Akselit ovat yksikössä cm.



Kuva 27. MCNP-mallin geometria positiivisen z-akselin suunnasta. Poikkileikkaus hartsisuojan yläreunan tasolta. Akselit ovat yksikössä cm.

Geometriassa käytettiin useita yksinkertaistuksia ja oletuksia:

- siirtojunan rakenteet, teliä lukuun ottamatta, jätettiin pois
- telakointiaseman rakenteita yksinkertaistettiin
- säiliön jäähdytysrivat, iskunvaimennusmateriaalit, nostokorvat säiliön ylä- ja alapäistä sekä säiliön sisäinen tukikori jätettiin pois
- polttoaineesta mallinnettiin vain aktiivinen pituus homogeenisena seoksena.

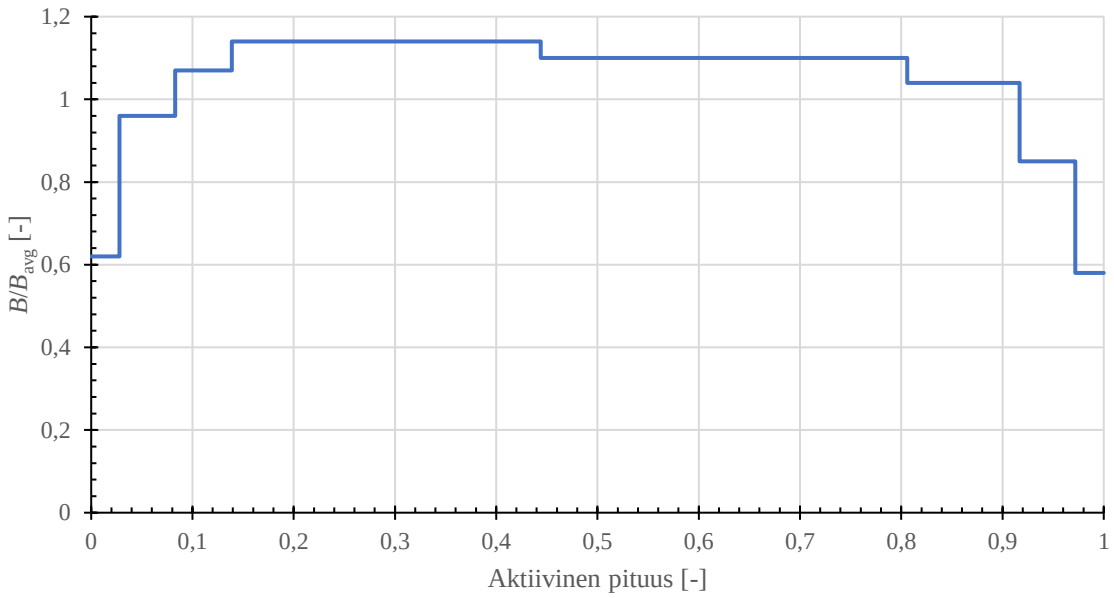
Yksinkertaistusten vaikutukset annosnopeustuloksiin olivat konservatiivisia ja oletettavasti suhteellisen vähäisiä. Esimerkiksi läpiviennin rakenteista poisjätettyjen tiivisterenkaan kaasujousten vaikutus säteilyyn on erittäin paikallista ja myös pois jätetty polttoaineen iskunvaimenninmateriaali on liian harvaa absorboimaan merkittävää määrää säteilyä. Suurin vaimentava vaikutus on luultavimmin siirtojunan teräsrakenteilla.

Mallinnuksessa käytettyjen materiaalien tiheydet ja koostumukset ovat esitetty liitteissä 2 ja 3. Koostumusten massaosuudet on esitetty isotoopeittain niiltä osin, kun niille lähteissä on eritelty isotoopit. Massaosuudet, joita ei ole eritelty isotoopin mukaan, kuvaavat luonnollisesti esiintyvää alkuainetta. Polttoainetta, betonia ja boorivettä lukuun ottamatta materiaalikoostumukset saatiin Oranon raportista. Mallinnettavaa tilannetta vastaavan polttoaineen materiaalikoostumus saatiin aikaisemmin TVO:lla tehdyistä laskelmista, joissa tutkittiin rikastusasteen vaikutusta käytetyn polttoaineen koostumukseen (Savolainen 2020). Betonille käytettiin kansainvälisessä pintakontaminaation säteilyvaikutuksen tutkimuksessa käytettyä koostumusta (Eakins 2021, 2). OL3:lla käytetään veden booraukseen rikastettua boorihappoa, jonka boori-10-osuus on 30–32 % ja lastauksen aikana on altaiden veden booripitoisuus oltava vähintään 1550 ppm (Ehrmanntraut 2017, 40). Vaikka todellisuudessa booripitoisuus olisi yli 1550 ppm, käytettiin laskennassa booripitoisuuden minimiarvoa, jotta tulokset olisivat konservatiivisia.

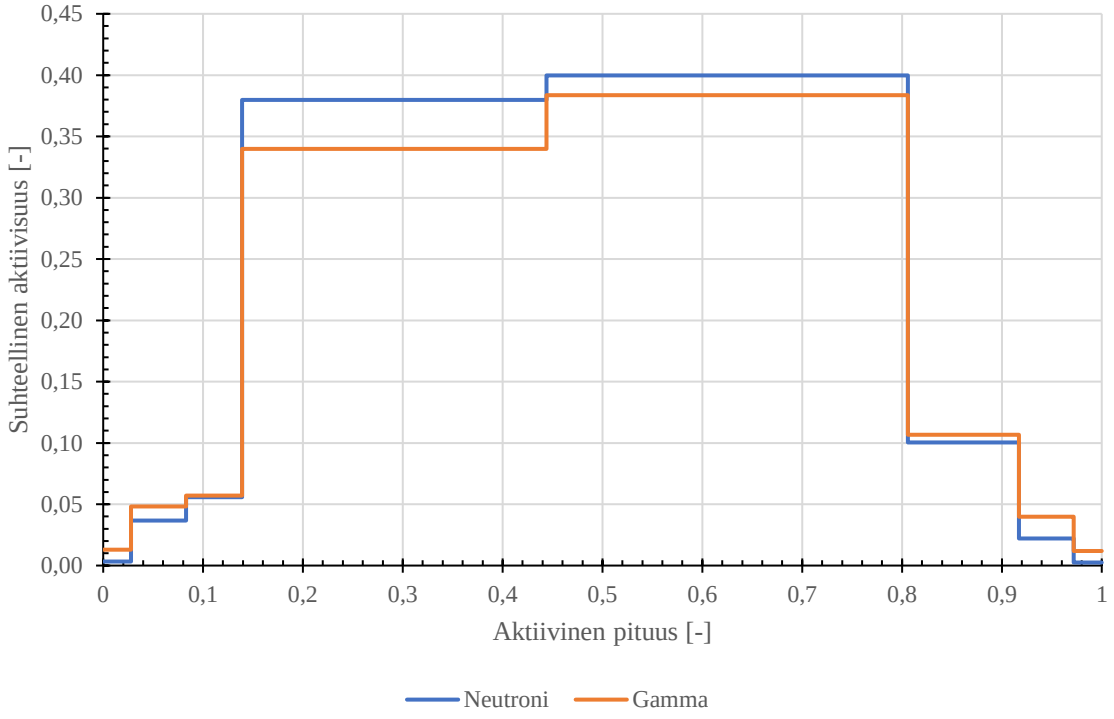
Materiaalikoostumuksissa atomien väliset sidosvoimat, kuten vesimolekyylin vedyn ja hapen väliset kovalenttiset sidokset, vaikuttavat neutronien törmäyksissä siirtyvän energian määrään. Näitä sidosvaikutuksia otettiin huomioon MCNP 6.2:n sisäänrakennetuilla vuorovaikutuspinta-alojen korjauskerroinkirjastoilla. Esimerkiksi komento fe56.22t korjaa kiinteän raudan vuorovaikutuspinta-aloihin hilan metallisidosten vaikutuksen. Tässä työssä korjauskertoimia käytettiin alumiinille, raudalle, veden vedylle, uraanioksidin hapelle sekä zirkoniumille.

Polttoaine-elementin palama on pienempi elementin päädyissä. Tästä aiheutuu heterogeeninen aksiaalinen aktiivisuusjakauma. Kuvassa 28 on Oranon mallin mukainen palamajakauma B/B_{avg}, jota hyödynnettiin myös tässä työssä. Materiaalien osalta

polttoaine mallinnettiin homogeenisena, mutta on jaettu palaman ja sitä kautta aktiivisuuden mukaisesti kahdeksaan osaan kuvien 28–29 mukaisesti. Osien aktiivisuusosuudet on esitetty kuvassa 29.



