LOPPUSIJOITUSKAPSELIN PALAUTETTAVUUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Marianna Hanni

Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen

TkT Tuomas Skriko

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Marianna Hanni

Loppusijoituskapselin palautettavuus

Konetekniikan diplomityö

2024

62 sivua, 28 kuvaa, 7 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen ja TkT Tuomas Skriko

Avainsanat: loppusijoitus, ydinjäte, kapselointilaitos, palautuskoe, loppusijoituskapseli

Posiva Oy:n kapselointi- ja loppusijoituslaitoksilla tullaan kapseloimaan ja loppusijoittamaan Teollisuuden Voima Oyj:n ja Fortum Power and Heat Oy:n Olkiluodossa ja Loviisassa tuotettu käytetty ydinpolttoaine. Teollisen loppusijoituksen on tarkoitus alkaa 2020-luvun puolivälissä ja ennen tätä laitoksilla suoritetaan yhteistoimintakoe, jonka aikana koestetaan kapselointi- ja loppusijoitusjärjestelmien toimivuus. Osana yhteistoimintakoetta on loppusijoituskapselin palautuskoe, jossa kapseli palautetaan loppusijoituslaitoksen kapselivarastosta kapselointilaitokseen, kapselin kansi koneistetaan auki ja polttoaineniput poistetaan kapselista.

Työssä kuvataan kapselointi- ja loppusijoitusprosessi, kapseli ja aikaisemmat loppusijoituskokeet. Kapselin palautettavuutta käsitellään niin tekniikan kuin säteilysuojelun näkökulmasta. Tekniikan näkökulmasta loppusijoituskapselin palautukseen haasteiksi tunnistetaan järjestelmien rajapinnat, sekä se, että prosessi on suunniteltu kulkemaan vain yhteen suuntaan. Säteilysuojelun näkökulmasta tunnistetaan haasteiksi erityisesti kapselin mahdollinen kontaminoituminen, kun polttoaine poistetaan kapselista.

Työn tuloksena syntyi loppusijoituskapselin palautuskokeen prosessi, jonka pohjalta voidaan kirjoittaa varsinainen ohje palautukselle.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Marianna Hanni

Retrievability of final disposal canister

Master's thesis

2024

62 pages, 28 figures, 7 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Juhani Hyvärinen and D.Sc Tuomas Skriko

Keywords: final disposal, nuclear waste, encapsulation plant, retrievability test, final disposal canister

Spent nuclear fuel produced in Olkiluoto and Loviisa by Teollisuuden Voima Oyj and Fortum Power and Heat Oy will be encapsulated and disposed at Posiva Oy's encapsulation plant and disposal facility. The industrial final disposal is planned to start in the mid-2020s and before that, a trial run of final disposal will be conducted at the plants, during which the functionality of the encapsulation and final disposal systems will be tested. As a part of the trial run, a disposal canister retrievability test will be run. in the test the canister is retrieved from the canister storage of the disposal facility to the encapsulation plant, the canister lid is machined open, and the fuel bundles are removed from the canister.

The study describes the encapsulation and disposal process, the canister and previous disposal experiments. The retrievability of the canister is discussed from the point of view of both technology and radiation protection. From a technical point of view, challenges for the retrievability of the disposal canister are identified as the interfaces of the systems, as well as the fact that the process is designed to run in only one direction. From the point of view of radiation protection, contamination of the canister when the fuel is removed is identified as a challenge.

As a result of the study, the process of the retrieval test of a disposal canister was created, based on which the actual instructions for the retrieval can be written.

KIITOKSET

Kiitokset Pasi Rantamäelle erityisestä kärsivällisyydestä opinnäytetyön valvomisen suhteen. Kiitos myös Petteri Vuoriolle aiheen tarjoamisesta. Lisäkiitokset ystäville, perheelle, tuttaville ja työkavereille tsemppaamisesta työn aikana.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	murtovenymä	[%]
A_e	lastuamisleveys	[mm]
A_p	lastuamissyvyys	[mm]
E	kimmomoduuli	[N/mm3]
F	pöytäsyöttö	[mm]
F_z	hammassyöttö	[mm]
n	pyörimisnopeus	[rpm]
R_m	murtolujuus	[N/mm3]
R_p	myötölujuus	[N/mm3]
V_c	lastuamisnopeus	[m/min]

Dimensiottomat luvut

HBW	Brinell kovuus

Lyhenteet

AGV	Automated guided vehicle
BIS	Buffer Installation System, Puskurilohkojen asennusjärjestelmä
Bq	Becquerel
BWR	Boiling water reactor
CRT	Canister Retrieval Test
CU-OFP	Phosphorus-alloyed oxygen-free copper

DAC	Derived air concentration
DHBM	Deposition Hole Boring Machine
EBS	Engineered Barrier System
EYT	Ei ydinteknisesti turvaluokiteltu
FAT	Factory Acceptance Test
FISST	Full Scale in Situ System Test, täyden mittakaavan loppusijoituskoe
FSW	Friction stir welding, kitkatappihitsaus
GBIS	Granular Backfill Installation Machine
Gy/h	Grayta tunnissa
H	Horizontal
KBS	Kärnbränslesäkerhet
KPA	Käytetyn polttoaineen varasto
KSAA	Kapselin asennusajoneuvo
k_{eff}	efektiivinen kasvutekijä
LO	Loviisa
OL	Olkiluoto
PE	Polyeteeni
PWR	Pressure water reactor
ppm	parts per million, miljoonasosa
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
Sv	Sievert
TUVA	Tuotantoon Valmistautuminen
TVO	Teollisuuden Voima
tU	Tonnia uraania

V	Vertical
VVER	vodo-vodjanoi enrgetitseski reaktor
YTK	Yhteistoimintakoe
YVL	Ydinturvallisuusohje

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 12
2 Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus ... 13
2.1 Kapselointi ... 13
2.1.1 Kapselointilaitoksen laitoskuvaus ... 13
2.1.2 Loppusijoituskapseli ... 14
2.1.3 Käytetty ydinpolttoaine ... 17
2.1.4 Kapselointiprosessi ... 19
2.2 Loppusijoituslaitos ja loppusijoituskonsepti ... 20
2.2.1 Loppusijoituskonsepti ... 20
2.2.2 Loppusijoituslaitos ... 23
3 Loppusijoituskokeet ... 28
3.1 Kapselin palautus loppusijoitusreiästä (CRT) ... 28
3.2 Täyden mittakaavan loppusijoituskoe (FISST) ... 31
3.3 Yhteistoimintakoe ... 32
4 Kapselin palautus ... 33
4.1 Kapselin palautuskoe ... 34
4.1.1 Palautusprosessin kulku ... 34
4.1.2 Mahdolliset haasteet palautusprosessissa ... 35
5 Kuparikapselin kannen kiinnitys ja irrotus ... 37
5.1 Kuparikapselin kannen kiinnitys hitsaamalla ... 37
5.2 Kuparikapselin kannen irrotus koneistamalla ... 39
5.2.1 Koneistusasema ... 39
5.2.2 Kannen irrotuskoe koneistusasemassa ... 42
6 Säteilysuojelu kapselointilaitoksessa ... 45
6.1 Alue- ja vyöhykejako ... 45

6.2 Säteilyn lähteet 48
6.2.1 Kontaminaatio kapselointilaitoksella 51
6.3 Säteilysuojelu palautusprosessin aikana 53
7 Palautetun kapselin jatkokäsittely 55
7.1 Kuparikapseli ja sen kansi 55
7.2 Rautainen sisäosa ja sen kansi 56
8 Johtopäätökset 58
Lähteet 60

Liitteet

Liite 1. Vuokaavio kapselin palautuskokeesta

Kuvaluettelo

Kuva 1: Pituussuuntainen leikkauskuva kapselointilaitoksesta

Kuva 2: Loppusijoituskapselin rakenne räjäytyskuvana

Kuva 3: Loppusijoituskapselit eri laitostyyppien polttoaineille

Kuva 4: Kapselin rautaisen sisäosan poikkileikkauskuvat sekä poikkileikkauskuva sisäosan profiilista

Kuva 5: Järjestyksessä vasemmalta oikealle VVER-, BVR- ja PWR-tyyppiset polttoaineet

Kuva 6: Loppusijoituksen KBS-3V konseptin moniesteperiaate

Kuva 7: Segmenttilohkoista koottu puskuri

Kuva 8: Havainnekuva täytetystä ja tulpatusta loppusijoitustunnelista

Kuva 9: Posivan loppusijoituslaitos ja kapselointilaitos

Kuva 10: Puskurilohkojen asennusjärjestelmä

Kuva 11: Kapselin siirto- ja asennusajoneuvo KSAA

Kuva 12: Tunnelitäytön asennuslaite GBIS

Kuva 13: Poikkileikkaus SKB:n CRT-kokeen kapselin asennuksesta ja instrumentoinnista

Kuva 14: Poikkileikkaus SKB:n CRT-kokeen loppusijoitusreiän tulppauksesta

Kuva 15: Puskuri ydinporalla otettujen näytteiden jälkeen

Kuva 16: Kuvaus FSW-hitsauksen toimintaperiaatteesta

Kuva 17: Posivan kapselointia varten suunniteltu ja valmistettu kitkatappihitsauslaite

Kuva 18: Koneistusasema ja sen yhteydessä oleva etäohjattu robotti

Kuva 19: Kapselin kuparikannen irrotukseen soveltuva jyrsinterä

Kuva 20: Periaatekuvassa koneistuskeskuksen jyrsintyökalu työalueen alimmassa asemassa

Kuva 21: Mekaaninen nostoapulaite ja irti koneistettu kuparikapselin kansi

Kuva 22: Irti koneistuksen seurauksena synty porrasprofiili

Kuva 23: Kapselointilaitoksen aluejako

Kuva 24: Käytetyn ydinpolttoaineen gamma-annosnopeudet esitettynä etäisyyden funktiona

Kuva 25: Käytetyn ydinpolttoaineen neutroniannosnopeudet esitettynä etäisyyden funktiona

Kuva 26: Suljetun täyden kapselin gamma-annosnopeudet etäisyyden funktiona

Kuva 27: Suljetun täyden kapselin neutroniannosnopeudet etäisyyden funktiona

Kuva 28: Posivan loppusijoituslaitoksen ajotunnelin yhteyteen rakennettava matala- ja keskiaktiiviselle jätteelle suunniteltu tila noin 180 m syvyydessä

Taulukkoluettelo

Taulukko 1: Loppusijoituskapselin rautaisen sisäosan vaatimukset standardin EN 1563 luokan EN-GJS-400-15 mukaisesti

Taulukko 2: Loppusijoitettavan kapselin jälkilämpötehot

Taulukko 3: Eri loppusijoituskapseleiden vaatimat puskurilohkomäärät

Taulukko 4: Valvonta-alueen jako vyöhykkeisiin

Taulukko 5: Pintakontaminaatiorajat ydinlaitoksella

Taulukko 6: Ulkoisen säteilyn vyöhykerajat

Taulukko 7: Konservatiiviset ja realistiset arviot kapselointiprosessissa vaurioituvista polttoainesauvoista polttoainetyypin mukaan

1 Johdanto

Posiva Oy on Teollisuuden Voima Oyj:n ja Fortum Power and Heat Oy:n yhteisyritys, jonka tehtävänä on toteuttaa omistajiensa ydinvoimalaitoksilla tuotetun käytetyn ydinpolttoaineen turvallinen loppusijoitus. Loppusijoituksen on tarkoitus alkaa 2020-luvun puolivälissä. Ennen varsinaista loppusijoitusta, osana loppusijoituslaitoksen koekäyttöä, suoritetaan yhteistoimintakoe, jonka yhtenä osana on loppusijoituskapselin palautuskoe.

Tämän työn aiheena on loppusijoituskapselin palautettavuus ja erityisesti hitsaamalla suljetun kapselin avaaminen koneistamalla sekä polttoainenippujen poistaminen kapselista. Työssä kuvataan Posivan kapselointilaitoksen ja loppusijoituslaitoksen toiminta, loppusijoituskapselin rakenne sekä tähän saakka tehdyt loppusijoituskokeet erityisesti kapselin palautuksen näkökulmasta. Työn tuloksena esitetään Posivan yhteistoimintakokeen osana suoritettavan kapselin palautuskokeen prosessi, sekä kokeen suoritukseen liittyvät haasteet. Palautusprosessi valmistui opinnäytetyön tuloksena ja sitä tullaan käyttämään loppusijoituskokeen lisäksi varsinaisten palautusohjeiden pohjana.

Palautuskokeessa osoitetaan, että kapseli on palautettavissa maan alla sijaitsevasta loppusijoituslaitoksesta kapselointilaitokseen, missä se voidaan purkaa ja käytetty ydinpolttoaine poistaa kapselista ja kapselit voidaan jatko käsitellä turvallisesti. Ensimmäinen teoreettinen selvitys kapselin palautettavuudesta tehtiin 1999 Periaatepäätöshakemuksen liitteeksi. Ennen Posivan yhteistoimintakoetta kapselin palautettavuutta on testattu Ruotsin SKB:n toimesta Canister Retreival Test – kokeessa, jossa saturoitunut bentoniittipuskuri poistettiin kapselin ympäriltä ja kapseli nostettiin loppusijoitusreiästä samalla metodilla, kuin se asennettiin reikään. SKB:n kokeeseen viitataan myös Posivan 2015 rakennuslupahakemuksen selvityksessä palautettavuudesta. Käyttöluvan saamisen yhtenä ehtona on todistaa kapselin palauttamisen loppusijoitustiloista ja polttoaineen poiston suljetusta kapselista olevan mahdollista.

2 Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen tarkoitettu laitoskokonaisuus koostuu kahdesta ydinjätelaitoksesta; kapselointilaitoksesta ja loppusijoituslaitoksesta. Maanpäällisessä kapselointilaitoksessa käytetty ydinpolttoaine otetaan vastaan ja pakataan loppusijoituskapseleihin. Maanalaiseen loppusijoituslaitokseen tullaan loppusijoittamaan laitosyksiköiden Olkiluoto 1, 2 ja 3 (OL1, OL2, OL3) sekä Loviisa 1 ja 2 (LO1 ja LO2) käytetyt polttoaineet. Loppusijoitettavan polttoaineen kokonaismäärä on 6500 tonnia uraania (tU). (Posiva 2021b, 6.)

2.1 Kapselointi

Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi tapahtuu maanpäällisessä kapselointilaitoksessa, jonka keskimääräinen kapselointitehokkuus on 40 kapselia vuodessa. Tehokkaimmillaan laitoksen kapasiteetti on 100 kapselia vuodessa. Kapselointiprosessi säilyy samankaltaisena, mutta itse kapselin koko vaihtelee jonkin verran riippuen siitä minkä laitoksen polttoainetyyppiä käsitellään. (Posiva, 2012,53; Posiva 2022a, 10.)

2.1.1 Kapselointilaitoksen laitoskuvaus

Kapselointilaitos (kuva 1) muodostuu pääosin kuljetus- ja siirtosäiliöiden ja tyhjien loppusijoituskapselien vastaanottotiloista, kuljetus- ja siirtosäiliöiden ja kapselien siirtokäytävistä, polttoaine-elementtien käsittelykammiosta, kapselien sulkemiseen ja tarkastuksiin tarvittavista tiloista sekä loppusijoitusta odottavien kapselien välivarastosta. Kapselointilaitoksesta johtaa pystysuora kapselikuilu sen alapuolella -444 m syvyydessä olevaan loppusijoituslaitoksen kapselien vastaanottoasemaan. (Palomäki & Ristimäki 2013, 48.)

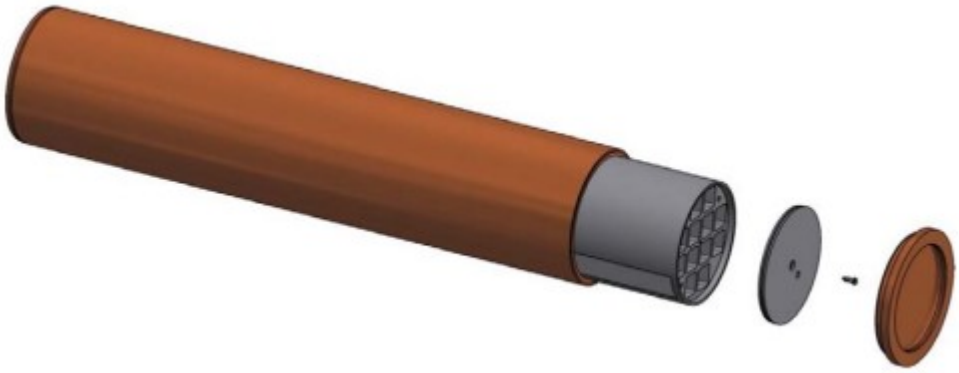
Kuva 1. Pituussuuntainen leikkauskuva kapselointilaitoksesta. Numeroituna kuvassa 1. kuljetus- ja siirtosäiliöiden vastaanottotila, 2. polttoaineen käsittelykammio, 3. kuparikannen hitsauslaite sekä koneistus- ja tarkastusasema, 4. Tyhjien kapselien vastaanotto ja varastointitila, 5. kapselihissi. (Posiva 2021b, 76.)