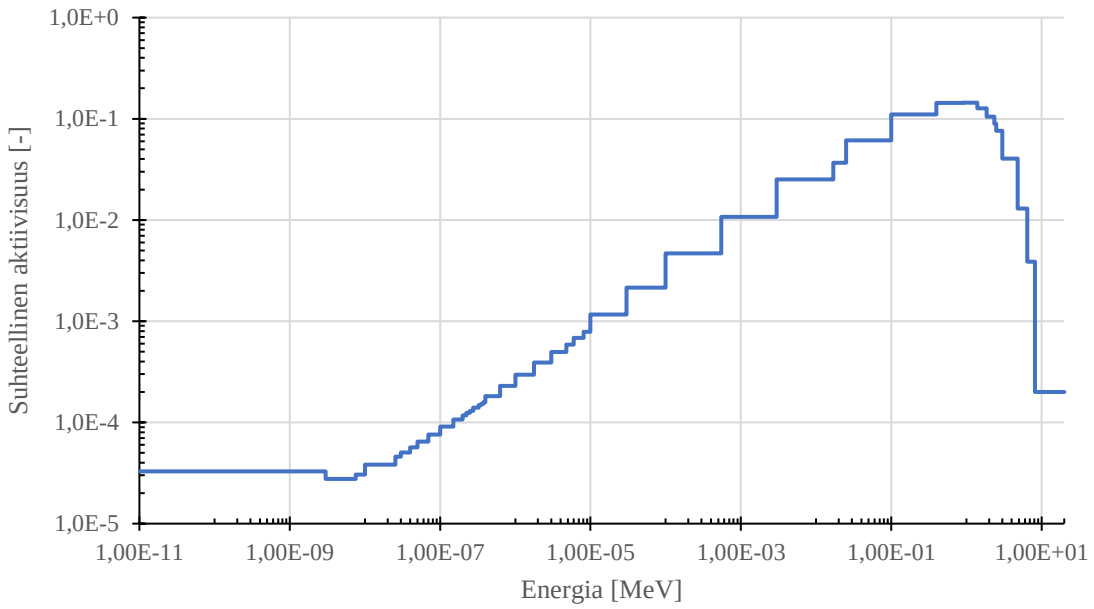
Kuva 28. Polttoaineen aksiaalinen palamajakauma.



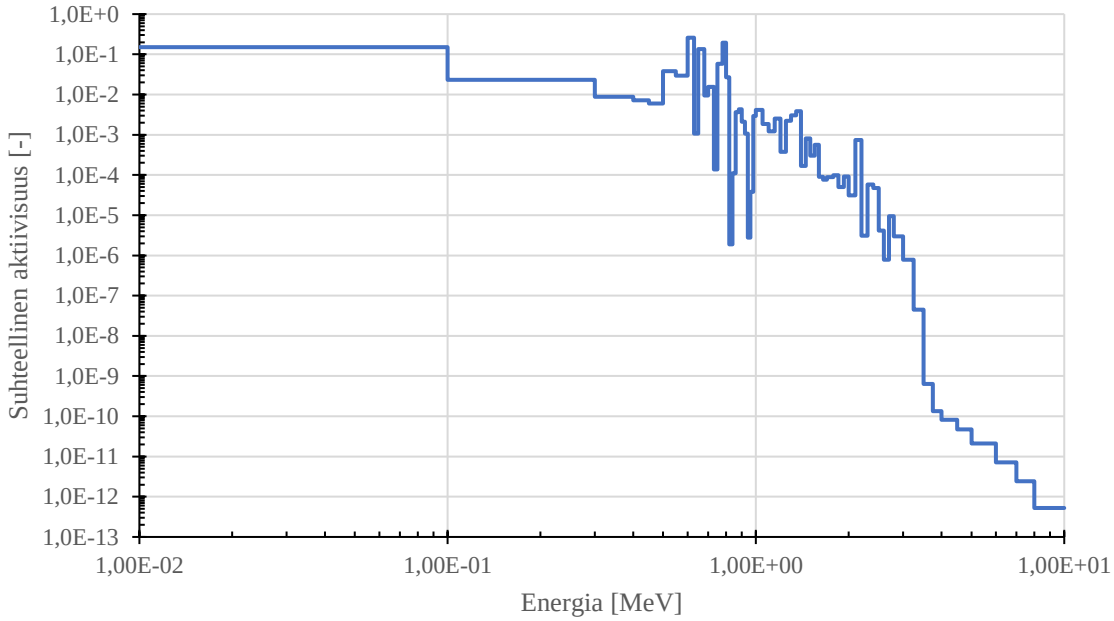
Kuva 29. Neutroni- ja gamma-aktiivisuusosuudet palama-alueittain.

Käytetyn EPR polttoainenipun laskennalliset neutroni- ja gamma aktiivisuudet uraanitonnia kohti viiden vuoden jäähtymisajan jälkeen ovat A_n/m_U = 2,201·10^9 Bq/tU ja A_γ/m_U = 1,748·10^{16} Bq/tU (Anttila 2005, 309–310). Polttoaineen gamma-aktiivisuus on siis noin 8000000-kertainen neutroniaktiivisuuteen verrattuna. Tämä aiheuttaa ongelmia, kun pyritään simuloimaan sekä neutroni-, että gamma-annosnopeuksia. Simuloitavien neutronien määrä jäisi liian pieneksi vaadittavan tilastollisen luotettavuuden saavuttamiseksi. Tästä syystä suoritettiin kaksi eri mallinnusta: polttoaineen gammalähteen mallinnus, sekä polttoaineen neutronilähteen mallinnus, joka sisälsi neutronien vuorovaikutuksista syntyvät sekundäärigammat.

Oranon raportissa on säteilylähteelle määritelty energiajakaumat palama-alueittain. Syntyvän säteilyn energiajakaumat pysyvät pääosin samoina sekä fotonien että neutronien osalta mallinnettavilla palamilla. Lisäksi matalien palamien alueet muodostavat vain pienen osan syntyvästä säteilystä. MCNP-laskennassa käytettiin korkeimman palaman alueen energiajakaumia koko polttoaineelle. Säteilylähteen energiajakauma syötettiin input-tiedostoon kuvien 30–31 mukaisina histogrammeina.



Kuva 30. Säteilylähteen neutronienergiajakauma. Logaritmiset asteikot.

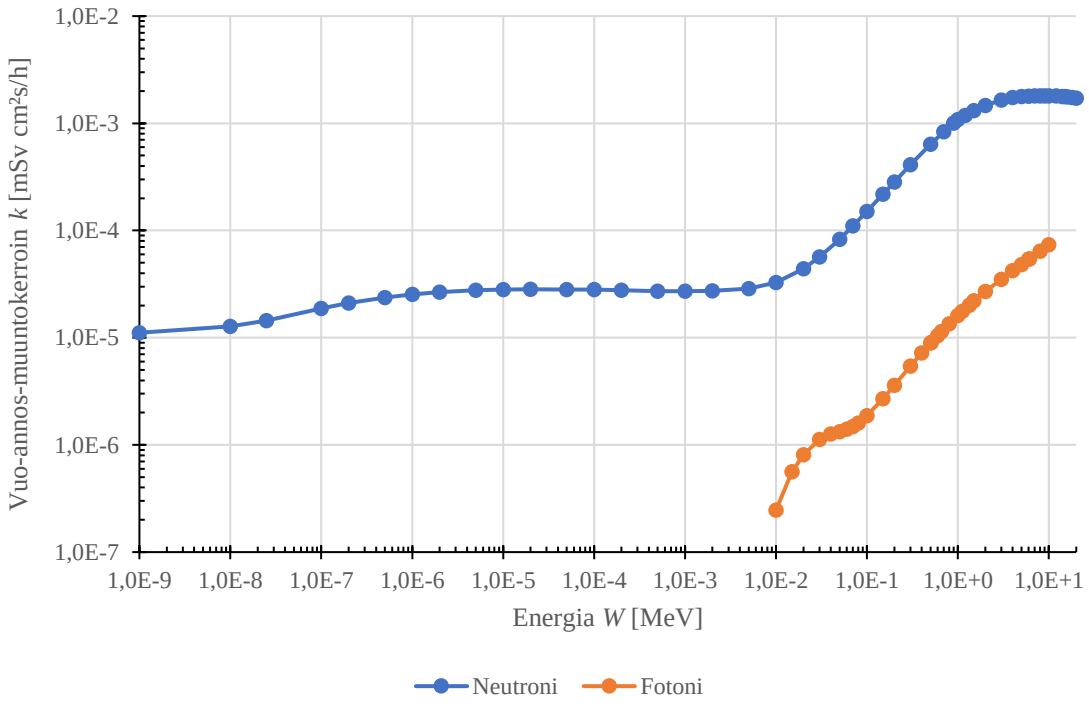


Kuva 31. Säteilylähteen gammaenergiajakauma. Logaritmiset asteikot.

Tallyiksi määriteltiin keskiarvo neutroni- ja gammavuot tallyssa φ [$cm^{-2}s^{-1}$]. Tally-ruudukon kokoa harvennettiin portaittain mitä kauemmaksi säteilylähteestä eli polttoaine-elementistä siirryttiin. Näin kirjoitettavan datan määrää ja sitä kautta output-tiedostojen kokoa kyettiin tehokkaasti rajoittamaan keskittymällä sekä tulosten merkittävyyden, että tarkkuuden kannalta tärkeimpiin alueisiin. Annosnopeustulosten tarkastelemiseksi vuot tuli muuntaa efektiivisiksi annosnopeuksiksi $\dot{E}$ [mSv/h] vuo-annos-muuntokertoimien k [mSv cm^2s/h] avulla yhtälön 4 mukaisesti

$$\dot{E} = \sum \varphi_E k_E \tag{8}$$

missä $\dot{E}$ on efektiivinen annosnopeus, φ_E ja k_E ovat keskiarvovuo ja vuo-annos-muuntokerroin tietylle energialle E [eV]. Kansainvälinen säteilysuojelukomissio ICRP määrittelee eri säteilylajeille ja energioille vuo-annos-muuntokertoimet, joilla tallyn vuo voidaan muuntaa efektiiviseksi annosnopeudeksi (ICRP 2010, 127–131). Kuvassa 32 on esitettynä muuntokertoimet neutroni- ja gammasäteilylle. Kertoimet syötettiin input-tiedoston datakorttiin ja määriteltiin kertoimiksi tallyn tuloksille energioittain.



Kuva 32. ICRP vuo-annos-muuntokertoimet neutroni- ja gammasäteilylle. Logaritmiset asteikot.

MCNP suorittaa tallyjen tuloksille 10 tilastotestiä arvioidakseen tulosten luotettavuutta. Testeissä tarkkaillaan tallyn keskiarvoa, suhteellista virhettä R ja sen käyttäytymistä, varianssin varianssia (VOV) ja sen käyttäytymistä, figure of merit:ä (FOM) ja tallyn tiheysfunktiota (PDF). Yksittäin millään näistä ei voida määrittää tallyn luotettavuutta, vaan arviointiin vaaditaan useamman suureen tarkastelua. (Shultis & Faw 2011, 39) Seuraavaksi käydään läpi suhteellinen virhe ja hyvyysluku FOM, sillä niiden arvojen tarkastelu MCNP6-ohjelmalla antaa parhaiten tietoa laskennan luotettavuudesta.

Suhteellinen virhe R lasketaan keskihajonnan $S_{\bar{x}}$ suhteena keskiarvoon $\bar{x}$ kaavan 9 mukaisesti:

$$R = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \tag{9}$$

missä $S_{\bar{x}}$ on tallyn keskihajonta ja $\bar{x}$ on tallyn keskiarvo. Tallyn arvon luotettavuutta voidaan arvioida suhteellisen virheen R avulla taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. Suhteellisen virheen tulkinta (Mukaillen: Shultis & Faw 2011, 35).

Suhteellinen virhe *R*	**Tallyn luotettavuus**
> 0,5	Merkityksetön
0,2–0,5	Vähäinen
0,1–0,2	Kyseenalainen
< 0,1	Pääosin luotettava
< 0,05	Luotettava

Mallin tehokkuutta kuvataan hyvyysluvulla FOM, joka määritellään seuraavasti

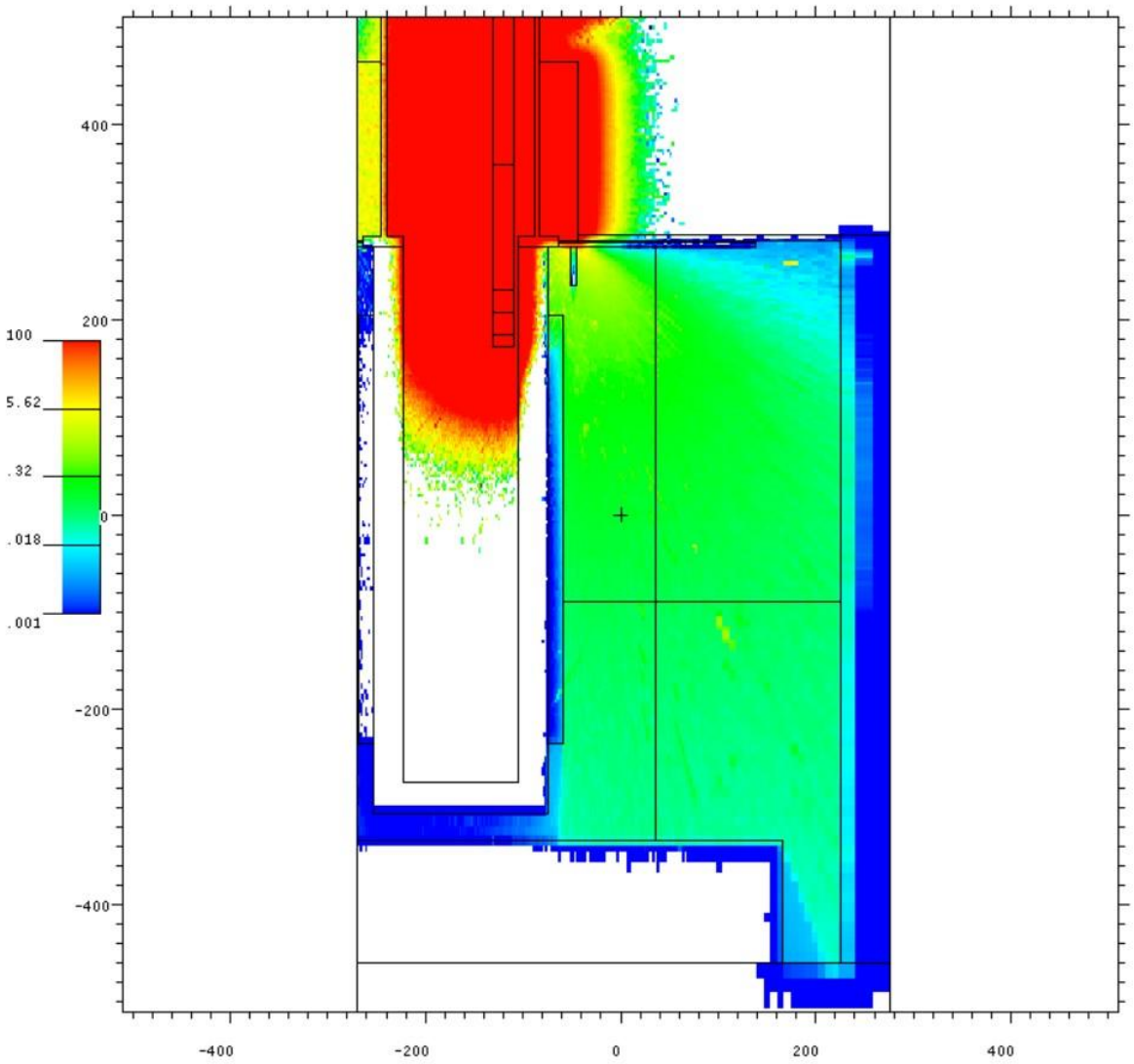
$$FOM \equiv \frac{1}{R^2 t} \tag{10}$$

missä *R* on tallyn suhteellinen virhe ja *t* on laskenta-aika minuutteina. Laskennan tehokkuus vaikuttaa suuresti FOM:in, sillä mitä enemmän aikaa laskentaan käytetään, sitä pienempi luku on. Suuri FOM tarkoittaa, että laskenta konvergoituu tehokkaasti. FOM:n tulisi pysyä suhteellisen tasaisena laskettujen historioiden lukumäärän kasvaessa, sillä suhteellinen virhe on kääntäen verrannollinen historioiden lukumäärään ja laskenta-aika on suoraan verrannollinen historioiden lukumäärään. (X-5 Monte Carlo Team 2008, 1-7)

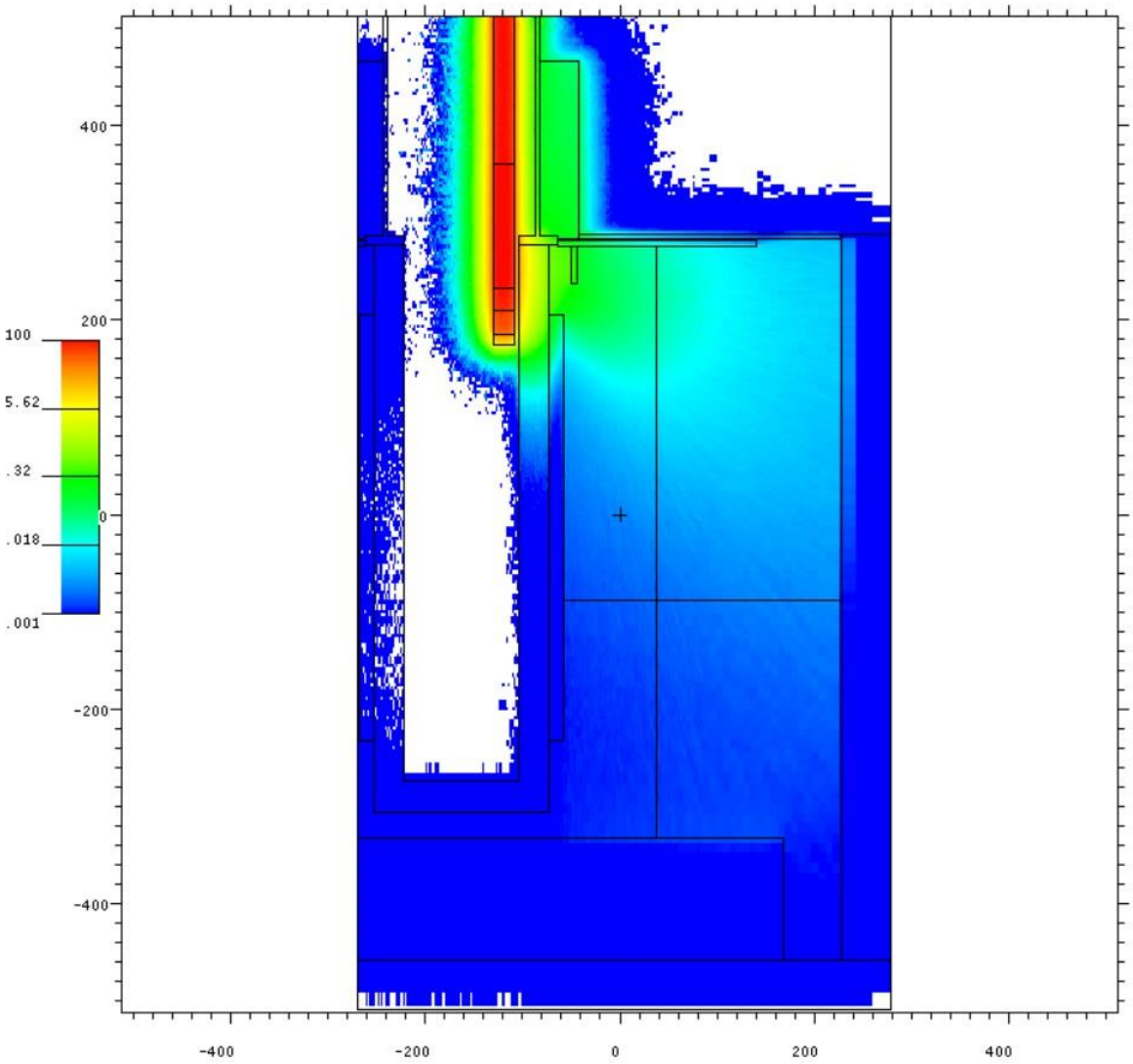
Laskentaa tehostettiin käyttämällä epäanalogista weight-window-menetelmää, jossa laskentaa optimoidaan tietylle tallylle ja optimoinnin pohjalta ohjelma muodostaa tärkeysfunktion geometrian soluille ja partikkeleille. Tärkeysfunktio määrittää kunkin solun painoarvolle ylä- ja alarajat. Partikkelin kulkeutuessa geometriassa soluun, jolla on korkeampi painoarvo, kuin itse partikkelilla, se jaetaan useammaksi partikkeliksi siten, että uusien partikkelien painoarvot ovat solun rajojen sisällä. Mikäli partikkeli saapuu geometriassa soluun, jolla on pienempi painoarvo, partikkelin painoarvo lasketaan solun alueelle tai se poistetaan simuloinnista. Weight-window-menetelmällä saadaan kasvatettua simuloitavien partikkeleiden määrää ja parannettua laskennan tilastollista luotettavuutta sekä ohjattua simulaatiota halutulle alueelle geometriassa.