Kapselointilaitoksen olennaisimmat osat ovat kuljetussäiliöiden ja uusien kapselien vastaanottotila, polttoaineen käsittelytila, jossa käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi tapahtuu, hitsausasema, jossa kuparikapseli suljetaan, koneistusasema, jossa kapselin sulkuhitsi tarkastetaan ja kapselin sulkuhitsi ja yläosa koneistetaan, polttoaineen kuljetussäiliön ja kapselin siirtokäytävät, kapselivarasto, kapselihissi sekä kapselointiprosessin ohjaamo. Kapselointiprosessin kannalta olennaisessa osassa ovat kapselointilaitoksessa sijaitsevat järjestelmät, joilla kaikilla on oma tehtävänsä kapselointiprosessissa. (Palomäki & Ristimäki 2013, 55.)

2.1.2 Loppusijoituskapseli

Loppusijoituskapseli koostuu kuparisesta suojakuoresta ja pallografiittirautaisesta sisäosasta (kuva 2). Rautainen sisäosa tekee kapselista mekaanisesti kestävän ja kuparinen ulkokuori suojaa sisäosaa korroosiolta. Rautainen sisäosa on suljettu pultatulla rautakannella ja kapselin kuparinen kansi on liitetty tiiviisti kapselin runkoon FSW-hitsauksella (Friction

stir welding). FSW-hitsauksesta käytetään myös nimitystä kitkatappihitsaus. Loppusijoituskapseleiden koot vaihtelevat sen mukaan, minkä laitoksen polttoainetta ollaan loppusijoittamassa (kuva 3). (Posiva 2022a, 19.)

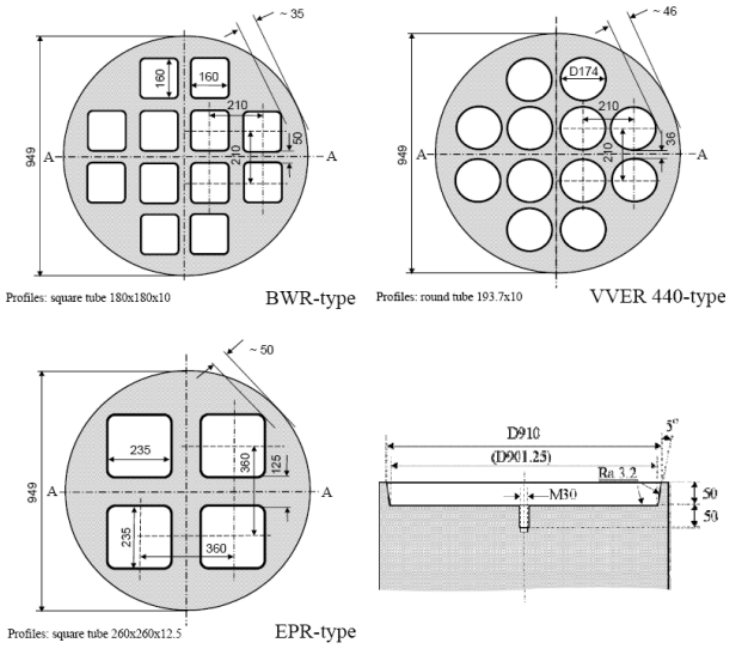


Kuva 2. Loppusijoituskapselin rakenne räjäytyskuvana. Kuvassa näkyvillä kuparinen kapselin kuori ja kansi, pallografiittirautainen kapselin sisäosa ja sen kansi sekä rautakannen kiinnitykseen käytettävä pultti. (Jonsson & Emilsson & Emilsson 2018, 9.)

Kuva 3. Loppusijoituskapselit eri laitostyyppien polttoaineille. vasemmalta oikealle: LO1-2, OL1-2 ja OL3. (Posiva 2022a, 20.)

Kaikki Posivan loppusijoituslaitokseen sijoitettavat kapselit ovat halkaisijaltaan 1,05 m ja kapselin pituus vaihtelee 3,55 metristä 5,22 metriin. Kuparivaipan ja kannen nimellispaksuudet ovat 49 mm ja 49,5/50 mm, ja kapselin ulkopinta-ala vaihtelee 13,67 m^2 ja 19,18 m^2 välillä. Kuparin massa kapseleiden kohdalla vaihtelee 5,6 tonnista 8,0 tonniin. Kuparivaipan materiaalina käytetään happivapaata kuparia seostettuna 30–100 ppm fosforia (Cu-OFP). (Posiva 2022a, 19.)

Rautaisen sisäosan valmistuksessa on materiaaliksi valikoitunut pallografiittivalurauta. Materiaalin vaatimukset mukailevat standardin EN 1563 luokan EN-GJS-400-15 vaatimuksia (taulukko 1), mutta lisävaatimuksena on, että kuparin osuus materiaalissa ei saa ylittää 0,05 paino-%. Rautaisessa sisäosassa on polttoainekanavia, joihin käytetyt polttoaineniput sijoitetaan. Näiden kanavien koko, muoto ja määrä vaihtelee jonkin verran eri laitoksissa käytettävien polttoainenippujen mukaan. OL1-2 kapselissa on 12 neliöprofiilista kanavaa polttoainenipuille, LO1-2 kapselissa 12 pyöreäprofiilista kanavaa ja OL3-kapselissa on 4 neliöprofiilista kanavaa (kuva 4). Nippugeometriat on kuvattu tarkemmin kappaleessa 2.1.2. Rautaisten sisäosien paino vaihtelee 10,6 t ja 17,9 t välillä. (Posiva 2022a, 20–21.)



Kuva 4. Kapselin rautaisen sisäosan poikkileikkauskuvat sekä poikkileikkauskuva sisäosan profiilista. BWR-polttoainetta käytetään OL1-2 laitoksilla, VVER 440-polttoainetta LO1-2 laitoksilla ja ERP-polttoainetta OL3 laitoksella. (Ranta-aho 2008, 7.)

Taulukko 1. Loppusijoituskapselin rautaisen sisäosan vaatimukset standardin EN 1563 luokan EN-GJS-400-15 mukaisesti.

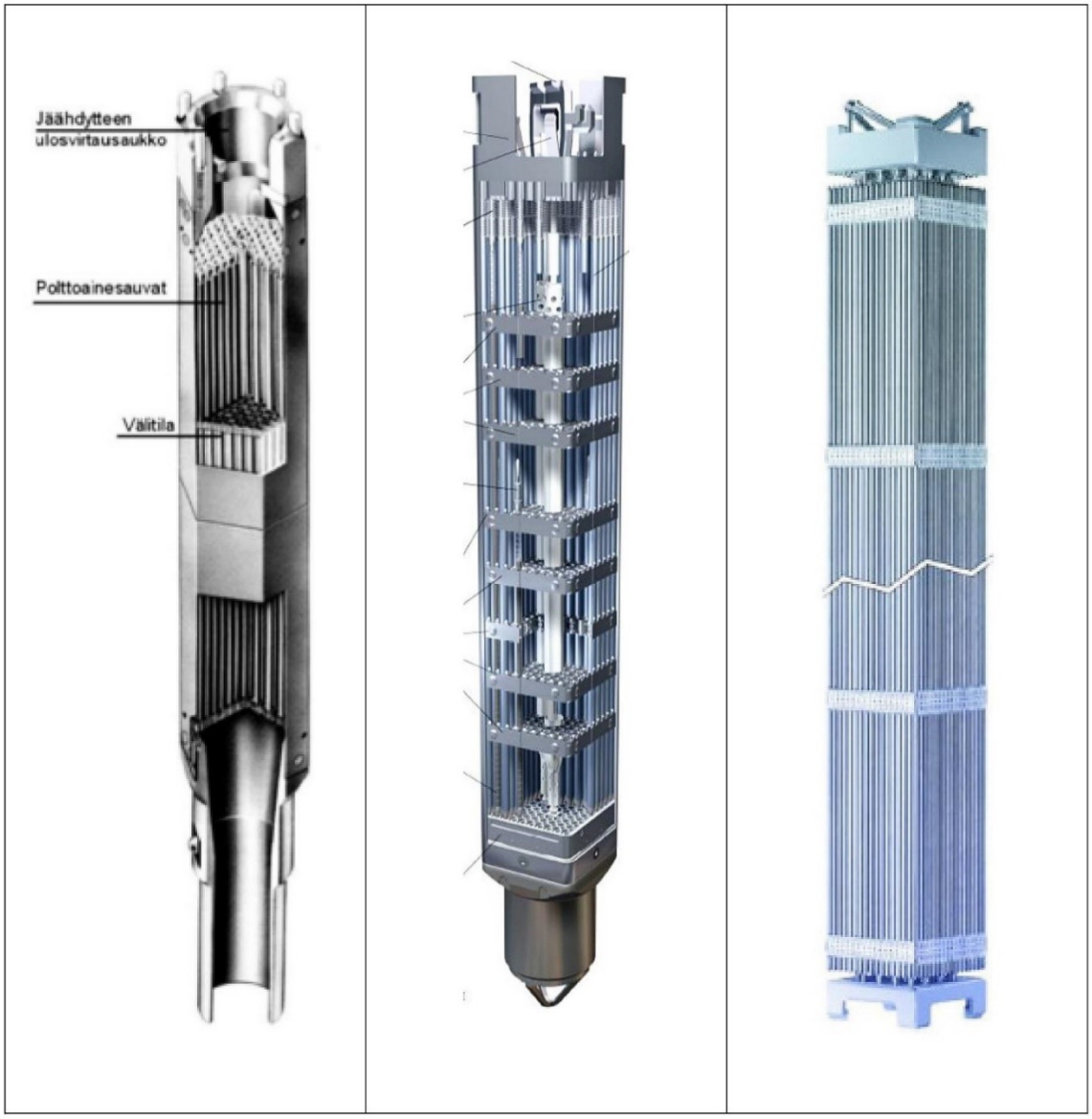
Murtolujuus	Rm	N / mm^2	400
0.2 % Myötölujuus	Rp 0.2	N / mm^2	250
Murtovenymä	A	%	15
Brinell kovuus	HBW	-	~135…~180
Kimmomoduuli	E	N / mm^2	169

Arviolta 3300 kapselia tullaan tarvitsemaan Olkiluodon ja Loviisan ydinvoimaloiden käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen. Tyhjien kapseleiden kokonaispainot vaihtelevat 16,2 t ja 25,9 t välillä. (Posiva 2022a, 21.)

2.1.3 Käytetty ydinpolttoaine

Ydinenergialain mukaan ”ydinjätteitä ovat ydinenergian käytön yhteydessä tai seurauksena syntyneet käytetyn ydinpolttoaineen muodossa tai muussa muodossa olevat radioaktiiviset jätteet sekä sellaiset ydinenergian käytön yhteydessä tai sen seurauksena radioaktiiviseksi muuttuneet aineet, esineet ja rakenteet, jotka on poistettu käytöstä ja joiden radioaktiivisuudesta aiheutuvan vaaran vuoksi tarvitaan erityisiä toimenpiteitä” (Ydinenergialaki 11.12.1987/990). Posivan kapselointi- ja loppusijoituslaitoksilla käsiteltävä ydinjäte on voimalaitoksissa käytettyä ydinpolttoainetta, joka on radioaktiivista. Käytetyn polttoaineen pinnoilta mahdollisesti irtoava epäpuhtaus eli crudi ja vähäisissä määrin vapautuvat fissiotuotteet ovat radioaktiivisia. (Huttunen 2021, 4.)

Suomessa käytössä olevissa laitoksissa käytetään kolmea erilaista polttoainetyyppiä; LO1-2-laitoksissa on käytössä VVER-tyyppistä polttoainetta, OL1-2-laitoksissa BWR-tyyppistä polttoainetta ja OL3-reaktorissa PWR-tyyppistä polttoainetta. Polttoainetyypit ja niiden erot näkyvät kuvassa 5. Normaalitapauksissa polttoaine käsitellään Posivan kapselointilaitoksessa kokonaisina polttoainenippuina. (Huttunen 2021, 5–8.)



Kuva 5. Järjestyksessä vasemmalta oikealle VVER-, BWR- ja PWR-tyyppiset polttoaineet (Posiva 2021).

Posiva on asettanut kapselikohtaisia valintakriteerejä käytetylle ydinpolttoaineelle. Polttoaine-elementtien valinta optimoidaan vuosittaisten polttoainekertymien, poistopalamien ja laitosyksiköiden käyttöajan perusteella. Kriteerien mukaan kapselin annosnopeus sen pinnalla on rajoitettu 1 Gy/h, loppusijoitettavien kapselien jälkilämpötehojen tulee olla lähellä suunnittelutehoja (taulukko 2). (Huttunen 2021, 21.)

Taulukko 2. Loppusijoitettavan kapselin jälkilämpötehot.

Polttoainetyyppi	Suunniteltu jälkilämpötehon maksimiarvo
VVER	1370 W
BWR	1700 W
PWR	1830 W

Ladatun kapselin tulee täyttää Säteilyturvakeskuksen ohjeen YVL B.4 kohdan 5.1 vaatimuksen 504 kriittisyysturvallisuusvaatimukset, siten että ”varaston ollessa täynnä ydinpolttoainetta efektiivinen kasvutekijä k_{eff} ei normaalitilanteessa tai käyttöhäiriössä ylitä arvoa 0,95 eikä muissa suunnitteluperustetilanteissa arvoa 0,98”. Kapselit pyritään lähtökohtaisesti lataamaan täyteen polttoainenippuja, mutta yhteen kapseliin sijoitetaan vain yhtä polttoainetyyppiä. (Huttunen 2021, 21.)

2.1.4 Kapselointiprosessi

Kapselointiprosessi lasketaan alkavaksi, kun käytetty polttoaine tuodaan kapselointilaitokselle märkäkuljetuksena tarkoitukseen sopivalla kuljetussäiliöllä, kuten TVO:n Castor TVO -säiliöllä käytetyn polttoaineen varastolta, eli KPA-varastolta (Kukkola 2013, 8; Posiva 2021b, 53). Polttoainetta tuodaan kapselointilaitokselle kerralla jokin kapseliin sopivan polttoainemäärän monikerta, sillä kapselointilaitoksella ei ole tarkoituksenmukaista varastoida käytettyä polttoainetta pitkiä aikoja (Huttunen 2021, 8). Kapselointilaitoksella polttoaineniput poistetaan kuljetussäiliöstä polttoaineen käsittelykammiossa polttoaineen siirtokoneella ja kuivataan polttoaineen kuivausjärjestelmällä (Kukkola 2013, 8–13).

Kapselit tuodaan kapselointilaitokselle erillisinä komponentteina. Kuparinen suojakuori, rautainen sisäosa ja sekä kapselin, että rautaisen sisäosan kannet tuodaan laitokselle erillisinä osina. Ennen kapselin lataamista polttoaineella, rautainen sisäosa asennetaan kupariputken sisään ja rautaisen sisäosan kansi esikiinnitetään ja kuparikapselin kansi lasketaan sille varattuun paikkaan kapselin siirtovaunussa. Tämän jälkeen kapseli siirretään siirtovaunun avulla polttoaineen käsittelykammion telakointiasemaan, jossa esikiinnitetty sisäosan kansi poistetaan, kuivatut polttoaineniput siirretään yksi kerrallaan loppusijoituskapseliin ja ennen

rautaisen sisäosan kannen kiinnitystä kapselin sisäosan ilma vaihdetaan Argon-suojakaasuun. (Kukkola 2013, 14–19; Posiva 2023.)

Kapselin latauksen ja sisäosan kannen kiinnityksen jälkeen kapseli lasketaan takaisin kapselin siirtokäytävään ja siirretään koneistusaseman alapuolelle. Kapselin yläosalle tehdään kontaminaatiomittaus ja kontaminoitunut kapseli puhdistetaan tarvittaessa. Tämän jälkeen kapseli nostetaan hitsausasemaan, jossa kapselin kuparinen kansi kohdistetaan paikalleen ja hitsataan kiinni. Kuparikannen kiinnityksen jälkeen kapseli siirretään koneistusasemaan, jossa kapselin yläosa koneistetaan lopulliseen muotoonsa. (Riihimäki 2021, 29). Kuparikannen kiinnitykseen käytettävän hitsauksen referenssimenetelmänä käytetään kitkatappihitsausta eli FSW-hitsausta ja kapselin hitsaus tarkastetaan koneistusasemassa ultraääni- ja pyörrevirtatarkastusmenetelmin. Lisäksi hitsi tarkastetaan visuaalisesti kamera-avusteisesti. (Posiva 2021b, 74.)