6.4 Laskennan tulokset

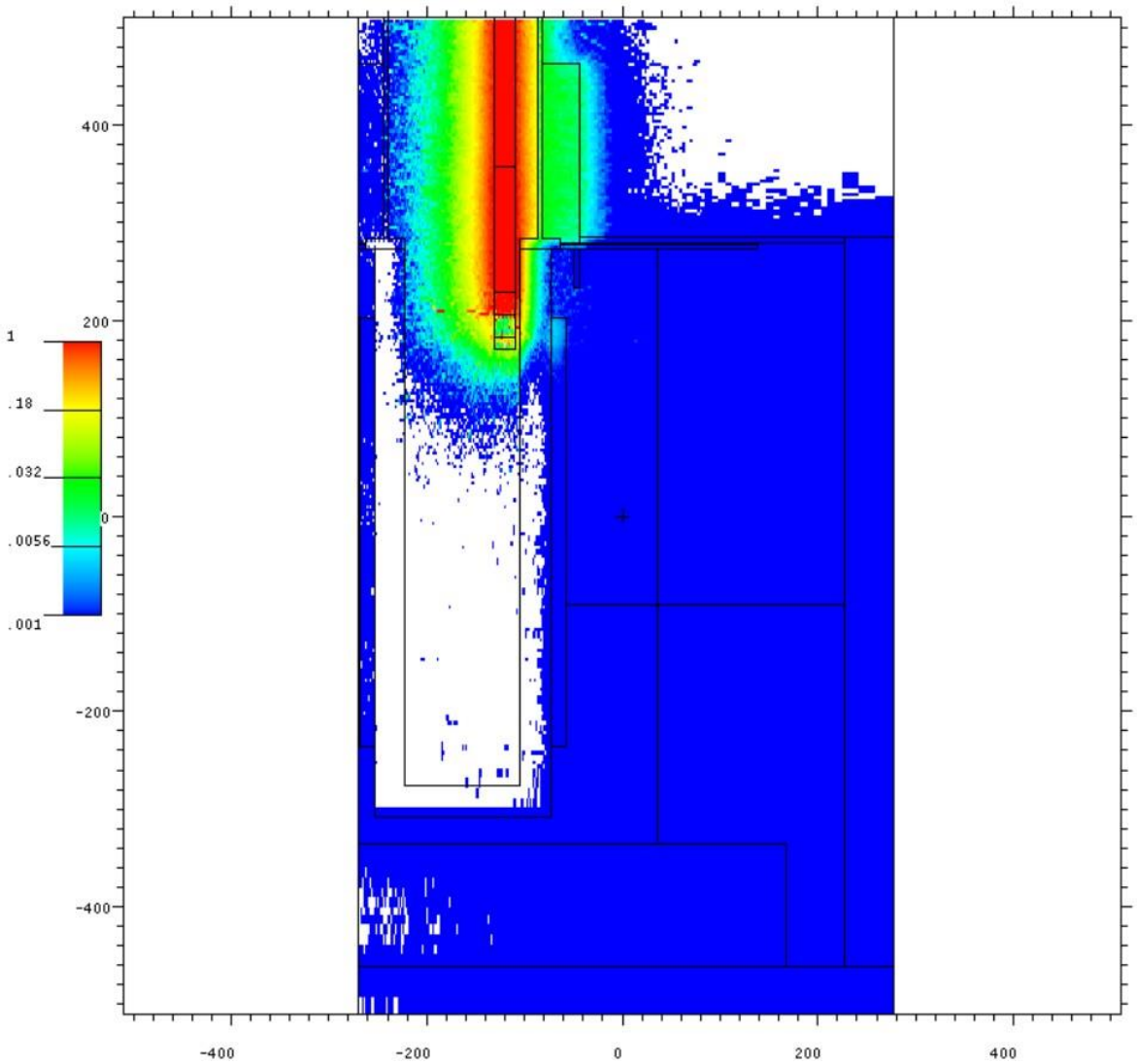
Lakennasta saadut annosnopeustulokset on esitelty kuvissa 33–35. Tulosten geometrian orientaatio on sama, kuin kuvassa 26. Kuvassa 33 on gammalähteen mallinnuksen tulokset ja kuvissa 34–35 ovat neutronilähteen tulokset. Käytetyt laskenta-ajat ja simuloitujen historioiden määrät olivat gammalähteelle 41 tuntia ja $2{,}6 \cdot 10^9$ historiaa, ja neutronilähteelle 50 tuntia ja $2{,}1 \cdot 10^7$ historiaa. Tulosten väriskaalan asteikko on logaritminen ja luettavuuden vuoksi asteikon rajoiksi on asetettu 0,001 mSv/h ja 100 mSv/h pois lukien neutronilähteen gamma-annosnopeus, jonka yläraja on 1 mSv/h. Tuloksista voidaan nähdä, että gamma-annosnopeus telakointiaseman ympärillä on noin 3 mSv/h ja neutroniannosnopeus noin 0,3 mSv/h. Vastaavat annosnopeudet käytävänpuoleisella seinustalla noin 1,5 m korkeudessa ovat noin 0,1 mSv/h ja 0,01 mSv/h.



Kuva 33. MCNP-laskennasta tuloksena saatu polttoaineen gammalähteen annosnopeus yksikössä mSv/h. Akselit ovat yksikössä cm.



Kuva 34. MCNP-laskennasta tuloksena saatu polttoaineen neutronilähteen annosnopeus yksikössä mSv/h. Akselit ovat yksikössä cm.

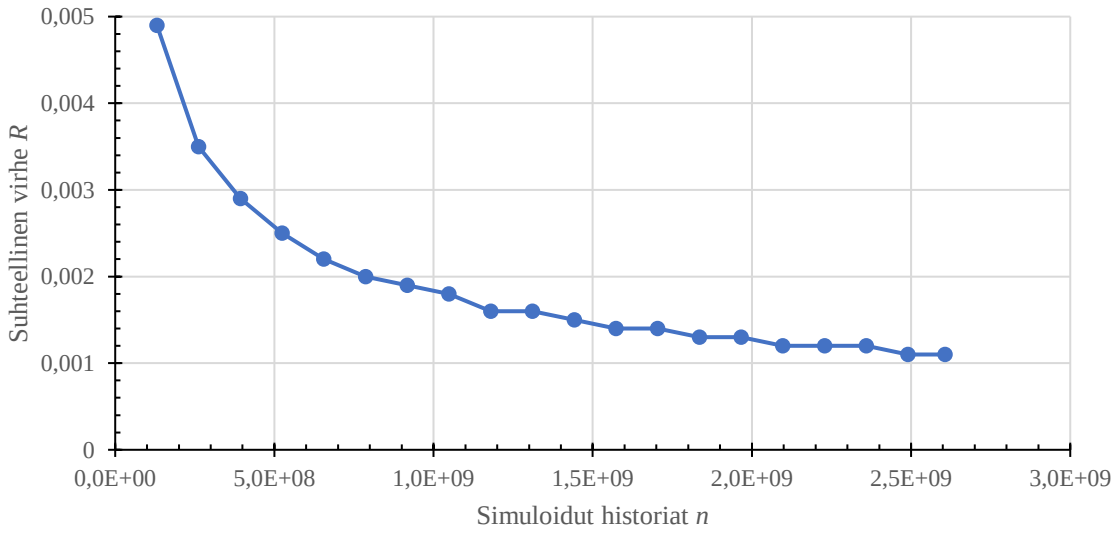


Kuva 35. MCNP-laskennasta tuloksena saatu neutronilähteen aiheuttama gamma-annosnopeus yksikössä mSv/h. Akselit ovat yksikössä cm.

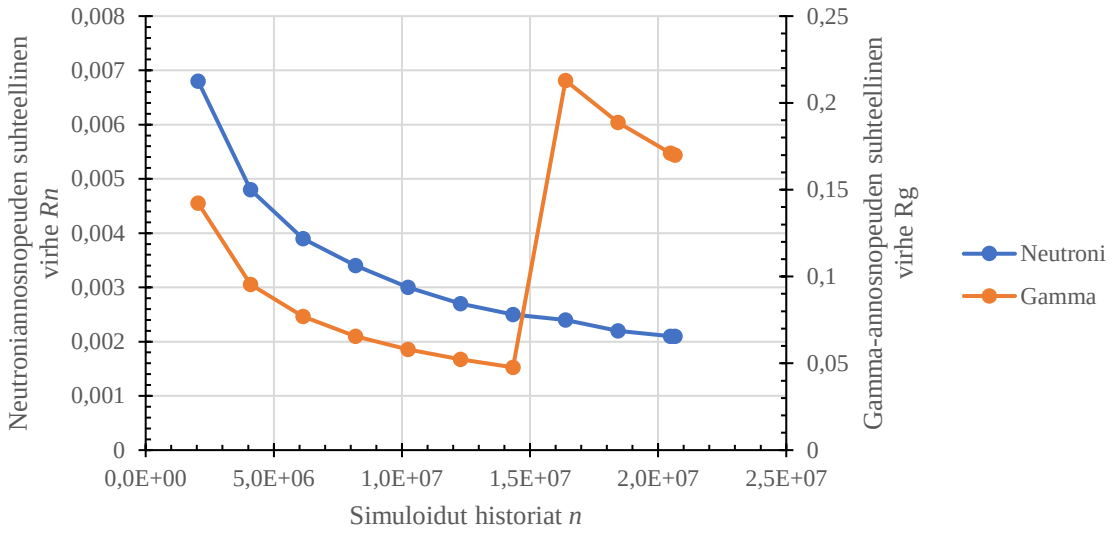
Sekä gamma- että neutroniannosnopeustuloksista nähdään, kuinka säteily pääsee kulkeutumaan läpiviennin rakenteiden läpi ja aiheuttaa alaviistoon korkean annosnopeuden keilan. Läpiviennin ja telakointiaseman teräsrakenteet absorboivat suurimman osan gammasäteilystä. Läpiviennin viereisessä ilmassa annosnopeus on useita sievertejä tunnissa, mutta telakointiaseman rakenteiden ja polttoainejunan teräksisen suojalevyn alapuolella annosnopeus on enää noin 10 mSv/h. Telakointiaseman lyijysuoja ei ole optimaalinen tähän tilanteeseen. Se ei kykene absorboimaan jyrkästi yläviistosta tulevaa säteilyä tehokkaasti. Vaakasuuntainen lyijysuoja antaisi paremman suojan, mutta tämä olisi vaikea toteuttaa telakointiaseman rakenteen vuoksi.

Säiliön hartsisuojan vaikutus on nähtävillä sekä neutroni-, että sekundäärigamma-annosnopeuksissa. Neutronituloksissa havaitaan kuinka hartsikerros absorboi tehokkaasti neutronisäteilyä. Sekundäärigammoissa taas nähdään, kuinka hartsikerroksessa tapahtuvien neutronien absorptioista emittoituvat sekundäärigammat nostavat gamma-annosnopeutta hartsikerroksessa. Sekundäärigammojen vaikutus säiliön ulkopuoliseen gamma-annosnopeuteen on kuitenkin olematon.

Laskennan tulokset läpäisivät kaikki ohjelman tilastotestit. Lopulliset FOM-luvut gamma- ja neutronitallyille olivat 333 ja 77. Gammalähteen annosnopeustulokset konvergoituivat siis neutronilähteen tuloksia nopeammin. Sama tulos on nähtävissä kuvissa 36–37, joissa on kuvattu suhteellisten virheiden muutosta mallinnettujen historioiden lukumäärän funktiona. Gammalähteen suhteellinen virhe on pienempi, kuin neutronitulosten, jolloin tally myös konvergoituu myös nopeammin. Kuvista nähdään myös, että suhteellisen virheen muutos ei ollut laskennan loppuvaiheessa kovin suurta, joten laskenta-aikojen kasvattaminen ei olisi tuottanut mainittavaa hyötyä tulosten tarkkuudessa. Poikkeuksena tähän ovat neutronilähteen sekundäärigammojen tulokset, jotka eivät konvergoituneet kunnolla laskennan aikana. Näiden vaikutus kokonaisannosnopeuteen on kuitenkin häviävän pieni, joten laskentaa olisi turha jatkaa tarkempien tulosten saavuttamiseksi.

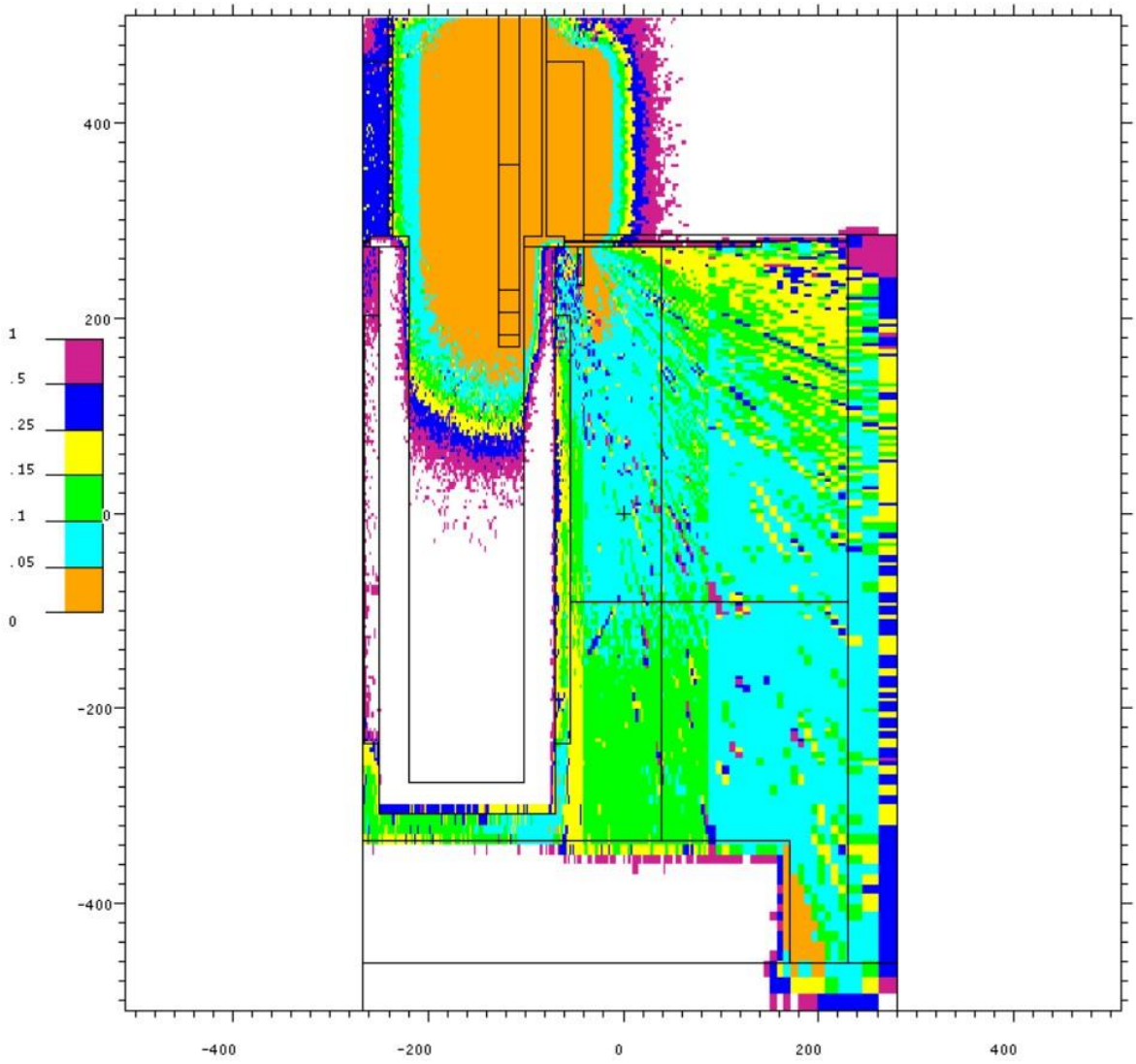


Kuva 36. Gammalähteen annosnopeuksien suhteellinen virhe simuloinnin aikana.