Kuparikannen hitsauksen ja koneistuksen jälkeen tarkastuksen läpäissyt kapseli siirretään kapselointilaitoksen varastoon odottamaan siirtoa loppusijoituslaitokseen. Kapseli siirretään kapselin siirtovaunusta kapselin kannatinlaitteella paletin päälle, jotta se voidaan siirtää etäohjatulla kapselitrukilla varastoon. Varastosta loppusijoitettavat kapselit siirretään kapselihissin avulla maan alla sijaitsevaan loppusijoituslaitoksen varastoon. Siirto kapselihissiin ja pois hissistä tapahtuu myös etäohjatulla kapselitrukilla. (Kukkola 2013, 23–25.)

2.2 Loppusijoituslaitos ja loppusijoituskonsepti

Posivan loppusijoituslaitos on toinen laitoskokonaisuuden kahdesta ydinjätelaitoksesta. Maan alla sijaitsevaan loppusijoituslaitokseen loppusijoitetaan kapseloitu käytetty ydinpolttoaine.

2.2.1 Loppusijoituskonsepti

Loppusijoituksen konseptina käytetään KBS-3 konseptin KBS-3V ratkaisua (kuva 6), jossa kapselit sijoitetaan loppusijoitustunneleiden lattiaan porattuihin pystysuoriin reikiin. KBS-3 on ruotsalaisen ydinjäteyhtiö Svensk Kärnbränslehantering AB:n, jatkossa SKB, kehittämä loppusijoituksen periaateratkaisu, jossa KBS viittaa sanoihin Kärnbränslesäkerhet (suomeksi ydinpolttoaineen turvallisuus) ja numero 3 viittaa konseptin kolmanteen versioon. V-

kirjain KBS-3V konseptissa viittaa sanaan vertical ja viittaa kapselin sijoittamiseen pystyasentoon. Loppusijoituskonseptista on olemassa myös KBS-3H konsepti, jossa kapseli sijoitetaan vaaka-asentoon. (Posiva 2021b, 12.)

KBS-3 konseptin turvallisuus perustuu moniesteperiaatteeseen, eli useampaan toisiaan täydentävään vapautumisesteeseen. Vapautumisesteet on suunniteltu siten, että yhden vapautumisesteen toimintakyvyn laskeminen ei vaaranna loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta. Loppusijoitusjärjestelmän teknisiksi vapautumisesteiksi luetaan tiiviin rauta-kupari-kapselin lisäksi kapselia ympäröivä bentoniittipuskuri, granuloidusta bentoniitista valmistettu loppusijoitustunnelin täyttömateriaali sekä tilojen sulkurakenteet. Luonnollisena vapautumisesteenä toimii ympäröivä kallio. (Posiva 2021b, 98.)

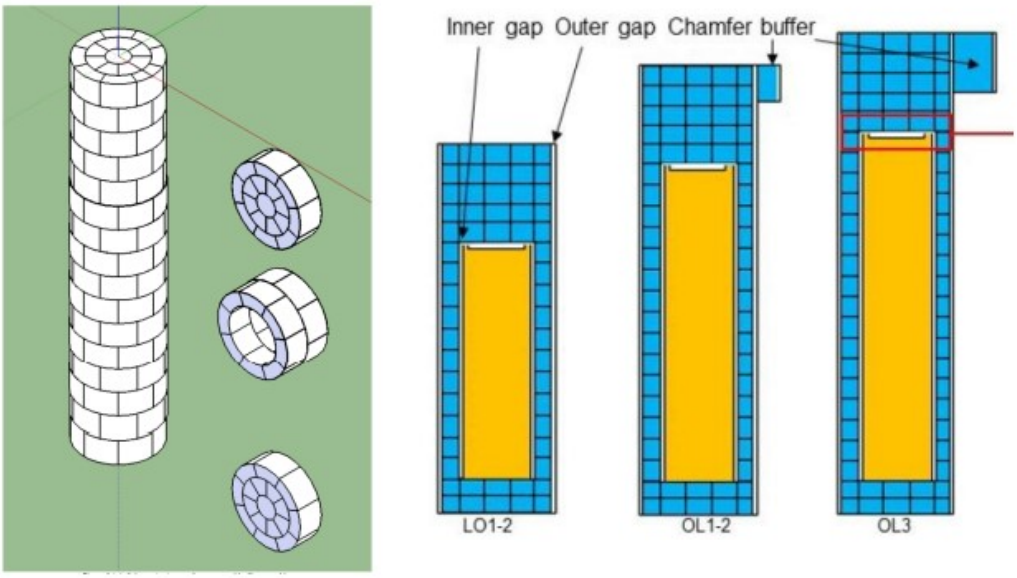
Kuva 6. Loppusijoituksen KBS-3V konseptin moniesteperiaate (Posiva 2021b, 13).

Loppusijoitettua kapselia ympäröi bentoniittisavesta valmistettu puskuri. Puskuri koostuu tiiviistä segmenttilohkoista kuvan 7 mukaisesti. Tarkemmat määrät eri kapseleiden vaatimista puskurilohkoista on esitetty taulukossa 3. Tämän lisäksi puskurin tiivistämiseksi puskurin ja kapselin sekä puskurin ja kallion väliin jäävä rako täytetään granuloidulla bentoniitilla. (Posiva 2021a, 30.)

Taulukko 3. Eri loppusijoituskapseleiden vaatimat puskurilohkomäärät.

Loppusijoitus-kapseli	Puskurilohkokerrok-set kapselin alla	Puskurilohkokerrokset kapselin ympärillä	Puskurilohkokerrokset kapselin päällä
LO 1-2	2	11	8
OL 1-2	2	15	8
OL3	2	16	8

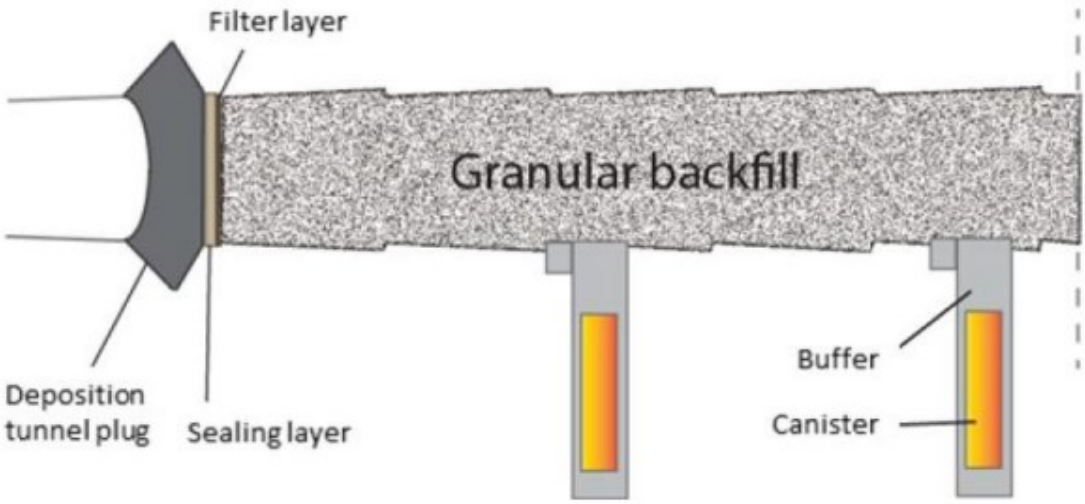
Puskurin tehtävänä on sekä suojata kapselia korroosiota edistävien aineiden kulkeutumiselta kapselin pinnalle ja tarjota kemiallisesti suotuisat olosuhteet kapselille, että johtaa pois kapselin lämpösäteilyä sekä rajoittaa ja hidastaa mahdollisten radionuklidien vapautumista. Puskurille on suunnitteluvaiheessa osoitettu erilaisia vaatimuksia, jotka liittyvät esimerkiksi paisuntapaineeseen, puskurin paksuuteen, lämpötilaan ja kemialliseen koostumukseen. (Posiva 2021a, 23–25.)



Kuva 7. Segmenttilohkoista koottu puskuri. Kapselin kohdalla puskurista asennetaan vain uloimmat rengassegmentit. (Posiva 2021a, 30.)

Kapseleiden ja kapselia ympäröivän puskurin asennuksen jälkeen loppusijoitustunneli täytetään granuloidulla bentoniitilla ja tulpataan (kuva 8). Tunnelin täytön tarkoituksena on pitää kapseli ja puskuri loppusijoitusrei'issä, kun bentoniitti alkaa paisua tunneleissa ja rei'issä olevan kosteuden takia. Tunnelin täytön ja tulppauksen avulla pyritään myös välttämään

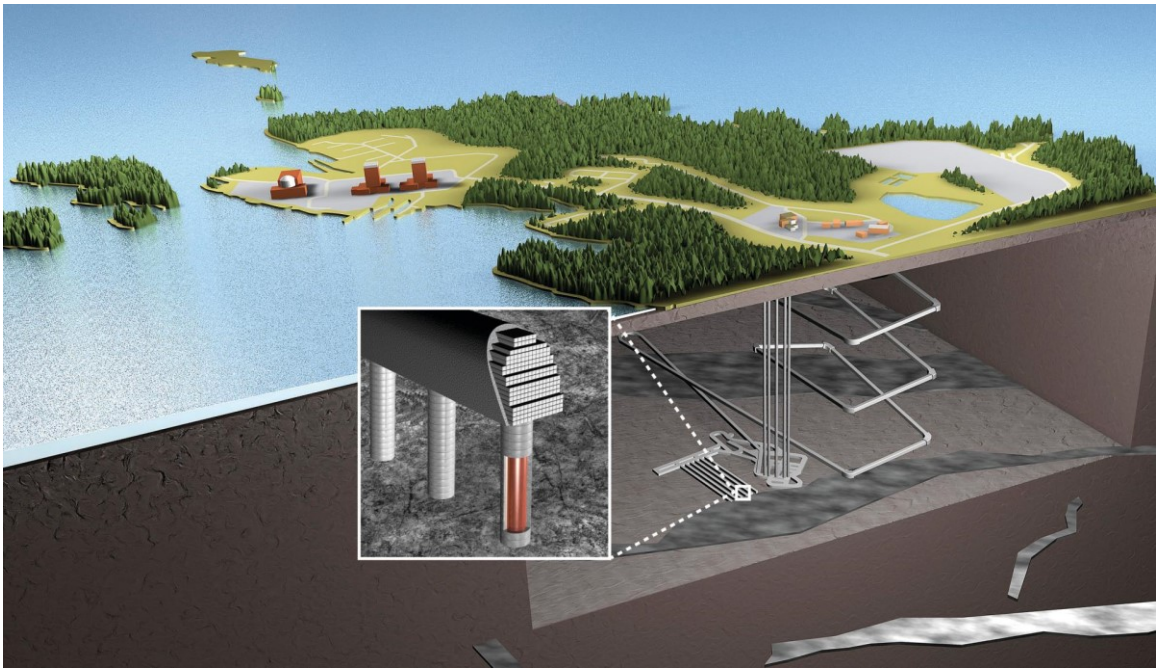
tilannetta, jossa loppusijoitustunneliin muodostuu pohjavedelle suotuisia reittejä. (Posiva 2021a, 25–26.)



Kuva 8. Havainnekuva täytetystä ja tulpatusta loppusijoitustunnelista. Kuvassa näkyvät Kapselit, puskurit, tunnelin täyttö sekä tulppa ja tulpan ja tunnelin täytön väliin tulevat suodatin- ja tiivistekerrokset. (Posiva 2021a, 35.)

2.2.2 Loppusijoituslaitos

Maan alla 400…500 metrin syvyydessä sijaitseva loppusijoituslaitos (kuva 9) jakaantuu kahteen osaan; loppusijoitustiloihin, joka kattaa loppusijoitustunnelit ja loppusijoitusreiät, joihin ydinjätettä sisältävät kapselit loppusijoitetaan, sekä muihin maanalaisiin tiloihin, joita ovat ajotunneli, keskustunnelit, tekniset tilat, pystykuilut ja varaus matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoitustilalle. Loppusijoituslaitos on yhteydessä maan pinnalla sijaitsevaan kapselointilaitokseen kapselikuilun kautta. (Posiva 2021b, 12.)



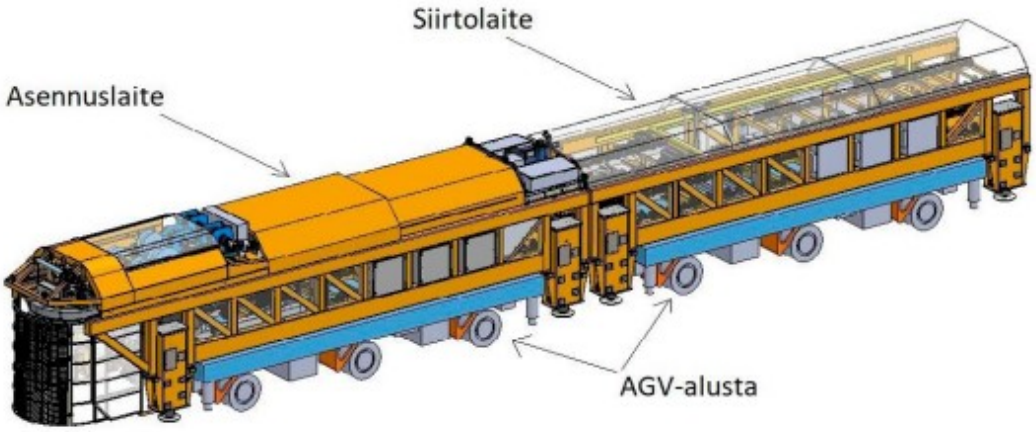
Kuva 9. Posivan loppusijoituslaitos ja kapselointilaitos. Yksityiskohdassa kuvattuna läpileikkaus KBS-3V konseptin mukaisesta loppusijoituksesta. (Posiva 2021b, 98.)

Loppusijoitustunneleiden lattiaan porattavien loppusijoitusreikien halkaisija on 1,75 m ja syvyyden määrittää loppusijoitettava kapseli, jonka koko määräytyy loppusijoitettavan polttoaineen perusteella. Loppusijoitusreiän syvyys on noin 7,8 m OL1-2 kapseleille, 8,3 m OL3 kapseleille ja 6,6 m LO1-2 kapseleille. (Palomäki & Ristimäki, 67.)

Varsinainen loppusijoitusprosessi alkaa, kun käytetyllä ydinpolttoaineella ladatut kapselit on siirretty kapselihissillä loppusijoituslaitoksen varastoon odottamaan loppusijoitusta. Ennen kapselien loppusijoitusta on loppusijoitustunneleihin porattu kapseleita varten loppusijoitusreiät. Loppusijoitusreikien poraukseen käytetään tarkoitukseen kehitettyä porauslaitetta DHBM (Deposition Hole Boring Machine). (Posiva 2021b, 90.)

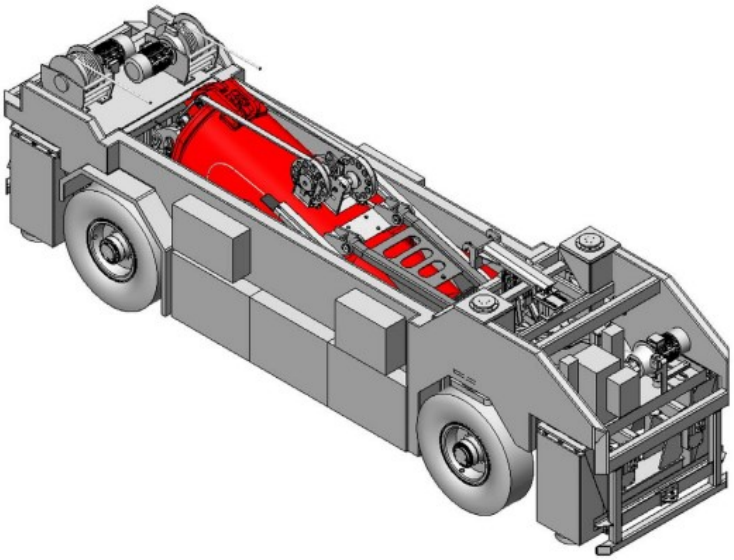
KBS-3 konseptin mukaisesti käytettyä ydinpolttoainetta sisältäviä kapseleita ympäröi bentoniittisavesta valmistettu puskuri. Ennen kapselin asentamista asennetaan loppusijoitusreikään bentoniittipuskurin alalohkot sekä kapselia ympäröivät rengasmaiset lohkorakenteet. Pitempien kapseleiden eli OL1-2 ja OL3 kapseleiden asennusta varten loppusijoitusreiän yläosaan joudutaan tekemään viiste, joka myös täytetään puskurimateriaalilla. Ennen puskuribentoniitin asennusta loppusijoitusreikään, reiät on puhdistettu ja tutkittu, että ne täyttävät niille asetetut kriteerit. Kapselin asennuksen jälkeen puskurin ja kapselin välinen tila

sekä kapselin kannessa oleva tartunnan mahdollistava kolo täytetään granuloidulla bentoniitilla, jonka jälkeen kapselin päälle asennetaan bentoniittilohkot ja bentoniitin ja loppusijoitusreiän välinen tila täytetään granuloidulla bentoniitilla. (Riihimäki 2021, 35–36.) Bentoniittipuskuri asennetaan loppusijoitusreikään kuvassa 10 olevalla BIS-järjestelmällä, eli puskurin asennusjärjestelmällä, joka liikkuu tunnelissa AGV-alustojen avulla (Posiva 2021b, 90–91.)