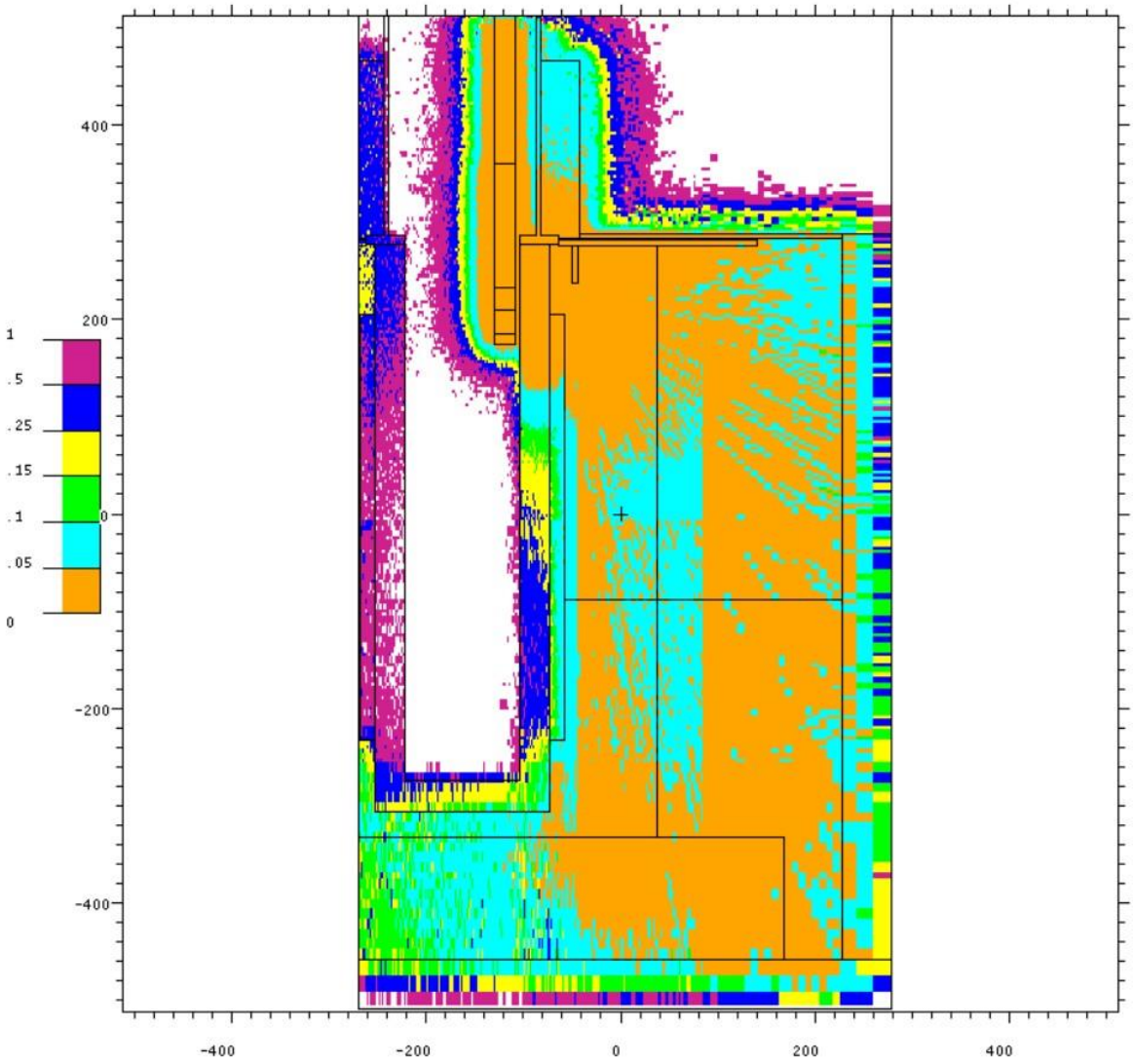


Kuva 37. Neutronilähteen annosnopeuksien suhteellinen virhe simuloinnin aikana. Gamma-annosnopeudet oikealla akselilla.

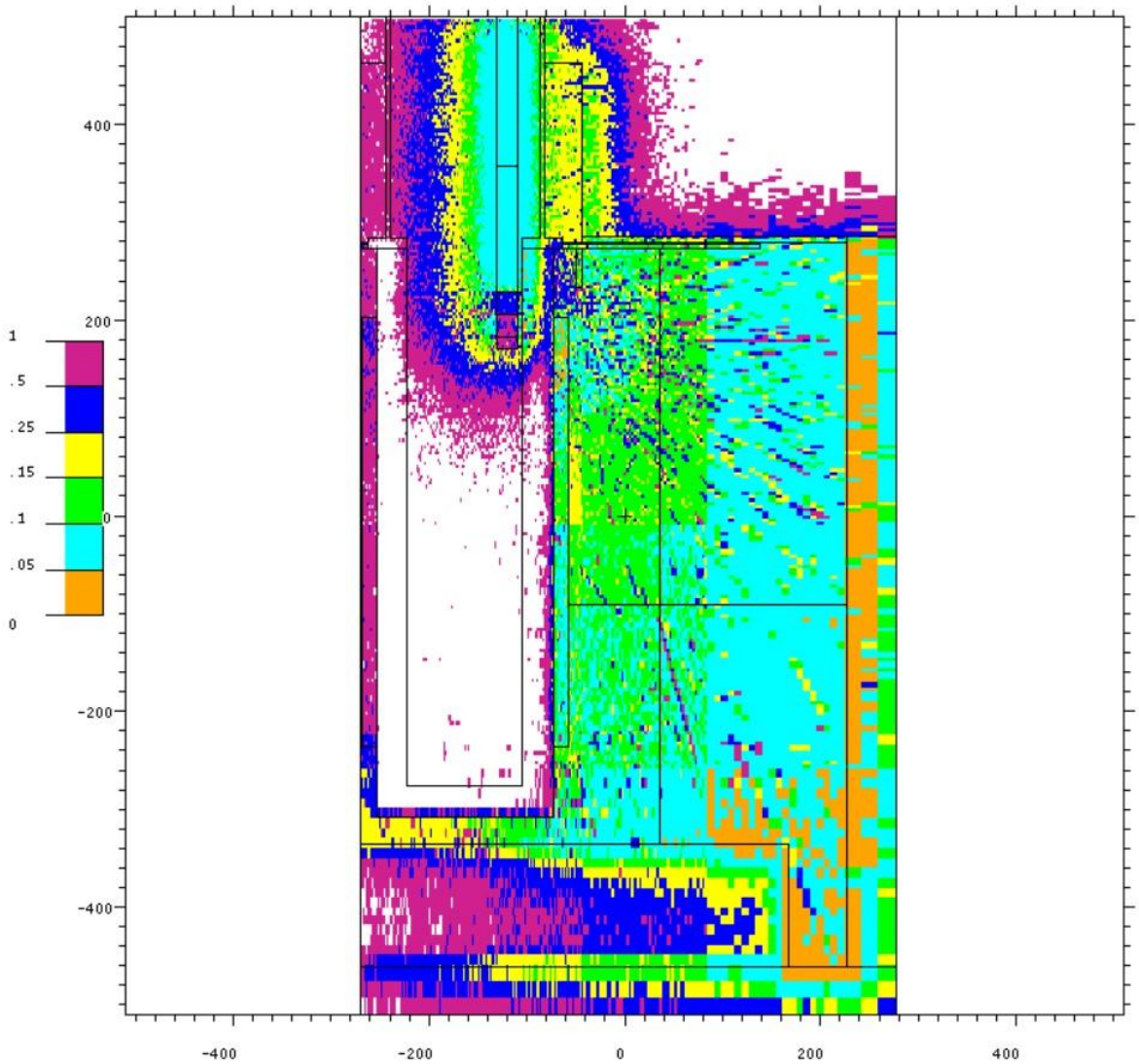
Suhteellista virhettä voidaan käyttää MCNP:llä kuvastamaan tallyn luotettavuutta graafisesti. Kuvissa 38–40 ovat esitettyinä mallinnusten lopulliset suhteelliset virheet annosnopeustuloksille. Kuvista nähdään, että tulokset ovat luotettavia lähes koko geometrian alueella.



Kuva 38. Gammalähteen suhteellinen virhe *R*. Akselit ovat yksikössä cm.



Kuva 39. Neutronilähteen neutroniannosnopeuden suhteellinen virhe *R*. Akselit ovat yksikössä cm.



Kuva 40. Neutronilähteen gamma-annosnopeuden suhteellinen virhe *R*. Akselit ovat yksikössä cm.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin säteilysuojelutoimia käytetyn polttoaineen siirtojen yhteydessä Olkiluodon ydinvoimalaitoksella sekä Posivan kapselointilaitoksella. Työ tehtiin yhteistyössä Teollisuuden Voiman säteilysuojeluorganisaation kanssa. Työssä keskityttiin erityisesti radioaktiivisten hippujen leviämisen hallintakeinoihin ja niiden kehittämiseen. Lisäksi työssä tutkittiin Olkiluoto 3 laitosyksikön siirtosäiliön telakointiaseman säteilysuojausta Monte Carlo -mallinnuksella.

2021 käytetyn polttoaineen siirtojen yhteydessä tapahtuneen aktiivisuuden leviämisen seurauksena siirtosäiliön käsittely- ja säteilysuojeluprosesseihin havaittiin tarpeelliseksi tehdä parannuksia. Tässä työssä esitetään parannusehdotuksia kuten antistaattisten puhdistusliinojen käyttö siirtosäiliön puhdistuksessa, korkeaan taustasäteilyyn soveltuvien pintakontaminaatiomittareiden käyttö siirtosäiliön mittauksessa, kontaminaatiosuojageelien käyttö säiliötä käsiteltäessä altaissa sekä KPA-varaston pesualtaan käyttö siirtosäiliön sisäkorien puhdistukseen. Ehdotukset soveltuvat Olkiluoto 1, 2 ja 3 laitosten sekä Posivan kapselointilaitoksen siirtosäiliön käsittelymenetelmiin. Menetelmiä oli tarkoitus testata käytännössä 2022 käytetyn polttoainesiirtojen yhteydessä, mutta siirrot siirtyivät vuoden 2023 kesälle.

Antistaattisten puhdistusliinojen kykyä kaapata itsevaraavia radioaktiivisia hippuja tutkittiin mittauskampanjalla, jossa pyrittiin simuloimaan siirtosäiliön pinnassa olevaa hippumaista kontaminaatiota. Mittausten tuloksena ei voida suoraan todeta tribosähköisen ilmiön vaikutusta testattujen materiaalien kykyyn kaapata radioaktiivista kontaminaatiota. Tulokset kuitenkin antoivat viitteitä mahdollisesta vaikutuksesta, mutta selvemmät tulokset vaativat lisää tutkimusta todenmukaisemmissa olosuhteissa. Jatkotutkimuksiksi esitettiin siirtosäiliön pyyhintää antistaattisilla liinoilla 2023 käytetyn polttoaineen siirtojen yhteydessä.