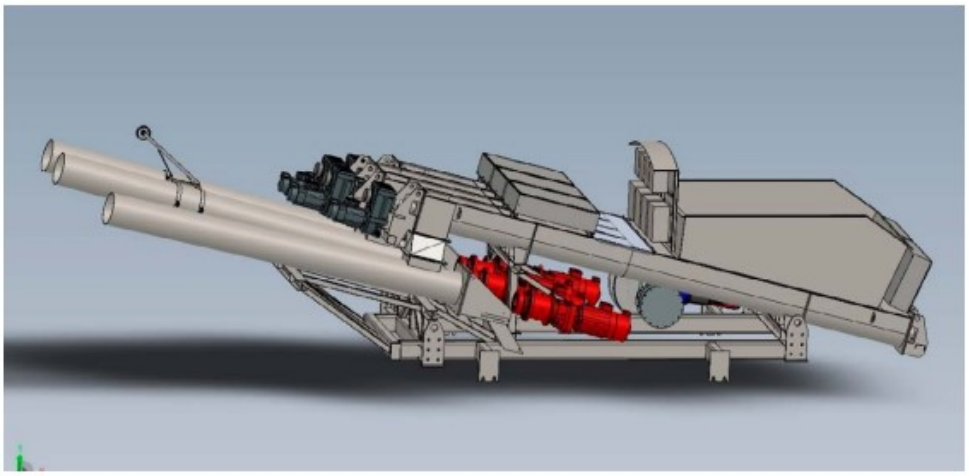
Kuva 10. Puskurilohkojen asennusjärjestelmä (Posiva 2021b, 91).

Kapseli kuljetetaan loppusijoituslaitoksen puskurivarastosta loppusijoitustunneliin ja asennetaan loppusijoitusreikään kuvassa 11 olevalla Kapselin siirto- ja asennusajoneuvolla (KSAA). Laite kuljettaa säteilevän kapselin 150 mm paksusta teräksestä tehdyn suojaputken sisällä, jonka sisustassa on myös neutronisäteilyä absorboiva PE-muovikerros. Laitteessa oleva säteilysuojaputki on vaaka-asennossa laitteen liikkuessa ja se käännetään pystyasentoon, kun kapseli otetaan puskurivarastolta laitteen kyytiin sekä silloin kun kapseli asennetaan loppusijoitusreikään. (Posiva 2021b, 92.)



Kuva 11. Kapselin siirto- ja asennusajoneuvo KSAA. Kuvassa punaisella säteilysuojaputki. (Posiva 2021b, 92.)

Loppusijoituskapseleiden ja bentoniittipuskurin asennuksen jälkeen loppusijoitustunnelit täytetään granuloidulla bentoniitilla. Granuloitu bentoniitti asennetaan tunneliin kuvan 12 mukaisella tunnelitäytön asennuslaitteella (GBIS). Tunnelitäytön tarkoituksena on varmistaa puskurin pysyminen loppusijoitusreiässä. (Posiva 2021b, 91.) Ennen tunnelitäytön asentamista loppusijoitustunnelista puretaan pois kaikki tunnelitekniikka, mutta tunnelin lujitukseen käytetyt kalliopultit ja verkotus jätetään paikalleen. (Riihimäki 2021, 44.)



Kuva 12, Tunnelitäytön asennuslaite GBIS (Posiva 2021b, 91).

Loppusijoitustunnelin täytön jälkeen loppusijoitustunnelit suljetaan harjateräksellä raudoitetulla matalan pH:n teräsbetonitulpalla, jonka päätarkoituksena on pitää tunnelin täyttömateriaali tunnelissa laitoksen toiminnan ajan. Viimeisen kapselin loppusijoituksen jälkeen täytetään loppusijoituslaitoksen loppusijoitustasolla olevat tilat ja laitoksen pystykuilut, myös ajotunneli täytetään. Loppusijoitustunneleiden tulppien edustojen, keskustunneleiden ja niiden välillä sijaitsevien keskustunneliyhteyksien täyttöön käytetään murskeen ja bentoniitin seosta. Ajotunneli ja kuilut täytetään syvyyden mukaan murskeella tai murskeen ja bentoniitin seoksella. Ajotunnelin yläpäähän ja muiden maanpintayhteyksien yläosaan asennetaan pintatulpat. (Posiva 2021b, 302.)

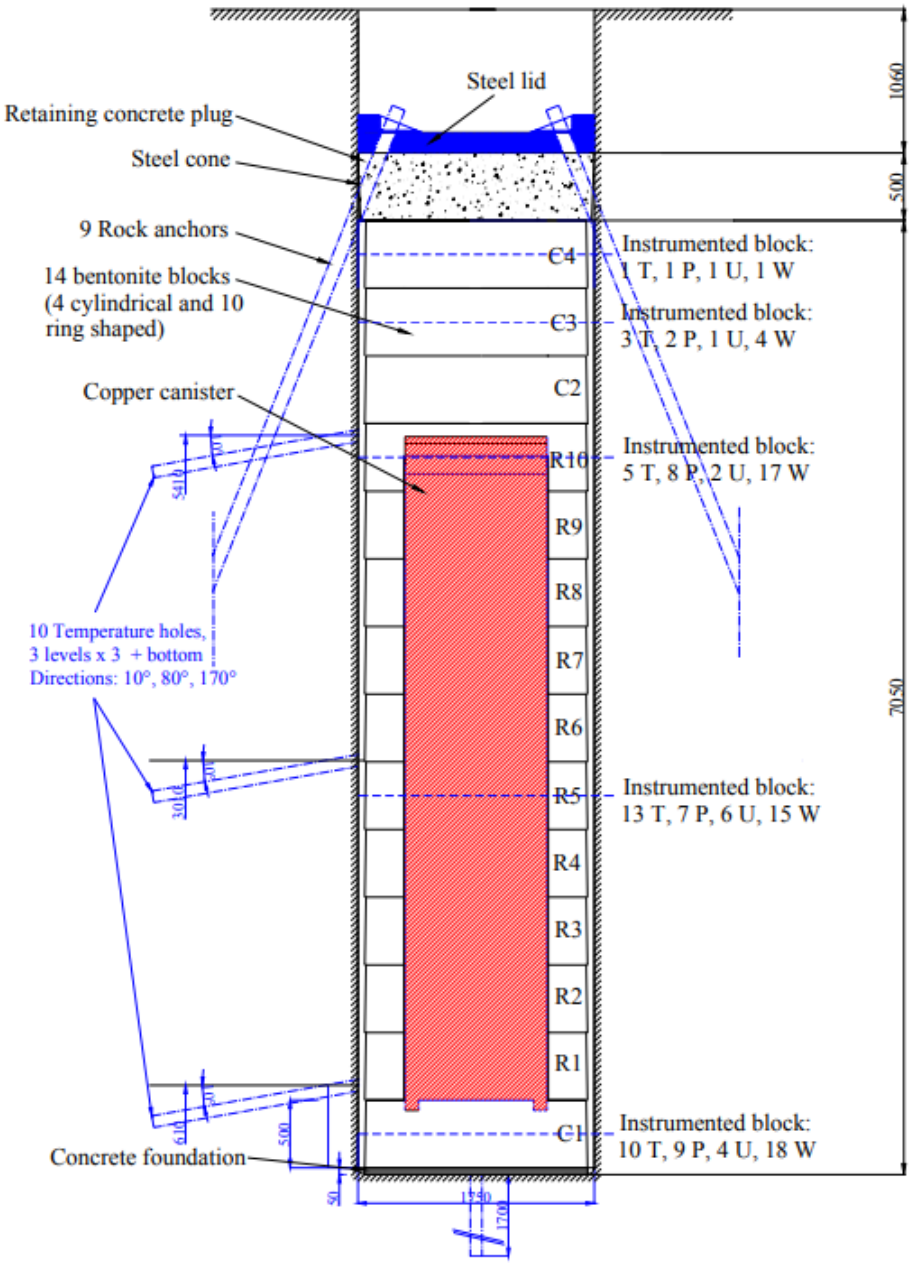
3 Loppusijoituskokeet

Posivan loppusijoituskonseptia on testattu ennen varsinaisen tuotannon alkamista. Yksittäiset järjestelmät on koestettu erikseen, ja osaa järjestelmistä on testattu myös yhdessä. Loppusijoituskapselin palautuskokeen kannalta olennaisimmat kokeet ovat ruotsalaisen SKB:n toteuttama CRT-koe (Canister Retrieval Test) jossa saturoitunut bentoniitti ja täysimittainen kapseli poistettiin koeloppusijoitusreiästä sekä Posivan FISST-koe (Full Scale In Situ System Test), jossa kaksi täysimittaista kuparikapselia asennettiin prototyyppilaitteilla loppusijoitussyvyydessä oleviin demonstraatiotiloihin. (Eng 2008,11; Posiva 2020.) Ennen Posivan loppusijoituslaitoksen käyttöönottoa tullaan vielä suorittamaan Yhteistoimintakoe (YTK), jossa tehdään loppusijoituskoe tuotannon kaltaisin menetelmin tuotantokalustolla ja -organisaatiolla (Posiva 2020).

3.1 Kapselin palautus loppusijoitusreiästä (CRT)

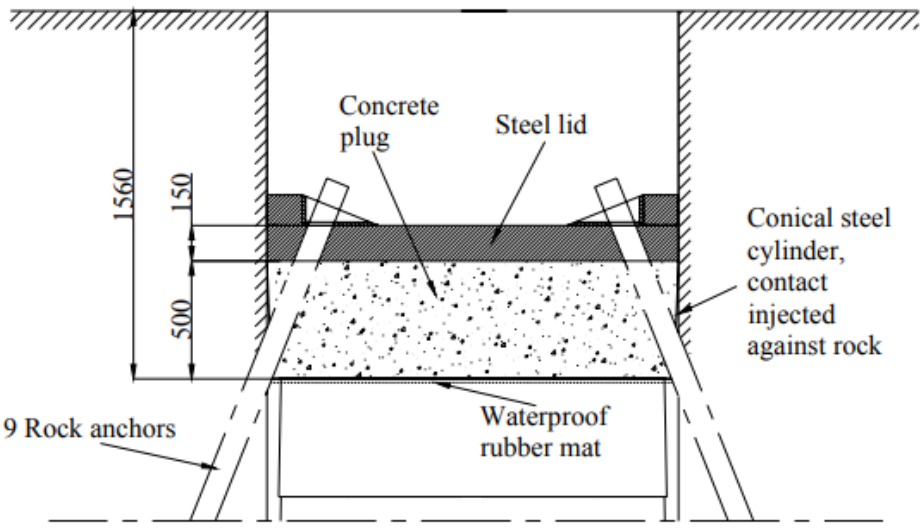
Ruotsalaisen SKB:n CRT-kokeen pääasiallisena tavoitteena oli poistaa täysimittainen loppusijoituskapseli loppusijoitusreiästä täysin saturoituneesta bentoniittipuskurista. Tämän lisäksi kokeen tarkoituksena oli todentaa puskurin saturoitumista kuvaava matemaattinen malli, sekä löytää selitys käytetyn ydinpolttoaineen lämpösäteilyä simuloivan lämmittimen toimintahäiriölle. (Eng 2008, 11.)

Koe suoritettiin SKB:n Äspö Hard Rock Laboratoryssa 420 metrin syvyydessä sijaitsevassa demotunnelissa. Puskuri ja instrumentoitu kapseli asennettiin koeloppusijoitusreikään kuvan 13 osoittamalla tavalla, ja reikä suljettiin teräslevystä ja betonista tehdyllä tulpalla. Kapselin pinnan lämpötila pyrittiin pitämään 90°C:ssa. Lisäksi puskurille tuotiin vettä kastelumattojen avulla läheisestä kairareiästä. (Eng 2008, 11–13.) SKB:n suorittamassa testissä puskuri koostui kokonaisista lohkoista ja renkaista Posivan tämänhetkisen segmenttilohkoista ja segmenttirenkaista koostuvan puskurin sijaan.



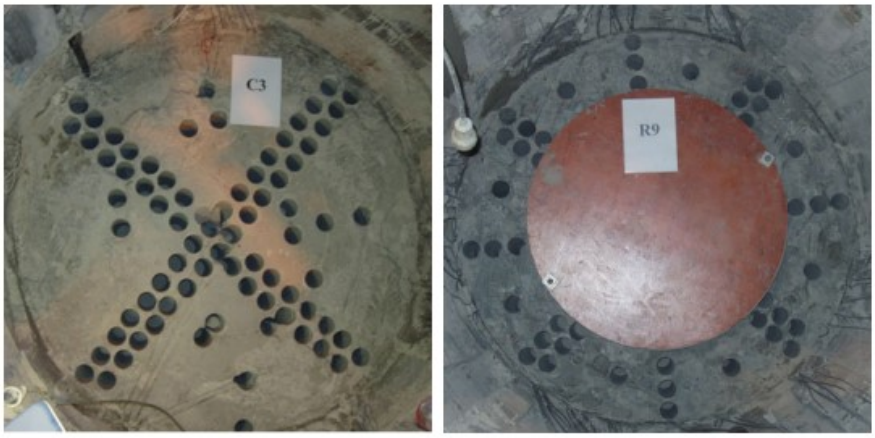
Kuva 13. Poikkileikkaus SKB:n CRT-kokeen kapselin asennuksesta ja instrumentoinnista (Eng 2008, 13).

Kapselin palautus prosessi CRT-kokeessa alkoi sillä, että kapselin lämmittimen virta katkaistiin, jotta puskurin lämpötila saatiin laskettua noin 50°C:sta 26°C:een. Puskurin viilennyttyä, poistettiin puskurin päältä teräslevystä ja betonista koostuva tulppa (kuva 14), sekä tulpan alla puskuria suojannut kumimatto. (Eng 2008, 15–19.)



Kuva 14. Poikkileikkaus SKB:n CRT-kokeen loppusijoitusreiän tulppauksesta (Eng 2008, 17).

Tulpan poiston jälkeen yläosa puskurista, puskurin päällä olevat lohkot ja puskuria ympäröivät bentoniittirenkaat noin kapselin puoleen väliin saakka, poistettiin manuaalisesti bentoniittinäytteiden oton jälkeen (Eng 2008, 37). Näytteet otettiin poraamalla ydinporalla bentoniittilohkon pinnasta, jolloin poistettavan lohkon pintaan jäi 50 mm halkaisijaltaan olevia reikiä (kuva 15), minkä takia manuaalisesti poistettavat lohkot olivat neljässä osassa (Eng 2008, 21).



Kuva 15. Puskuri ydinporalla otettujen näytteiden jälkeen (Eng 2008, 22).

Alaosa puskurista poistettiin liettämällä. Bentoniittipuskurin liettäminen tapahtuu käyttämällä 4 % vahvuista Kalsiumkloridiliuosta. Suolaliuos pumpataan loppusijoitusreikään ja liettämistä avustetaan käyttämällä sekoittimia, tämän jälkeen liete pumpataan ulos loppusijoitusreiästä. Prosessi on jatkuva, sillä reiästä poistuva liete korvataan uudella suolaliuoksella. Myös yläosa puskurista poistettaisiin liettämällä, kun tarvetta näytteille ei ole. (Eng 2008, 37.)

Kun puskuria oli saatu poistettua loppusijoitusreiästä 656 kg, poistettiin reiästä myös loppusijoituskapseli. Kapseli poistettiin samalla laitteistolla, millä kapselin sijoitus toteutettiin kokeen alkaessa. SKB:n toteuttamalla CRT-kokeella onnistuttiin osoittamaan, että bentoniittipuskurin poistaminen liettämällä onnistuu, samoin kuin kapselin palauttaminen loppusijoitusreiästä kapselin asennuslaitteistolla. Laskennallinen aika kokeen perusteella koko puskurin poistoon liettämällä on 180 tuntia. (Eng 2008, 42,45.)

3.2 Täyden mittakaavan loppusijoituskoe (FISST)

Posivan tekemä täyden mittakaavan loppusijoituskoe FISST (Full Scale In Situ System Test) toteutettiin tavoitteena toteuttaa KBS-3V konseptin mukainen loppusijoituskoe, jossa käytetyt materiaalit olivat pääosin silloisen referenssin mukaisia. Kokeessa käytetyt komponentit ja prototyyppilaitteet ovat OL1-2 mitoituksen mukaisia. Kokeessa ONKALOn demonstraatiotunneliin asennettiin kaksi lämmitettävää kuparikapselia, kaksi toisistaan poikkeavaa puskuria, noin 50 m tunnelitäyttöä ja loppusijoitustunnelin tulppa. Komponentit on instrumentoitu, jotta EBS-komponenttien seuranta on mahdollista. (Rantamäki & Hansen & Niskanen & Mustonen. 2022. 5–6.)

FISST-koe on jaettu kolmeen eri vaiheeseen, ensimmäinen vaihe on suunnittelu ja rakentaminen, jonka puitteissa asennettiin EBS-komponentit ja koe otetiin käyttöön. Tämä vaihe toteutettiin 2016–2019. FISST-kokeen toinen vaihe on kokeen käyttö ja seuranta, joka on parhaillaan käynnissä ja kolmas vaihe tulee olemaan kokeen purkaminen. Purkamista ei tulla suorittamaan ennen käyttötoiminnan aloittamista. (Rantamäki et al. 2022, 6.)

Asennetut puskurit poikkesivat toisistaan siten, että toiseen loppusijoitusreikään asennettu puskuri on nykyisen konseptin mukainen segmenteistä koostuva puskuri, ja toinen yhtenäisistä isostaattisesti muotoon puristetuista lohkoista. Isostaattisesti puristetut lohkot ovat joko

umpinaisia lieriöitä tai renkaita. Puskurikomponentteja jouduttiin jonkin veran muokkaamaan instrumentoinnin takia. Tunnelin täyttö tehtiin nykyisestä konseptista poiketen bentoniittilohkoilla ja lohkorintaman yläpuolelle ja sivuille jäävä osa täytettiin bentoniittipelleteillä. (Rantamäki et al. 2022, 25, 52–53.)

3.3 Yhteistoimintakoe

Yhteistoimintakoe, myöhemmin YTK, on osa loppusijoituksen koekäyttöä. Yhteistoimintakoe koostuu pienimuotoisesta loppusijoituksesta lopullisilla ohjeilla, organisaatiolla ja laitteilla varsinaista loppusijoitusta vastaavissa oloissa. Erona varsinaiseen loppusijoitukseen on se, että loppusijoituskapseleissa ei ole säteilyn lähdettä, eli varsinaista käytettyä ydinpolttoainetta. (Posiva Oy 2020.)

YTK on osa Posivan tuotantoon valmistautuminen (TUVA) -ohjelmaa ja sen suorittaminen onnistuneesti voidaan laskea osaksi laitosten käyttöönottoa. Onnistunutta yhteistoimintakoetta seuraa polttoaineen siirtosäiliön kannen avauslupa ja tuotannon ylös ajo, jolloin siirrytään säteilevää polttoainetta sisältävien kapselien loppusijoitukseen. Osana yhteistoimintakoetta suoritetaan kapselin palautuskoe. (Rantamäki 2021, 4.)

4 Kapselin palautus

Kapselin palautukselle on useita vaatimuksia. Valtioneuvoston päätöksessä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuudesta 3 luvun 7§ 2 momentissa sanotaan; ”Loppusijoitus tulee suunnitella siten, että pitkäaikaisturvallisuuden varmistaminen ei edellytä loppusijoituspaikan valvontaa ja että loppusijoitustila on avattavissa, mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen tarkoituksenmukaiseksi”. Kapselin palauttamista maan pinnalle on selvitetty jo Posivan hakiessa periaatepäätöstä ydinlaitoksen rakentamiseksi. Loppusijoituskapselin palauttaminen, samoilla järjestelmillä kuin loppusijoittaminen, on todettu teoriassa mahdolliseksi ennen loppusijoitusreiän sulkemista, jolloin kapselin päällä ei vielä ole suojaavaa bentoniittikerrosta. Tässä tapauksessa kapseli voidaan nostaa loppusijoitusreiästä takaisin kapselin asennusajoneuvon kyytiin ja palauttaa kapselointilaitokseen. (Saanio & Raiko 1999, 11–13.)

Kapseli voidaan poistaa loppusijoitustunnelin sulkemisen ja tulppaamisen jälkeen. Tällöin tulee kiinnittää huomiota kapselin tartuntapinnan puhtauteen ja siihen, ettei kapseliin ole tarttunut niin paljon bentoniittia, että se ei mahtuisi enää asennusajoneuvon säteilysuojan sisään. Kapselin palautus voidaan toteuttaa myös kaikkien loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen samoin tekniikoin kuin tunnelin sulkemisen jälkeen. Tällöin voidaan olettaa, ettei kapselointilaitos ole enää käytössä ja kapselit kuljetetaan avaamattomina pois laitosalueelta. (Saanio & Raiko 1999, 30–31,37.)

Posivan 2015 jätetyssä rakentamislupahakemuksen liitteessä 17 todetaan kapselin palautettavuuden olevan mahdollista ja keskitytään kapselin palautukseen loppusijoitusreiästä, samoin kuin aiemmassa periaatepäätöksessä. Tämän lisäksi hakemuksessa kerrotaan ruotsalaisen SKB:n CRT-kokeesta, joka on tarkemmin tämän työn kappaleessa 3.1. Rakennusluvassa mainitaan myös toimitettavaksi päivitetty selvitys käytetyn ydinpolttoaineen palautettavuudesta käyttölupahakemuksen yhteydessä. (Posiva 2021b, 11.) Posivan 2021 käyttölupahakemuksessa kapselin palautusprosessin kuvausta on täydennetty kappaleella kapselin avaamisesta ja polttoaineen palauttamisesta. Käyttölupahakemuksessa mainitaan, että polttoaineen poistaminen kapselista voidaan toteuttaa kapselointilaitoksella, jossa kapselin yläpää koneistetaan auki ja polttoaineniput poistetaan kapselista käsittelykammiossa. Palauttaminen testataan yhteistoimintakokeessa ennen käytön aloittamista. (Posiva 2021b, 308.)

4.1 Kapselin palautuskoe

Yhteistoimintakokeen yhteydessä tehdään kapselin palautuskoe, jossa ei säteilevillä harjoitusnipuilla ladattu ja kiinnihitsattu kapseli palautetaan loppusijoituslaitoksen kapselivarastosta kapselointilaitokselle, koneistetaan auki ja harjoitusniput poistetaan hallitusti (Rantamäki 2021, 8). Kuten aiemmin on todettu, kapselin palauttaminen on teknisesti mahdollista kaikissa loppusijoitusprosessin vaiheissa, mutta palautettavuus ei ole ollut loppusijoitussuunnitelmien erityisenä lähtökohtana. Kapseleiden palautettavuutta ja sen teknisiä ratkaisuja voidaan arvioida loppusijoitustoiminnan piirteitä tarkastelemalla ja näin on tehty loppusijoitusreiästä palauttamista tutkittaessa. (Posiva Oy 2021b, 301.)

Ennen kapselin palautuskoetta on syytä tehdä joitakin yksittäisiä kokeita sekä yksittäisille järjestelmille että järjestelmien rajapinnoille järjestelmien koekäyttöjen yhteydessä. Tunnistettuja mahdollisia haasteita kapselin palautusprosessissa kapselointilaitoksessa on pääasiassa järjestelmien rajapinnoissa, joita suunniteltaessa ei ole erityisesti keskitytty kapselin palautukseen.

4.1.1 Palautusprosessin kulku

Posivan yhteistoimintakokeen yhteydessä suoritettava kapselin palautuskoe alkaa tilanteesta, jossa kapseli on paletin päällä maanalaisen loppusijoituslaitoksen varastossa. Loppusijoituslaitoksen puskurivarastosta paletin päällä oleva kapseli siirretään automatisoidulla kapselitrukilla kapselihissiin, jolla se nostetaan maanpäälliseen kapselointilaitokseen. Kapselihissin saavuttua maan pinnalle, paletin päällä oleva kapseli siirretään jälleen siirtotrukilla kapselointilaitoksen varastoon. Vaihtoehtoisesti kapseli voidaan siirtää suoraan kapselin kannatinlaitteen läheisyyteen.

Kannatinlaitteen tehtävänä on kapselointiprosessin aikana siirtää kapseli siirtovaunusta paletille. Kannatinlaite on varustettu vastaavalla kapselin kanteen kohdistuvalla tarttujalla kuin kapselin siirto ja asennusajoneuvo. Palautustilanteessa tarttuja kohdistetaan paletin päällä olevan kapselin kanteen ja kapseli nostetaan paletilta siirtovaunuun. Siirtovaunu siirtää kapselin koneistusaseman alapuolelle ja kapseli nostetaan ja tuetaan koneistusasemaan.

Koneistusasema sijaitsee kapselointilaitoksen hitsauskammiossa ja kammio on varustettu siltanosturilla. Siltanosturiin kiinnitetään kapselin kanteen sopiva nostoapuväline, jotta kuparikansi voidaan koneistaa irti turvallisesti. Tämän jälkeen kapselin kansi koneistetaan irti rungosta kapselointilaitoksessa sijaitsevassa koneistusasemassa ja kapselirungon yläreunaan koneistetaan viiste. Kannen irrotuksen jälkeen kapselin yläosa imuroidaan koneistuksen jäljiltä ja kapseli siirretään polttoaineen käsittelykammion alle ja nostetaan kapselille tarkoitettuun telakointiasemaan. Telakointiasemassa kapselille tarkoitettu läpivienti tiivistetään ja kapselin sisäosan kansi avataan. Polttoaineniput, palautuskokeen kohdalla harjoitusniput, poistetaan kapselista kuivausasemaan ja sisäosan kansi suljetaan. Sisäosan kannen avaus ja uudelleen sulku toimii samoin kuin kapselointiprosessin aikana.

Polttoainenipuista tyhjennetty kapseli siirretään siirtovaunun avulla kapseliosien nostoaukolle ja nostetaan kapselin nosto- ja siirtokehyksen avulla kapseliosien vastaanottotilaan. Tämän jälkeen irrotettu kuparikansi haetaan kapselin siirtovaunulla koneistusasemasta ja se palautetaan kapseliosien vastaanottotilaan. Kapselin palautusprosessista tehtiin tämän opinnäytetyön pohjalta vuokaaviomallinen ohje (Liite 1).

4.1.2 Mahdolliset haasteet palautusprosessissa

Mahdollisia haasteita kapselin palautusprosessissa aiheuttavat eri järjestelmien rajapinnat, sillä suunnittelussa ei ole erityisesti keskitytty kapselin palautettavuuteen. Mahdollisiksi haasteiksi on tunnistettu kannatinlaitteen tarttujan kohdistaminen paletilla olevaan kapseliin, kapselin asento siirtovaunussa ja kapselin tiivistäminen polttoaineen käsittelykammion aukolle. Mahdolliset ongelmat on havaittu kapselointilaitoksen järjestelmävastaavien haastatteluissa.

Kapselin siirto kannatinlaitteella paletilta siirtovaunuun saattaa aiheuttaa tarttujan kohdentamiseen liittyviä ongelmia. Kannatinlaite on ohjelmoitu siten, että kapselointiprosessin aikana tarttuja siirtyy aina samaan paikkaan ja siirtovaunu ja paletti on ohjelmoitu tuotavaksi aina samaan paikkaan. Mikäli kapseli on siirtynyt paletilla ollessaan, saattaa tarttujan kohdentaminen kapselin yläosaan epäonnistua. Kapselin kannatinlaiteessa oleva tarttuja liikkuu ainoastaan x- ja y-akseleilla, eikä sillä näin ollen ole käytössään kaikkia vapausasteita. Kapselin palautuskokeessa kapselin ei oleteta siirtyvän paletilta, jolloin tartuntaongelman ei tulisi ilmetä. (Paajanen 16.9.2022.)

Kapselin asento siirtovaunussa on potentiaalinen ongelma, mikäli ennakkoon ei ole tiedossa palautettavan kapselin asentoa kapselointiprosessin aikana tai jos palautettava kapseli on liikkunut paletilta sen kapselointilaitokselta poistumisen jälkeen. Tämä johtuu siitä, että kapselin yläpää tulee säätää mahdollisimman tarkasti siirtovaunun nostoliikkeen teoreettiselle keskilinjalle, joka on asennuksen yhteydessä asemoitu kapselointilaitoksen työasemien keskilinjoille. Tämä todetaan siirtovaunun pyörityspöydän avulla kapselointiprosessin alkuvaiheessa. Palautussekvenssin aikana kapselia tulee ensin nostaa kohti koneistusaseman ja polttoaineen käsittelykammion aukkoa, jotta kapselin yläosa varmasti saadaan telakoitua (Jokiranta 21.9.2022.)

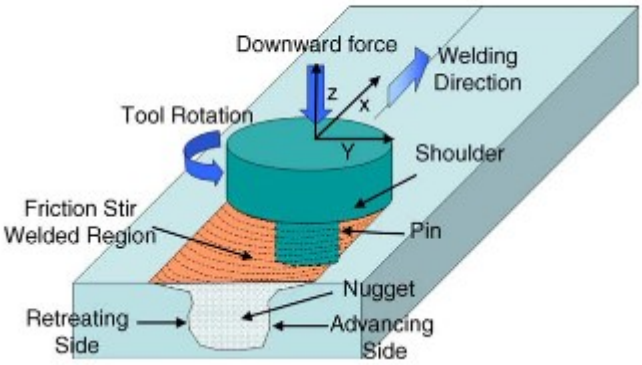
Avatun kapselin telakoinnin ja tiivistämisen polttoaineen käsittelykammion aukolle on ajateltu aiheuttavan ongelmia, sillä avatun kapselin koneistettu yläreunan särmä on erittäin terävä ja lisäksi kapseli on lyhyempi kuin ehjä ladattu kapseli. Telakoinnin tiivisteiden rikkoutumista palautusprosessissa on pyritty välttämään koneistamalla avatun kapselin ulkoreunaan viiste. (Tamminen 19.9.2022.)

5 Kuparikapselin kannen kiinnitys ja irrotus

Kuparikapselin kansi kiinnitetään hitsaamalla käyttäen kitkatappihitsausta, eli FSW-hitsausta. Valittu menetelmä muodostaa liitossauman siten, että sauman eheys vastaa kapselin eheyttä. Mikäli kapseli joudutaan palauttamaan kapselointilaitoksen ollessa toiminnassa, kuparikansi voidaan irrottaa kapselista kapselointilaitoksen koneistusasemassa (Posiva 2021b, 90; 308.)

5.1 Kuparikapselin kannen kiinnitys hitsaamalla

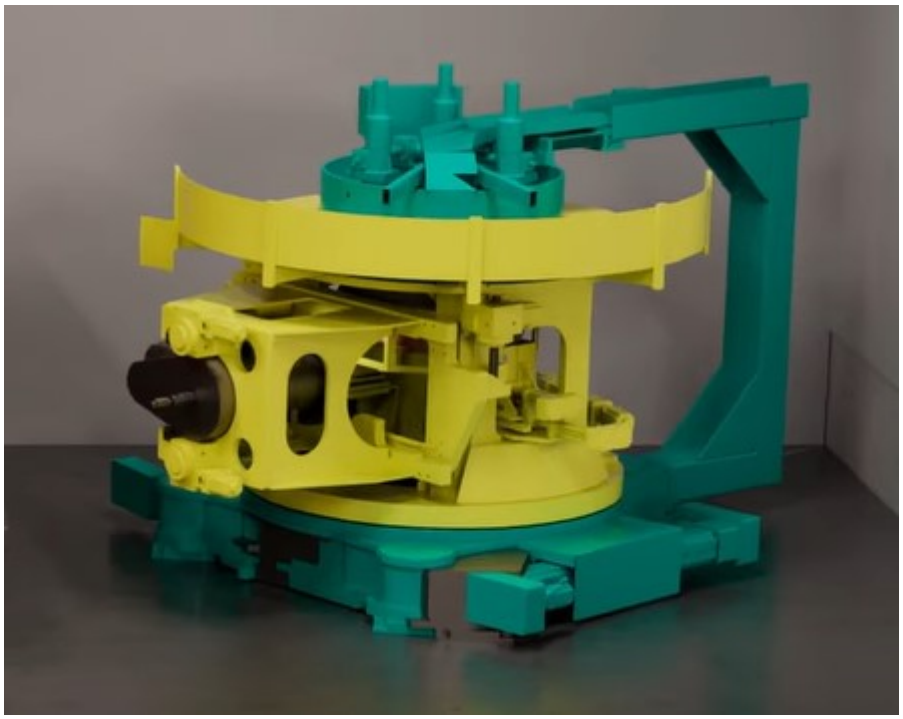
FSW-hitsaus (kuva 16) perustuu hitsattavan materiaalin kuumamuokkaukseen. Hitsaustekniikka perustuu suurella nopeudella liitettäviä kappaleita vasten pyörivän hitsaustyökalun luomaan kitkaan sekä työstettävien kappaleiden liikkeeseen sauman luomiseksi. Kitkan aiheuttama paikallinen materiaalin kuumeneminen hitsaustyökalun ympärillä johtaa hitsattavan materiaalin plastiseen muodonmuutokseen. Hitsaussauma syntyy, kun erityisesti tarkoitukseen suunniteltu hitsaustyökalu siirtää jähmeässä tilassa olevaa materiaalia työkalun edestä työkalun taakse. Hitsausprosessin tuloksena saatavalla sauman mikrorakenteella on hyvät mekaaniset ominaisuudet. (Mishra & Ma 2005, 1–2.)