Monte Carlo -mallinnuksen perusteella OL3:n siirtosäiliön telakointiaseman säteilysuojaus todettiin riittäväksi säiliön lastauksen aikana. Läpiviennin läpi kulkeva polttoaine-elementti nostaa annosnopeutta huomattavasti lastaushallissa. Hallin seinän vieressä 1,5 metrin korkeudella kokonaisannosnopeus nousisi noin 100 µSv/h. Lähtökohtaisesti lastaushallissa ei ole lastauksen aikana työntekijöitä, joten säteilyannosvaikutus jää olemattomaksi. Mallinnuksessa tehtiin useita oletuksia ja yksinkertaistuksia etenkin monimutkaisten rakenteiden kohdalla. Yksinkertaistusten vaikutus arvioitiin konservatiiviseksi, joten todellinen annosnopeus olisi jopa laskettua pienempi. Tilastotestien mukaan mallinnuksen tulokset ovat luotettavia käytetylle mallille. Tulosten todenmukaisuutta voisi kasvattaa vähentämällä yksinkertaistuksia ja rakentamalla todenmukaisemman mallin.

Lähteet

22.11.2018/1034. Valtioneuvoston asetus ionisoivasta säteilystä. 13 § Säteilytyöntekijän annosrajat.

23.5.2008/342. Ydinenergialaki. 7 h §. Ydinaineet ja ydinjätteet.

Alajärvi Jani & Palomäki Maria. 2016. Yleinen osa 6 - Radioaktiiviset aineet kpa-varastossa - lopullinen turvallisuusseloste. *KPA-varaston turvallisuusseloste (FSAR)*. TVO. OlkiDoc: 128337, versio 3.

Anttila Markku. 2005. Radioactive Characteristics of the Spent Fuel of the Finnish Nuclear Power Plants. Working Report 2005-1. Posiva.

Areva TN. Supply of Spent Fuel Transport Cask and Auxiliary Systems Call for Tender: Appendix 1 Technical Spesification. Areva TN International.

Arvela Hannu, Lahtinen Juhani, Moring Mikael & Pöllänen Roy. 2003. Ulkoinen säteily. Pöllänen Roy (toim.), *Säteily- ja ydinturvallisuus: Säteily ympäristössä*. Säteilyturvakeskus (STUK). Hämeenlinna, Suomi. ISBN 951-712-995-5.

Berger J. P., Lange D. & Perrin B. 1996. Basic information on design features of the N4 nuclear power plant. *Review of design approaches of advanced pressurized LWRs*. International Atomic Energy Agency (IAEA). Wien, Itävalta. ISSN 1011-4289.

Boulaud D., Gensdarmes F. & Renoux A. 2001. Electrical charging of radioactive aerosols—comparison of the Clement–Harrison models with new experiments. Journal of Aerosol Science 32 (2001) 1437-1458.

Brown Forrest B. 2000. Fundamentals of Monte Carlo Particle Transport. Los Alamos National Laboratory (LANL). USA. LA-UR-05-4983.

Eakins J. 2021. Monte Carlo calculation of organ and effective dose rates from ground contamination by Am-241: Results of an international intercomparison exercise. Radiation Measurements 148 (2021).

Ehrmanntraut Michael. 2015. Fuel Transfer Facility - System Description. TVO. OL3Doc: OL3-0000158424, versio 6.15.

Ehrmanntraut Michael. 2017. Spent Fuel Cask Transfer Facility - System Description. TVO. OL3Doc: OL3-0000085980, versio 7.12.

Energiateollisuus. 2022a. Energiavuosi 2021, Sähkö [verkkodokumentti]. [viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2021_netti.pdf

Energiateollisuus. 2022b. Suomalaisten energia-asenteet 2022 [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/7553/Energia-asenteet_2022_FINAL.pdf

Euroopan parlamentti. 2019. Euroopan parlamentin päätöslauselma 14. maaliskuuta 2019 ilmastonmuutoksesta: eurooppalainen visio kukoistavasta, nykyaikaisesta, kilpailukykyisestä ja ilmastoneutraalista taloudesta Pariisin sopimuksen mukaisesti [verkkodokumentti]. [viitattu 20.7.2022]. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0217_FI.html

Gebhardt Christoph. 2018. Geometrical Compatibility of the AGORA HE-I Fuel Assembly for Olkiluoto-3. Framatome. OL3Doc: OL3-0002557339, versio 1.

Grönman Kari. 2017. Säteilysuojelutoimenpiteet polttoaineen käsittelyonnettomuustapauksissa sekä vuotavaa polttoainetta käsiteltäessä. TVO. OlkiDoc: 103564, versio 5.

Helenius Reija & Virtanen Janne. 2018. Y.815 - KPA - Siirtosäiliö - Lopullinen turvallisuusseloste. TVO. OlkiDoc: 127431, versio 3.

Huttunen Jani. 2022. Käytetyn polttoaineen kunnonvalvontaohjelma. TVO. OlkiDoc: 103144, versio 8.

Häikiö Juha. 2022. Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta: Vuosiraportti 2021. STUK. ISBN 978-952-309-527-4.

International Commission on Radiological Protection (ICRP). 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. Elsevier Ltd. ISBN: 978-1-4557-2858-9

Itälä Aku, Järvinen Joonas & Kekki Tommi. 2021. Gamma spectroscopic surface contamination measurements at the Olkiluoto 1 and 2 nuclear power plants 2021. VTT. Olkidoc 197294, versio 1.

Kontio Timo. 2022. Säteilysuojelupäällikkö. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen tiedoksianto. 23.11.2022.

Koski Paula. 2021. Siirtosäiliön käsittely polttoaineen ja säätösauvojen siirron yhteydessä. TVO. OlkiDoc: 103408, versio 6.

Koski Paula. 2022. Polttoaineen käsittely polttoaineen siirtokoneella. TVO. OlkiDoc: 101002, versio 12.

Kuch Sebastian. 2018. OL3: AGORA HE-I Fuel Assembly Thermal Hydraulic Design Report. Framatome. OL3Doc: OL3-0002557337, versio 1.

Lamarsh John R. & Baratta Anthony J. 2001. Introduction to Nuclear Engineering. 3. painos. Prentice–Hall Inc. New Jersey, USA. ISBN 0-201-82498-1.

Lee Bill W., Orr David E. 2018. The Triboelectric Series [verkkosivusto]. AlphaLab Inc. [viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: https://www.alphalabinc.com/triboelectric-series/

Lehti Laura. 2022. KPA-varasto - Turvallisuustekniset käyttöehdot. TVO. OlkiDoc: 100452, versio 19.

Leppänen Jarkko. 2021. Burnup calculations [luentomateriaali]. VTT.

Los Alamos National Laboratory. 2022. The MCNP Code. [verkkosivusto]. [viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: https://mcnp.lanl.gov

Manola Esa & Nevander Olli. 2004. Fsar/4.11 am2 – amendment 2 - atrium(tm)10 fuel. TVO. OlkilDoc: 105935, versio 7.

Marttila Olli. 2002. Suureet ja yksiköt. Ikäheimonen Tarja (toim.), *Säteily- ja ydinturvallisuus: Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus (STUK). Hämeenlinna, Suomi. ISBN 951-712-503-8.

Michelsson Leif. 2019. OL1/OL2 - Final safety analysis report for system 261 - Fuel assemblies, Amendment 12, ATRIUM 10XM. TVO. OlkiDoc: 106113, versio 7.

Miettinen Joni. 2021. Säteilyvalvonta käytetyn polttoaineen siirron yhteydessä laitoksilta KPA:lle. TVO. OlkiDoc: 102866, versio 7.

Mirion Technologies. 2017. MCB2 – Alpha/Beta/Gamma Contamination Meter [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2023]. Saatavilla: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/mcb2-alpha-beta-gamma-contamination-meter-.pdf?1525715297

Mitsubishi Nuclear Fuel. PWR Fuel [verkkosivusto]. [viitattu 28.7.2022]. Saatavissa: https://www.mhi.com/group/mnf/products/pwr.html

Nordlund Reija. 2022. Tutkintaraportti. Radioaktiivisia hippuja ulkoalueella ja poikkeaminen siirtosäiliön TTKE-vaatimuksista. TVO. OlkiDoc: 199920, versio 1.

Palomäki Jaana & Ristimäki Linnea. 2013. Laitoskuvaus 2012 – Kapselointi- ja loppusijoituslaitossuunnitelmien yhteenvetoraportti. Posiva Oy. Työraportti 2012-65.

Paubel Gabriel. 2021. Safety analysis report, wet on-site transfers from OL3 to KPA on a TN 13/2 packaging, appendix 7 evaluation of the equivalent dose rates. Orano. OL3Doc: OL3-0003204067, versio 1.

Piontech Jurgen & Wypych George. 2007. Handbook of Antistatics. ChemTec Publishing. Toronto, Kanada. ISBN 1-895198-34-8.

Posiva. 2020a. Käytetty polttoaine [verkkosivusto]. [viitattu 20.7.2022]. Saatavissa: https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/pitkaaikaisturvallisuus/kaytettypolttoaine.html

Posiva. 2020b. Loppusijoitus ONKALOssa. [verkkosivusto]. [viitattu 20.7.2022]. Saatavissa: https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/tutkimus-jaloppusijoitustilatonkalossa.html

Reuss Paul. 2008. Neutron Physics. EDP Sciences. Les Ulis, Ranska. ISBN 978-2-7598-0041-4.

Riihimäki Juha. 2021. FSAR-Y5 Rakentaminen ja käyttö. Posiva. PosiDoc: POS-014316, versio 4.

Saarelainen Jesse. 2016. FSAR 4.11 - Nuclear design. TVO. OlkiDoc: 169681, versio 1.

Sandberg Jorma & Paltemaa Risto. 2002. Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet. Ikäheimonen, Tarja (toim.), *Säteily- ja ydinturvallisuus: Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus (STUK). Hämeenlinna, Suomi. ISBN 951-712-503-8.

Saubestre F. 2013. Description and performance of the package model TN 13/2. AREVA TN.

Savolainen Pyry. 2020. Käytetyn polttoaineen koostumus - väkevöinnin herkkyystarkastelu. TVO. OlkiDoc: 190566

Seikola Jarkko. 2022. Polttoaineinsinööri. Teollisuuden Voima Oyj. Olkiluoto. Henkilökohtainen tiedoksianto. 16.12.2022.