Kuva 16. Kuvaus FSW-hitsauksen toimintaperiaatteesta (Mirshra & Ma 2005, 2).

Loppusijoituskapselin ja kannen materiaaliksi on valittu hapeton kupari. Hapeton kupari on materiaalina sitkeää ja sen hitsattavuus on hyvä. Hapeton kupari sopii hyvin kitkahitsaukseen, sillä kitkan aiheuttaman lämmön vaikutusalue on kapea ja sauman ominaisuudet ovat erinomaiset hitsiaineen pienen raekoon ja suuntautumattoman raerakenteen ansiosta. (Castner et al. 1997, 7;13–17.) Kapselin sulkuhitsin tulee kestää normaalitilanteessa niin kapselin loppusijoitus kuin paisuvan bentoniitin aiheuttamat voimat (Jonsson et al. 2018, 10).

Posivan kapselointilaitoksessa kapselin kuparikannen hitsaus suoritetaan tarkoitukseen erityisesti suunnitellulla hitsauskoneella (kuva 17). Hitsauskoneella sekä asetetaan kuparikapselin kansi paikoilleen, että hitsataan se kiinni FSW-menetelmällä. Hitsaus suoritetaan inertissä kaasukehässä. Hitsausjärjestelmällä on kolme pääasiallista tehtävää; Kapselin siirtovaunun kanssa yhteistyössä tehtävä kapselin kannen siirto hitsausasemaan oikeassa asennossa, kapselin oikean asennon varmistaminen ja kannen kiinnitys kapseliin. Hitsauslaite on EYT-laite, eli se ei ole ydinteknisesti turvaluokiteltu järjestelmä. (Kajander 2021a, 4, 30.)



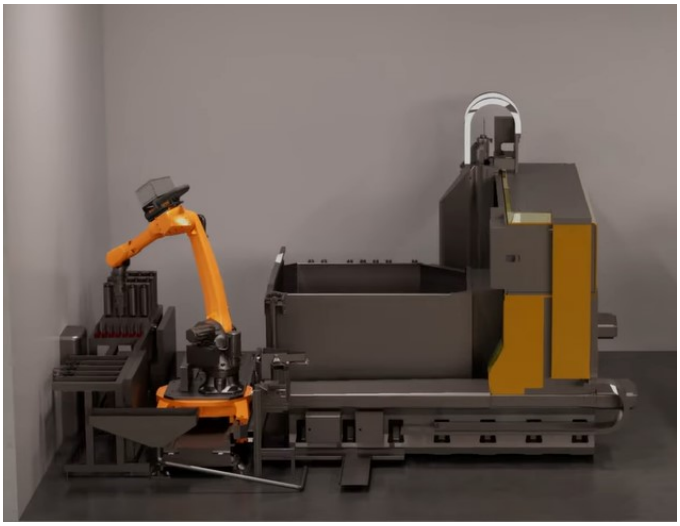
Kuva 17. Posivan kapselointia varten suunniteltu ja valmistettu kitkatappihitsausasema (Posiva 2023).

5.2 Kuparikapselin kannen irrotus koneistamalla

Kuparit ja kupariseokset jaetaan lastuttavuuden perusteella kolmeen luokkaan. Luokan yksi kupariseokset tuottavat koneistettaessa pieniä lastuja, luokan kaksi pidempiä, mutta hauraita lastuja ja luokan kolme, tyypillisesti puhtaat, kuparit tuottavat koneistettaessa pitkiä ja materiaalin sitkeyden takia huonosti katkeavia lastuja. (Davis 2001, 265.) Loppusijoituskapselin happivapaa kupari kuuluu kolmanteen luokkaan.

5.2.1 Koneistusasema

Posivan kapselointilaitoksessa hitsausaseman vieressä olevan koneistusaseman (kuva 18) pääasiallinen tehtävä on kapselin sulkemishitsin koneistus, mutta koneistusaseman laitteistokokonaisuuteen kuuluu myös kapselin sulkemishitsin tarkastuslaitteiden instrumentteja, sillä kapselin hitsille tehtävät visuaalinen, pyörrevirta- ja ultraäänitarkastus tehdään koneistusasemassa sen laitteita hyväksi käyttäen. Kapselin koneistuksella tarkoitetaan sitä, että hitsauksen jälkeen kapselin yläosa koneistetaan lopulliseen muotoonsa niin, että kapselin mitat ja pinnanlaadut saadaan viimeisteltyä lopulliseen muotoonsa ja kannen hitsaussauma on mahdollista tutkia aiemmin mainituilla rikkomattomilla menetelmillä. Koneistusasemassa suoritetaan myös kapselin kannen irti koneistus siihen tarkoitetulla jyrsinpäällä (kuva 19). (Kajander 2021b, 4.)



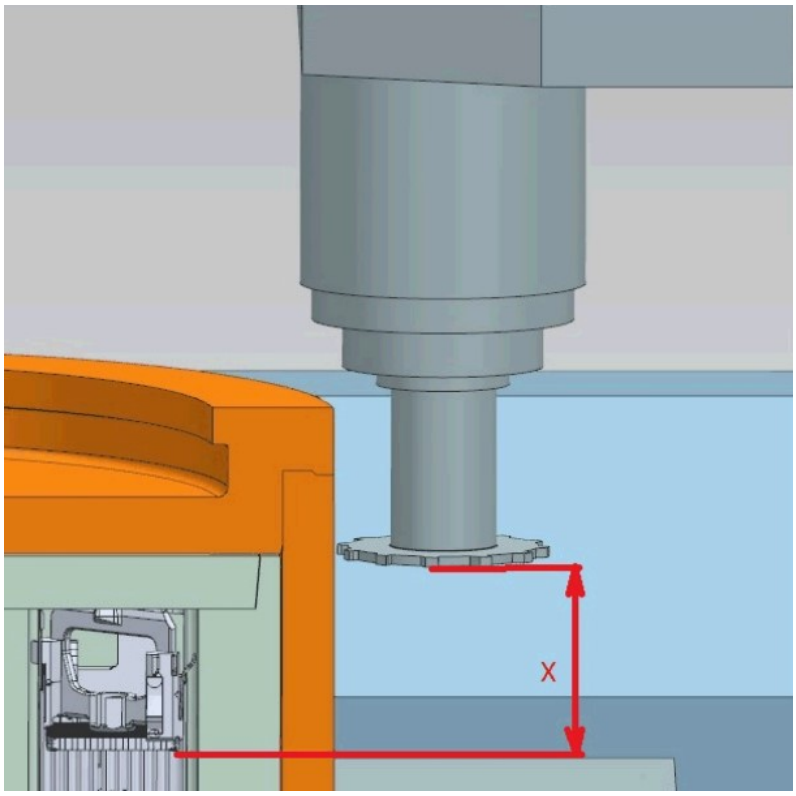
Kuva 18. Koneistusasema ja sen yhteydessä oleva etäohjattu robotti (Posiva Oy, 2023).

Kuva 19. Kapselin kuparikannen irrotukseen soveltuva jyrsinterä.

Koneistusasemassa varsinainen kapselin koneistus suoritetaan koneistuskeskuksen avulla, joka koostuu rungosta, pysty- ja vaakaliikkeen mahdollistavista liikeakseleista ja karasta. Koneistuskeskus pystyy suorittamaan koneistustyökalun vaihdon automaattisesti ja siten säteilyturvallisesti. Koneistustyökalut asennetaan valmiiksi keskuksessa olevaan telineeseen, kun koneistusasemassa ei ole kapselia. Kapselin yläpää nostetaan kapselin siirtokäytävästä koneistusasemaan kapselin siirtovaunun avulla. (Kajander 2021b, 13.)

Koneistusasemaan liittyy läheisesti lastunpoistolaitteisto. Laitteiston tehtävänä on estää lastujen leviäminen mahdollisimman tehokkaasti. Lastunpoistolaitteisto koostuu koneistuskeskuksen runkorakenteen kaukalosta, imusuuttimesta, imu- ja paluuputkilinjasta sekä imu- ja suodatinyksiköstä. Laitteiston avulla alipainetta käyttäen lastut imetään suodatinyksikön lastusäiliöön. Imusuutinta käsitellään teollisuusrobotilla. Lastunpoistolaitteisto siirtää syntyvät koneistuslastut kapselointilaitoksessa sijaitsevaan kuljetussäiliön vastaanottotilaan. (Kajander 2021b, 14.)

Kapselin kuparikannen irti koneistuksen tapauksessa koneistusasemaan on mietitty säteily-turvallisuuden näkökulmasta erilaisia ratkaisuja. Tilanteessa, jossa kapseli joudutaan palauttamaan ja purkamaan, kapselin kuparisen kannen poiston jälkeen järjestelmässä on kapseli, jonka sisäosan rautakansi on edelleen paikallaan ja kapselin geometria pitää polttoaineen alikriittisenä. Radioaktiivisten aineiden hallintaan liittyvistä laitoksen turvallisuustoiminnoista on johdettu rakenteellinen ratkaisu, jonka mukaan laitteen rakenteiden on rajoitettava laitteen työtilaa niin, ettei koneistustyökalulla voi yltää loppusijoituskapselin rautaiseen sisäosaan (kuva 20). Rakenteellisella ratkaisulla ehkäistään kapselin sisäosan tiiveyden vaarantuminen ja siten polttoaineen vaurioitumisen mahdollisuus esimerkiksi laitteen toimintahäiriön seurauksena. (Kajander 2021b, 5.)



Kuva 20. Periaatekuvassa koneistuskeskuksen jyrsintyökalu työalueen alimmassa asemassa (Kajander 2021b, 5).

5.2.2 Kannen irrotuskoe koneistusasemassa

Osana Posivan kapselointilaitoksen koneistusaseman tehdas-, eli FAT-testejä (Factory Acceptance test) suoritettiin kuparikapselin kannen irti koneistus. Kokeessa käytettiin ns. kapselitumppia, eli normaalista kapselin pituudesta huomattavasti lyhyempää, mutta ympärysmitaltaan määrämittaista kapselin yläosaa simuloivaa testikappaletta, jossa on myös kiinni hitsattu kansi. Testikappaleessa ei ollut rautaista sisäosaa.

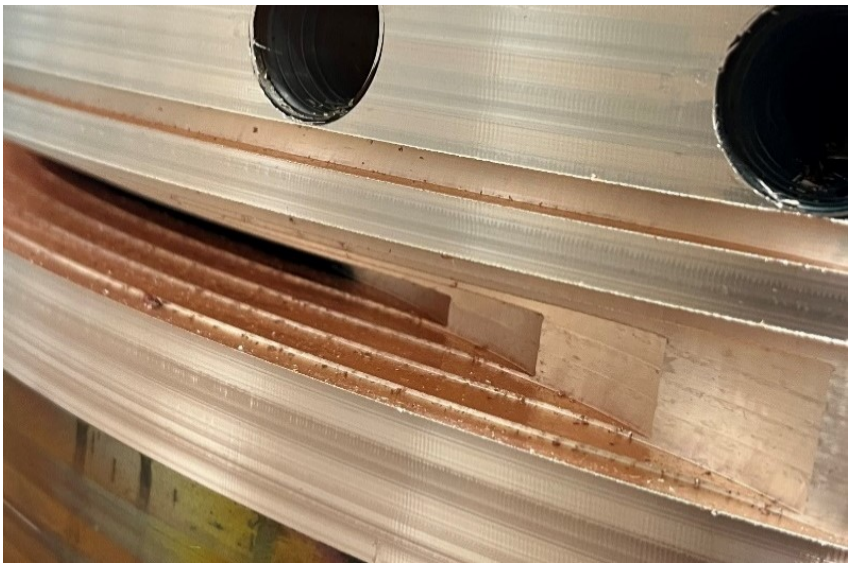
Testi koostui kahdesta varsinaisesta vaiheesta, joilla simuloitiin myös todellisessa tilanteessa tehtävää hitsaussekvenssiä. Ensimmäisessä vaiheessa kapselin kansi koneistettiin irti ¾ matkalta, tämän jälkeen kanteen kiinnitettiin nostoapulaite ja kansi koneistettiin kokonaan irti ja nostettiin pois kapselin päältä. Testissä myös varmistettiin, että täysin mekaaninen kannen nostoapulaite (kuva 21) saatiin irrotettua kannesta koneistusaseman yhteydessä olevan robottikäden avulla ilman ihmiskontaktia. (Posiva 2022b.)

Kuva 21. Mekaaninen nostoapulaite ja irti koneistettu kuparikapselin kansi.

Mikäli kapseli pitää purkaa, joudutaan kansi koneistamaan irti kapselista. Siltanosturissa roikkuvalla kannen nostoapulaitteella tartutaan kuparikanteen ja kannatellaan kapselista irti koneistettavaa osuutta koneistuksen ajan. Nostoapuväline on varustettu osoitinlaitteella, jonka avulla pystytään toteamaan kuormitus kannatustilanteessa kannen ja siltanosturin välissä. (Kajander 2021b, 14.)

Kannen irrotukseen käytetyt työkalut ja menetelmät on määritetty dokumentissa ”Lastuavat työkalut ja menetelmät” (2020). Koneistuskeskuksen työstöpäänä kantta irti koneistaessa käytetään kiekkojyrsintä, jonka urasyvyys on n. 55 mm. Kansi koneistetaan tavalla, jossa kapselin vaipan läpi edetään vastajyrsinnällä portaittain, tehden samalla tilaa seuraavalle jyrsinnälle. Etenemän seurauksena on porrasmainen profiili, jossa syvyyslastujen välinen pykälä on 0,5 mm (kuva 22). Laskennallinen lastuamisaika kannen irrotukselle on 25 min ja muut työstössä käytettävät arvot:

- Ae (lastuamisleveys) = 11 mm
- Ap (lastuamissyvyys) = 5 mm, ensimmäinen ja viimeinen lastu 6 mm
- Vc (lastuamisnopeus) = 400 m/min
- Fz (hammassyöttö) = 0,3 mm
- n (pyörimisnopeus) = 637 Rpm
- F (pöytäsyöttö) = 2675 mm/min
- Todennettu momentti työstökaralla = noin 100 Nm



Kuva 22. Irti koneistuksen seurauksena syntyvä porrasprofiili

Kannen irrotuksen jälkeen kapselin yläreunaan koneistetaan viiste. Kupariputken terävä ulkosärmä viistetään $1 \times 45°$, jotta se ei aiheuta ongelmia, kun avattu kapseli tiivistetään polttoaineen käsittelykammion läpivientiin polttoaineen poistamista varten. Menetelmänä viisteen tekemisessä käytetään ympyrä-interpolaatiota vastajyrsintänä, jossa yksi kierros tekee 1×1 viisteen. Työkalu, jota viisteen tekemiseen käytetään, on sama kuin kapselin kyljen viimeistelyssä kapselointiprosessin aikana. Viisteen tekemisen laskennallinen aika on 2 min ja käytettävät arvot:

- Ae (lastuamisleveys) = 1 mm
- Ap (lastuamissyvyys) = 1 mm
- Vc (lastuamisnopeus) = 600 m/min
- Fz (hammassyöttö) = 0,15 mm
- n (pyörimisnopeus) = 2506 Rpm
- F (pöytäsyöttö) = 2631 mm/min

Kannen irrotuskokeen aikana havaittiin vielä joitain kehityskohteita, erityisesti säteilysuojelullisesta näkökulmasta tehtiin huomio, että kannen irti koneistuksesta syntyvä lastu leviää koneistusaseman kaukalon ulkopuolelle. Tämä voi muodostaa kontaminaatioriskin, mikäli avattava kapseli on päässyt aktivoitumaan. Lastujen leviämisriskin minimoimiseksi päätettiin koneistusaseman kaukalon seiniä korottaa ennen kapselointilaitokselle tuomista. Kannen irrotuskoe suoritetaan uudestaan, kun laite on tuotu kapselointilaitokselle.

Kuparilastujen leviämisen lisäksi havaittiin, että mekaanisen nostoapulaitteen kohdistaminen saattaa olla haastavaa, sillä kohdistuksen apuna voidaan käyttää kapselointilaitoksella ainoastaan kameraa. FAT-kokeen aikana kohdistus tehtiin silmämääräisesti. Myös nostoapulaitteen irrottaminen koneistusaseman robottikäden avulla saattaa olla kameraohjauksessa haastavaa.

6 Säteilysuojelu kapselointilaitoksessa

Ydinenergialain 7 a §:ssä kuvataan ydinenergian käytön turvallisuutta koskevien vaatimusten johtavia periaatteita seuraavasti: ”Ydinenergian käytön turvallisuus on pidettävä niin korkealla tasolla kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Turvallisuuden edelleen kehittämiseksi on toteutettava toimenpiteet, joita käyttökokemukset ja turvallisuustutkimukset sekä tieteen ja tekniikan kehittyminen huomioon ottaen voidaan pitää perusteltuina.” Ydinenergialain johtavaa periaatetta sovelletaan myös säteilyturvallisuuden osalta kapselointilaitoksen toiminnan suunnittelussa. Kapselointilaitoksen säteilysuojelussa tulee kiinnittää huomiota alue- ja vyöhykejakoon, säteilylähteisiin ja palautusprosessin erityispiirteisiin.

6.1 Alue- ja vyöhykejako

Ydinenergialain 7 r § antaa Säteilyturvakeskukselle tehtävän asettaa ”Ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset”. Nämä vaatimukset on esitelty ohjeessa YVL C.2.

YVL C.2 ohjeen kappaleessa 5 määritellään ydinlaitoksen mukainen jako alueisiin ja vyöhykkeisiin. Ohjeen mukaiset yleiset periaatteet vyöhykejaossa perustuvat järjestelmällisiin annosnopeusmittauksiin sekä ilman radionuklidipitoisuuden määrityksiin. Ilman radionuklidiptoisuudesta käytetään määrettä DAC (Derived Air Concentration, ilman johdettu konsentraatioraja). Tulosten perusteella työskentelypaikat jaetaan valvonta-alueisiin ja tarkkailualueisiin. Näiden määriteltyjen alueiden ulkopuolinen alue on säteilysuojelun kannalta luokittelematonta aluetta.

Alue määritetään tarkkailualueeksi, mikäli ”säännöllisessä työssä saatu efektiivinen annos voi ylittää 1mSv, silmän ekvivalenttiannos 15 mSv tai käsien, jalkojen tai ihon ekvivalenttiannos 50 mSv”. Efektiivinen annos tarkoittaa terveydellistä kokonaishaittaa, joka lasketaan altistuneiden elinten ja kudosten ekvivalenttiannosten summana, huomioiden kunkin elimen ja kudoksen säteilyherkkyys. Ekvivalenttiannos lasketaan absorboituneesta annoksesta huomioiden annoksen aiheuttanut säteilylaji.

YVL C.2 ohjeen mukaan ”valvonta-alueeksi määritetään tilat, joissa ulkoinen annosnopeus saattaa ylittää 3µSv/h tai joissa 40 tunnin viikoittaisesta oleskelusta voi ydinlaitosperäisistä radionuklideista aiheutua yli mSv:n sisäinen säteilyannos vuoden kuluessa. Valvonta-alueen tilat jaetaan vyöhykkeisiin ulkoisen annosnopeuden, pintakontaminaation ja ilman radionuklidipitoisuuden perusteella ja vyöhykkeitä on oltava vähintään kolme”. Vyöhykejako on esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Valvonta-alueen jako vyöhykkeisiin (Säteilyturvakeskus 2019).

	Ulkoinen annosnopeus	Pintakontaminaatio	Ilmakonsentraatio DAC
Vyöhyke 1	≤ 25 µSv/h	Beetasäteilijät ≤ 4 Bq/cm^2 Alfasäteilijät ≤ 0,4 Bq/cm^2	≤ 0,3 DAC
Vyöhyke 2	25 µSv/h – 1 mSv/h	Beetasäteilijät 4–40 Bq/cm^2 Alfasäteilijät 0,4–4 Bq/cm^2	0,3–30 DAC
Vyöhyke 3	≥ 1 mSv/h	Beetasäteilijät ≥ 40 Bq/cm^2 Alfasäteilijät ≥ 4 Bq/cm^2	≥ 30 DAC

Valvonta-alueelta poistuvien henkilöiden ja tavaroiden pintakontaminaatio on tarkastettava ja sen on alitettava taulukossa 5 esitetyt rajat.

Taulukko 5. Pintakontaminaatiorajat ydinlaitoksella (Säteilyturvakeskus 2019).

Radioaktiivinen aine	Työpaikat ja työssä käytettävät työkalut ja materiaalit	Työntekijät	
	Valvonta-alueen alin vyöhyke Bq/cm^2	Vaatteet Bq/cm^2	Iho Bq/cm^2
Alfasäteilijät (vaarallisuusluokka 1)	0,4	0,4	0,2
muut nuklidit	4	4	2

Posivan kapselointilaitos on jaettu YVL C.2 ohjeen mukaan valvottuihin ja valvomattomiin alueisiin sekä tarkkailualueisiin. Valvotut alueet kapselointilaitoksella ovat niitä, joiden alueella käytetty polttoaine liikkuu. Näitä ovat kuljetus- ja siirtosäiliöiden vastaanottotila, kapselin siirtokäytävä, polttoaineen käsittelykammio, hitsaus- ja koneistusaseman tila, kapselihissi sekä kapselointilaitoksen kapselivarasto. Alueet, kuten operaattoreiden työtila ovat tarkkailualueella. Ainoa alue kapselointilaitoksessa, joka on valvomattomalla alueella, on

kapseliosien vastaanotto- ja varastointialue. Kapselointiprosessin kannalta olennainen aluejako on kuvattu kuvassa 23. (Posiva 2022c.)

Kuva 23. Kapselointilaitoksen aluejako. Punaisella värillä merkitty valvottu alue: kuljetus- ja siirtosäiliöiden vastaanottotila (1), polttoaineen käsittelykammio (2), kuparikannen hitsauslaiteen sekä koneistus- ja tarkastusaseman kammio (3), kapselihissi ja kapselien varastointialue (5), sekä kammioiden alla sijaitseva kapselin siirtokäytävä. Sinisellä värillä merkitty tarkkailualueella sijaitseva operaattoreiden työtila sekä vihreällä merkitty tyhjien kapselien vastaanotto ja varastointitila (4). (Posiva 2021b, 76; Posiva 2022c.)

Kapselointilaitoksen valvonta-alueen vyöhykejako noudattaa YVL C.2-ohjeen kolmea vyöhykettä pintakontaminaation ja ilmakonsentraation suhteen. Laitoksen normaalikäytössä vyöhykkeelle 1 kuuluvat kapselointilaitoksen kaikki muut tilat paitsi polttoaineen käsittelykammio, joka kuuluu vyöhykkeelle 3 ja sen yläpuolinen dekontaminaatiokeskus, joka kuuluu vyöhykkeelle 2. Mahdollisesti kontaminoituvia tiloja tarkastellessa polttoaineen käsittelykammio ja sen yläpuolinen dekontaminaatiokeskus kuuluvat vyöhykkeelle 3. Vyöhykkeelle 2 kuuluvat kuljetussäiliön siirtokäytävä, kapselin siirtokäytävä ja kapselointilaitoksen kapselivarasto. (Posiva 2022c.)

Vyöhykkeelle 2 kuuluu myös useampia kapselointilaitoksen teknisiä tiloja, joita on tarkemmin käsitelty 2014 julkaistussa Kimmo Hildenin diplomityössä ”Säteilysuojelu käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksella”.

Ulkoisen annosnopeuden suhteen kapselointilaitos on jaettu neljään vyöhykkeeseen. Vyöhykkeet 1–3 noudattavat YVL C.2-ohjeen jakoa, luokka 4 on eriytetty omakseen taulukon 6 mukaisella tavalla. (Posiva 2022c.)

Taulukko 6. Ulkoisen säteilyn vyöhykerajat

Luokka	Säteilytaso	Luoksepäästävyys
0	< 0,003 µSv/h	Valvomaton alue ml. tarkkailualue, ei rajoituksia
1	< 0,025 µSv/h	Valvonta-alue, ei rajoituksia (40h/viikko)
2	0,025 µSv/h – 1,0 mSv/h	Valvonta-alue, suunniteltu työskentely, tila lukittu tai valvottu
3	1–30 mSv/h	Valvonta-alue, valvottu tai suunniteltu lyhytaikainen työskentely perustuen työkohtaiseen erityissuunnitteluun ja annosarvioon. Tila lukittu
4	> 30 mSv/h	Valvonta-alue, ei työskentelyä, tila lukittu tai valvottu

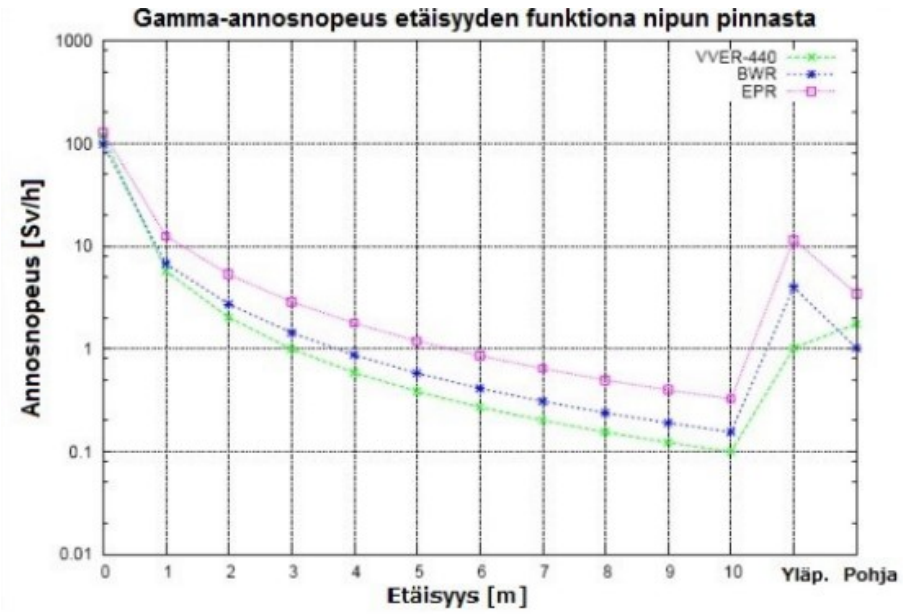
Ulkoisen säteilyn vyöhykkeelle 4 kuuluvat kaikki kapselin kulkureitillä olevat kapselointilaitoksen alueet; polttoaineen käsittelykammio, kapselin siirtokäytävä, hitsaus- ja koneistuskammio, kapselivarasto sekä kapselikuilu, jossa kapselihissi kulkee. Luokkaan 1, 2 ja 3 kuuluu suurin osa kapselointilaitoksen teknisistä tiloista sekä polttoaineen kuljetussäiliön tilat. (Posiva 2022c.) Ulkoisen säteilyn vyöhykkeet liittyvät vahvasti operatiiviseen säteilysuojeluun, jota on käsitelty Annamaria Mustosen 2016 julkaistuissa diplomityössä ”Operatiivinen säteilysuojelu Posivan kapselointi- ja loppusijoituslaitoksella”.

6.2 Säteilyn lähteet

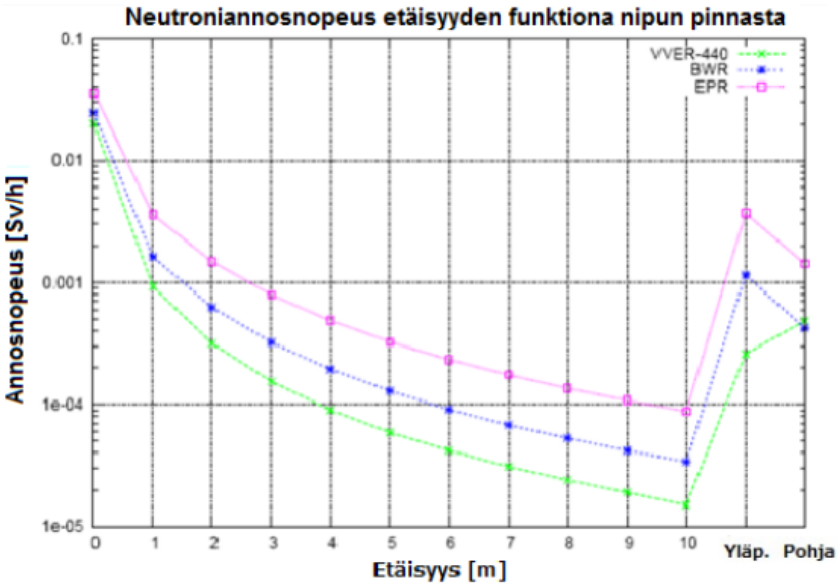
Kapselointilaitoksessa pääasiallisena säteilylähteenä on käytetty ydinpolttoaine, joka kulkee kapselointiprosessin aikana ensin kuljetussäiliöstä käsittelykammiossa kuivausasemaan ja sieltä edelleen kapseliin. Vain polttoainetta siirrettäessä se on käsittelykammiossa suojaamattomana. Posivan kapselointilaitoksella on tarkoitus käsitellä sen käyttöiän aikana kolmen eri laitostyypin (OL1-2, LO1-2 ja OL3) polttoaineita. Tällä on merkitystä, sillä käytetyn

polttoaineen aktiivisuuteen vaikuttaa reaktorityyppi, käyttöhistoria, poistopalama (GWd/tU), jäähtymisaika sekä polttoainenipun muoto. Palaman suuruus ja jäähtymisaika vaikuttavat käytetyn polttoaineen aktiivisuuteen siten, että suurempi palama ja lyhyempi jäähdytysaika kasvattavat aktiivisuutta. (Ranta-aho 2008, 11.)

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty käytetyn polttoaineen gamma- ja neutronisäteilyn annosnopeudet suojaamattoman nipun pinnasta. Annosnopeuksia laskettaessa on käytetty poistopalamana 60 GWd/tU ja ja jäähdytysaikana 20 vuotta. (Ranta-aho 2008, 11–26.) Todellisuudessa kapselointilaitoksessa ei tulla käsittelemään alle 20 vuotta jäähtyneitä nippuja ja etenkin OL1-2 käytetyn polttoaineen jäähtymisaikojen voidaan olettaa olevan huomattavastikin pidempiä, joten todellisten annosnopeuksien voidaan olettaa olevan pienempiä kuin Ranta-ahon (2008) laskutuloksissa.

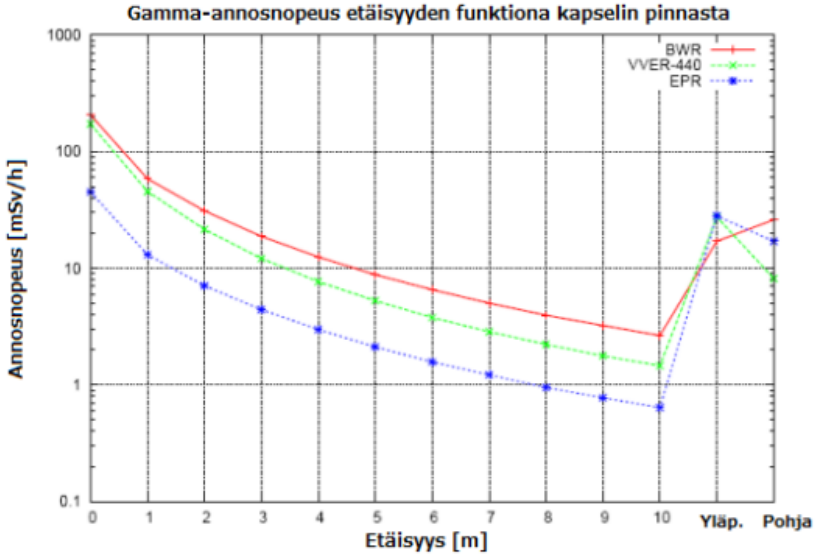


Kuva 24. Käytetyn ydinpolttoaineen gamma-annosnopeudet esitettynä etäisyyden funktiona paljaan polttoainenipun pinnasta. Annosnopeuksia laskettaessa poistopalamana on käytetty 60 GWd/tU ja jäähdytysaikana 20 vuotta. (Ranta-aho 2008, 34.)