Shultis J. Kenneth & Faw Richard E. 2011. An MCNP primer. Kansas State University.

Skubacz Krystian & Woloszczuk Katarzyna. 2019. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny. Journal of Sustainable Mining 18 (2019) 61–66.

Säteilyturvakeskus (STUK). 2019a. Ydinlaitos- ja säteilytapahtumien kansainvälinen vakavuusasteikko INES [verkkosivusto]. [viitattu 12.8.2022]. Saatavissa: https://www.stuk.fi/aiheet/sateilyvaara/ydinlaitos-ja-sateilytapahtumien-kansainvalinen-vakavuusasteikko-ines

Säteilyturvakeskus (STUK). 2019b. Ydinlaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen rajoittaminen ja valvonta, Ydinturvallisuusohjeet (YVL-ohjeet). YVL C.3. [viitattu 15.7.2022]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLC-3

Tammela Mikko. 2022. R122 – Reaktorisydämen suunnittelu ja polttoaineen käyttäytyminen. TVO. OlkiDoc: 200395, versio 1.

Tarkiainen Reeta. 2022. R222 – Reaktorisydämen suunnittelu ja polttoaineen käyttäytyminen. TVO. OlkiDoc: 200581, versio 1.

Teollisuuden Voima Oy (TVO). 2007. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.2.2023]. Saatavissa: https://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2(1).pdf

Teollisuuden Voima Oy (TVO). 2010. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 [verkkodokumentti]. [viitattu 2.8.2022]. Saatavissa: https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf

Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 2022a. Laitosyksiköt [verkkosivusto]. [viitattu 18.1.2022]. Saatavissa: https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot.html

Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 2022b. Ydinjätehuolto [verkkosivusto]. [viitattu 26.7.2022]. Saatavissa: https://www.tvo.fi/tuotanto/ydinjatehuolto.html

Tsoulfanidis Nicholas. 2013. The nuclear fuel cycle. American Nuclear Society. La Grange Park, USA. ISBN 978-0-89448-460-5.

Tuulensuu Päivi. 2015. Polttoaineen siirtosäiliön sisäkorien poisto, asennus ja säiliön imurointi. TVO. OlkiDoc: 113023, versio 3.

Vuorenmaa Kalle. 2018. Säteilysuojelu toimenpiteet siirrettäessä käytettyä polttoainetta OL3 laitosyksiköltä KPA-varastolle. TVO.

Vuorenmaa Kalle. 2022. Säteilysuojeluinsinööri. Teollisuuden Voima Oyj. Henkilökohtainen tiedoksianto. 22.6.2022.

World Nuclear Association (WNA). 2022. Physics of Uranium and Nuclear Energy [verkkosivusto]. [viitattu 26.7.2022]. Saatavissa: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/physics-of-nuclear-energy.aspx

World Nuclear News (WNN). 2022. European Parliament backs nuclear and gas in EU taxonomy [verkkosivusto]. [viitattu 20.7.2022]. Saatavissa: https://www.world-nuclear-news.org/Articles/European-Parliament-backs-nuclear-and-gas-in-EU-ta

X-5 Monte Carlo Team. 2008. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume 1: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory (LANL), New Mexico, USA. LA-UR-03-1987

Liitteet

Liite 1. Kontaminaation tarttumisen mittauspöytäkirjat ja laskenta

	Brutto [cps]				Netto [cps]			
Pyyhkäisynäyte								
Tausta	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Saanto-%**	**K.a. saanto-%**
2	60	34	32	58	32	30	0,55172	0,66649
	56	20	37	54	18	35	0,33333	
	37	7	30	35	5	28	0,14286	
	26	14	13	24	12	11	0,5	
3	72	58	8	69	55	5	0,7971	
	33	17	11	30	14	8	0,46667	
	53	27	15	50	24	12	0,48	
	62	61	5	59	58	2	0,98305	
	122	85	15	119	82	12	0,68908	
	107	62	24	104	59	21	0,56731	
	24	13	10	21	10	7	0,47619	
	95	88	12	92	85	9	0,92391	
	54	52	5	51	49	2	0,96078	
	54	51	7	51	48	4	0,94118	
	153	120	17	150	117	14	0,78	
	111	84	21	108	81	18	0,75	
	21	15	5	18	12	2	0,66667	
	80	79	7	77	76	4	0,98701	
Antistaattinen liina								
Tausta	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Saanto-%**	**K.a. saanto-%**
2	47	44	12	45	42	10	0,93333	0,58615
	91	50	23	89	48	21	0,53933	
	23	9	13	21	7	11	0,33333	
	27	8	16	25	6	14	0,24	
3	40	24	9	37	21	6	0,56757	
	100	67	28	97	64	25	0,65979	
	28	16	8	25	13	5	0,52	
	81	48	13	78	45	10	0,57692	
	76	47	20	73	44	17	0,60274	
	20	7	9	17	4	6	0,23529	
	49	40	6	46	37	3	0,80435	
	144	53	77	141	50	74	0,35461	
	77	46	37	74	43	34	0,58108	
	37	24	13	34	21	10	0,61765	
	45	40	5	42	37	2	0,88095	
	63	52	9	60	49	6	0,81667	
	120	85	20	117	82	17	0,70085	
Puuvillaliina								
Tausta	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Levy 1**	**Näyte**	**Levy 2**	**Saanto-%**	**K.a. saanto-%**
3	124	84	15	121	81	12	0,66942	0,72423
	139	111	23	136	108	20	0,79412	
	23	14	5	20	11	2	0,55	
	67	63	7	64	60	4	0,9375	
	21	15	5	18	12	2	0,66667	
	21	15	5	18	12	2	0,66667	
	63	48	12	60	45	9	0,75	
	91	81	6	88	78	3	0,88636	
	97	84	7	94	81	4	0,8617	
	167	163	9	164	160	6	0,97561	
	56	47	7	53	44	4	0,83019	
	96	15	63	93	12	60	0,12903	
	46	33	7	43	30	4	0,69767	

Liite 2. MCNP mallin materiaalien tiheydet

Polttoaine [kg/m³]	**Betoni [kg/m³]**	**Hartsi [kg/m³]**	**Boorivesi [kg/m³]**	**Ruostumaton teräs [kg/m³]**	**Ilma [kg/m³]**	**Rauta [kg/m³]**	**Lyijy [kg/m³]**
4,1186	2,4	2,44	0,998	7,85	0,00129	7,85	11,34

Liite 3. MCNP mallin materiaalikoostumukset massaosuuksina

Polttoaine		Betoni		Hartsi		Boorivesi		Ruostumaton teräs		Ilma		Rauta		Lyijy	
^{227}Ac	6,31E-15	H	2,21E-2	^{1}H	2,43E-2	^{11}B	1,94E-4	Fe	7,20E-1	^{14}N	8,00E-1	^{52}Fe	1	Pb	1
^{241}Am	1,79E-4	C	2,48E-3	^{10}B	9,00E-4	^{10}B	7,55E-5	Cr	1,80E-1	^{16}O	2,00E-1				
^{242}Am	8,74E-8	O	5,75E-1	^{12}C	1,93E-1	O	8,88E-1	Ni	1,00E-1						
^{243}Am	1,57E-4	Na	1,52E-2	^{16}O	1,42E-1	H	1,12E-1								
^{137}Ba	1,84E-10	Mg	1,27E-3	^{27}Al	3,51E-2										
^{113}Cd	1,74E-7	Al	2,00E-2	Cl	6,19E-2										
^{252}Cf	1,70E-13	Si	3,05E-1	Zn	5,15E-1										
^{243}Cm	3,71E-7	K	1,00E-2	Sb	2,81E-2										
^{244}Cm	5,67E-5	Ca	4,30E-2												
^{245}Cm	9,50E-7	Fe	6,44E-3												
^{246}Cm	7,12E-7														
^{248}Cm	4,68E-10														
^{134}Cs	3,17E-5														
^{135}Cs	3,67E-4														
^{137}Cs	1,21E-3														
^{154}Eu	1,49E-5														
^{155}Eu	3,55E-6														
^{3}H	4,34E-8														
^{129}I	1,67E-4														
^{85}Kr	1,90E-5														
^{93}Nb	1,89E-9														
^{94}Nb	5,93E-10														
^{59}Ni	9,60E-9														
^{237}Np	4,28E-4														
^{231}Pa	9,67E-12														
^{107}Pd	3,20E-4														
^{147}Pm	3,53E-5														
^{236}Pu	2,43E-15														
^{238}Pu	1,91E-4														
^{239}Pu	2,31E-3														
^{240}Pu	1,63E-3														
^{241}Pu	5,72E-4														
^{242}Pu	7,38E-4														
^{226}Ra	3,21E-14														
^{87}Rb	2,41E-4														
^{106}Ru	4,58E-6														
^{125}Sb	3,77E-6														
^{79}Se	5,48E-6														
^{151}Sm	4,58E-6														
^{126}Sn	3,33E-5														
^{90}Sr	5,21E-4														
^{99}Tc	8,57E-4														
^{228}Th	1,02E-11														
^{229}Th	7,27E-15														
^{230}Th	1,44E-9														
^{232}U	4,26E-10														
^{233}U	6,80E-10														
^{234}U	1,08E-4														
^{235}U	2,00E-3														
^{236}U	3,91E-3														
^{238}U	5,85E-1														
^{93}Zr	7,97E-4														
^{16}O	2,20E-1														
Zr	1,27E-1														
^{11}B	7,32E-4														
^{10}B	1,70E-4														
^{27}Al	3,01E-2														
Si	3,44E-3														
H	1,69E-2														