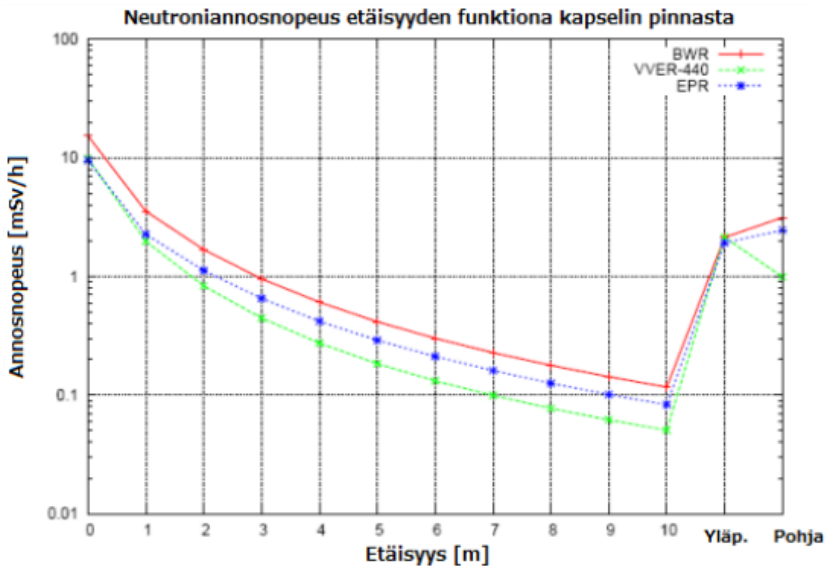


Kuva 25. Käytetyn ydinpolttoaineen neutroniannosnopeudet esitettynä etäisyyden funktiona paljaan polttoainenipun pinnasta. Annosnopeuksia laskettaessa poistopalamana on käytetty 60 GWd/tU ja jäähdytysaikana 20 vuotta. (Ranta-aho 2008, 34.)

Vastaavilla arvoilla on tehty laskelmat myös, kun käytetty polttoaine on suljettu kuparikapselin sisään ja annosnopeudet on mitattu kapselin pinnasta (kuvat 26 ja 27).



Kuva 26. Suljetun täyden kapselin gamma-annosnopeudet etäisyyden funktiona. Annosnopeuksia laskettaessa poistopalamana on käytetty 60 GWd/tU ja jäähdytysaikana 20 vuotta. (Ranta-aho2008, 42.)



Kuva 27. Suljetun täyden kapselin neutroniannosnopeudet etäisyyden funktiona. Annosnopeuksia laskettaessa poistopalamana on käytetty 60 GWd/tU ja jäähdytysaikana 20 vuotta. (Ranta-aho 2008,42.)

Tuloksia vertaamalla voidaan todeta kapselin vaimentavan käytetyn ydinpolttoaineen säteilyä merkittävästi. Täyden kapselin läheisyydessä oleskelua tulee kuitenkin välttää, sillä gamma-annosnopeudet ovat BWR-polttoainetta sisältävissä kapseleissa (OL1-2) suurimmillaan 200 mSv/h.

6.2.1 Kontaminaatio kapselointilaitoksella

Kontaminaatiota, eli radioaktiivista likaa syntyy ydinvoimalaitoksissa aktivoituneiden aineiden vapautuessa prosessista. Kapselointilaitos ei ole ydinenergialaitos, joten siellä ei ole kontaminaation mahdollisuutta ennen käytetyn ydinpolttoaineen saapumista kapseloitavaksi. Käytetyssä polttoaineessa kontaminaatiota on crudina, eli polttoainesauvojen pinnalla olevina aktiivisina korroosiotuotteina, sekä polttoainesauvojen sisällä radioaktiivisina fissio- ja aktivoitumistuotteina.

Kapselointiprosessin aikana vahingoittuneista sauvoista voi tulla pieniä polttoainevuotoja. Polttoainesauvan mahdollisiksi vahingoittumistilanteiksi kapselointiprosessin aikana on yksittäisen sauvan vahingoittuminen kuljetuksessa KPA-varastolta kapselointilaitokselle tai

polttoaineen siirroissa kuljetussäiliöstä kuivausasemaan ja kuivausasemasta kapseliin. Kuljetuksen aikana vaurioituneiden polttoainesauvojen on laskettu olevan erittäin vähäisiä. (Paunonen & Nummi & Eurajoki 2015, 37.)

Polttoaineen siirroissa tapahtuvia mahdollisia sauvojen vahingoittumisia on tutkittu Posivan laitosten riskiarvioinneissa ja arviot vahingoittuneiden sauvojen määristä on perustettu OL1-2 ydinlaitoksilla tapahtuneisiin polttoaineen siirrossa tapahtuneisiin sauvojen vahingoittumisiin. Riskiarvion lopputuloksena saatiin kaikille Suomessa käytetyille polttoaineille sekä konservatiivinen että realistinen arvio kapselointilaitoksella suoritettavien siirtojen aikana vahingoittuneista polttoainesauvoista. Arvot on esitetty taulukossa 6. (Paunonen et al 2015, 37–39.)

Taulukko 7. Konservatiiviset ja realistiset arviot kapselointiprosessissa vaurioituvista polttoainesauvoista polttoainetyypin mukaan (Paunonen et al 2015, 39).

		Polttoainetyyppi			Yht.
		BWR (OL1-2)	VVER (LO1-2)	ERP (OL3)	
Kapseleiden lukumäärä		1400	750	2350	4500
Polttoainenippujen määrä kapselissa		12	12	4	
Käsiteltävien polttoainenippujen lukumäärä		16800	9000	9400	32500
Konservatiivinen arvio	Polttoainevaurion todennäköisyys per käsiteltävä polttoainenippu	3/1000	1/1000	3/1000	
	Vaurioiden yhteenlaskettu määrä	50	9	28	87
Realistinen arvio	Polttoainevaurion todennäköisyys per käsiteltävä polttoainenippu	$55/10^6$	$18/10^6$	$55/10^6$	
	Vaurioiden yhteenlaskettu määrä	1	0	1	2

Kapselointilaitoksella käsitellään myös jo ydinlaitoksilla vaurioitunutta polttoainetta. OL1-2 laitoksilla vuotavat sauvat on poistettu nipuista ja pakattu vesitiiviisti. Ennen kapselointilaitokselle tuontia, vaurioituneet sauvat pakataan uudelleen suojakaasulla täytettyihin pakkauksiin, joista kootaan uusi polttoainenippu. Uusi nippu sisältää vähemmän polttoainesauvoja, mutta on käsiteltävissä kapselointiprosessissa kuten ehjät polttoaineniput. LO1-2 laitoksilla vaurioitunut polttoainesauva on edelleen omalla paikallaan polttoainenipussa. Ennen

kapselointilaitokselle siirtoa, koko nippu pakataan hermeettisesti ja kuivataan. Hermeettisesti pakattua nippua voidaan kapseloinnin aikana käsitellä kuten ehjiäkin nippuja. (Paunonen et al 2015, 39–40.)

Valtaosa kapselointilaitoksella käsiteltävästä polttoaineesta on vahingoittumatonta. jolloin polttoainesauvojen sisällä oleva kontaminaatio fissio- ja aktivoitumistuotteina ei pääse leviämään kapselointilaitoksella. Sen sijaan sauvojen pinnalla olevan crudin voidaan arvioida irtoavan ja leviävän kapselointilaitoksen polttoaineen käsittelykammiossa, kun polttoainetta siirretään kuljetussäiliön, kuivausaseman ja kapselin välillä. Polttoaineen käsittelykammio on kapselointilaitoksella ainoa tila, jossa polttoainetta käsitellään suojaamattomana. (Paunonen et al 2015, 35.)

6.3 Säteilysuojelu palautusprosessin aikana

Kapselin palautusprosessin aikana voidaan suorittaa samat säteilymittaukset kuin kapselointiprosessin aikana. Kapselointiprosessissa kapselin säteily mitataan ennen kapselin kuparikannen kiinnitystä ja palautettaessa kapselin kontaminaatio tulee mitata, kun polttoaine on poistettu kapselista ja sisäosan rautakansi on kiinnitetty uudelleen.

Käytetyn polttoaineen poiston jälkeen kapselin sisäosan rakenteen takia sisäosa on suurella todennäköisyydellä kontaminoitunut polttoainesauvoista irronneen crudin takia. Polttoaineniput sijoitetaan kapselin sisäosassa olevien pitkien kanavien sisään ja nipun viistäessä kanavan seinää, sisäosan kanavat kontaminoituvat.

Kun kapselista on saatu polttoainesauvat poistettua ja rautainen sisäosan kansi on paikallaan, on kapseli tarkoitus palauttaa kapselivarastoon, josta se tulee siirtää dekontaminoitavaksi TVO:n korkea-aktiivisen jätteen varastoon. Jotta kapseli voidaan siirtää kapselivarastoon ja sieltä eteenpäin, on se ensin mitattava puhtaaksi. Valvonta-alueelta poistettavien kappaleiden pintakontaminaation on oltava alfasäteilyn osalta alle 0,4 Bq/cm^2 ja muiden nuklidien osalta alle 4 Bq/cm^2. (Eerola 2022.)

Syy siihen, miksi kapseli on siirrettävä kapselointilaitokselta TVO:n laitosalueella sijaitsevaan korkea-aktiivisen jätteen varastoon, on se, että kapselin sisäosan rakenteen takia, kapselointilaitokselle ei ole suunniteltu tiloja kapselin sisäosan kanavien puhdistukseen (Eerola 2022). Palautuksessa on myös huomioitava polttoainesauvojen vahingoittumisen

todennäköisyys, joka on samankaltainen kuin polttoainenippujen siirroissa kapselointiprosessin aikana. Todennäköisin hetki polttoaineen vaurioitumiselle on juuri polttoaineen siirtojen aikana.

7 Palautetun kapselin jatkokäsittely

Kapselin avauksen jälkeen kapselin rautaisen sisäosan voidaan olettaa olevan uudelleen käytettävissä polttoaineen poiston jälkeen. Koko kapseli sisäosineen on kuitenkin toimitettava dekontaminoitavaksi, ja purettavaksi pois kapselointilaitokselta, sillä sisäosan rakenne estää sen dekontaminoinnin kapselointilaitoksella.

Materiaalien jatkokäsittelyä varten kapselin kuparivaippa irrotetaan rautasen sisäosan ympäriltä ja materiaalit toimitetaan kierrätykseen, olettaen ettei niissä havaita aktiivisuutta. Rautainen sisäosa tulisi pystyä käyttämään uuden kuparikapselin sisäosana, mutta ennen tätä sisäosa on saatava puhdistettua mahdollisesta aktiivisuudesta. Mikäli sisäosan puhdistus ei onnistu, tullaan se loppusijoittamaan kokonaisena. (Posiva 2021b, 50.)

7.1 Kuparikapseli ja sen kansi

Palautetun kapselin kuparivaippaa ja -kantta ei pystytä käyttämään sellaisenaan uudestaan loppusijoitukseen, sillä vaippa on alkuperäistä kapselia lyhyempi. Myöskään jo kertaalleen paikalleen hitsattu ja irti koneistettu kansi ei ole sellaisenaan käyttökelpoinen, sillä voidaan olettaa, että kannelle on tehty kaikki normaalille kapselille tehdyt koneistustoimenpiteet. Kun vaippa on saatu erotettua sisäosasta, on sille todennäköisin jatkotoimenpide kierrätys.

YVL 4.D-ohjeessa viitataan ydinenergialain 27 c §:n 1. momenttiin, joissa todetaan ” Muuta ydinjätettä kuin käytettyä ydinpolttoainetta saa sen radioaktiivisuuden estämättä uudelleenkäyttää, kierrättää, hyödyntää ja loppukäsitellä noudattaen jätelakia (646/2011), jos siinä olevan radioaktiivisen aineen määrä ei ole tämän lain 7 q §:n 1 momentin 28 kohdan nojalla määrättyä vapauttamisrajaa suurempi”. Säteilyturvakeskuksen säteilylain (859/2018) ja ydinenergialain (990/1987) nojalla annetun määräyksen ”Säteilyturvakeskuksen määräys vapaarajoista ja vapauttamisrajoista” 6 §:ssä määritellään vapauttamisrajat pintakontaminaation vuoksi. Määräyksen mukaan kappaleen aktiivisuuskate tulee määrittää ”irtoavien ja kiinnitarttuneiden radioaktiivisten aineiden määrästä. Mahdollisuuksien mukaan aktiivisuuskate määritetään keskimääräisenä aktiivisuutena 100 cm2 suuruiselta alueelta”.

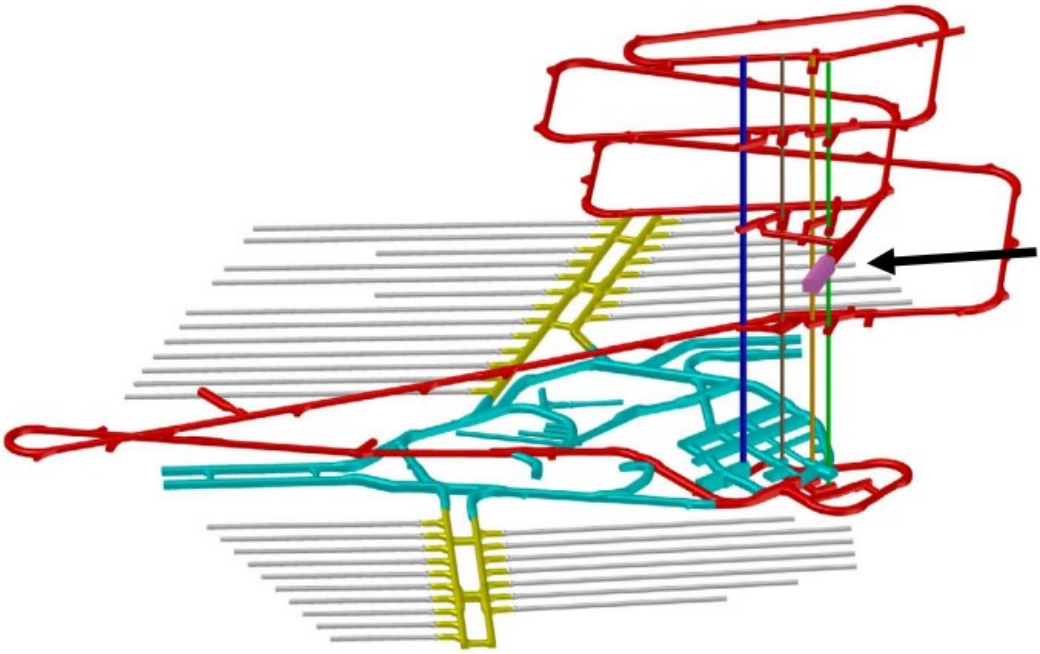
Vapauttamisrajat kapselin vaipan ja kuparikannen lähettämiselle kierrätykseen ovat samat kuin laitokselta vapauttamiseen ja ne on esitelty aiemmin taulukossa 5.

Olettaen, että loppusijoituskapselin kuparivaippa ja kansi saadaan erotettua rautaisesta sisäosasta ja vapauttamisrajat alittuvat, toimitetaan vaippa ja kansi kierrätettäväksi. Kuparin kierrättäminen itsessään ei ole ongelma, sillä maailmalla noin kolmannes ja Euroopassa jopa puolet kierrossa olevasta kuparista on kierrätettyä. (Glöser & Soulier & Tercero Espinoza 2013.)

7.2 Rautainen sisäosa ja sen kansi

Kapselin palauttamisen jälkeen kapselin sisäosan voidaan olettaa kontaminoituneen suurella todennäköisyydellä. Polttoainesauvat liukuvat sisäosan kanavia pitkin poistettaessa, joten kanavien pohjalle ja seiniin oletettavasti kertyy radioaktiivista likaa, crudia. Kuparisen kannen irrotuksen ja polttoaineen poiston jälkeen rautainen sisäosan kansi kiinnitetään uudelleen ennen kapselin siirtämistä purku- ja dekontaminaatiopaikalle. Tällä toiminnalla pyritään välttämään kontaminaation leviämistä.

Kapselin sisäosan ja vaipan erottamisen jälkeen kapselin sisäosa on puhdistettava, ennen mahdollista uudelleen käyttöä uuden kapselin sisäosana. Mikäli puhdistus ei sisäosan hankalan rakenteen vuoksi onnistu, voidaan sisäosa loppusijoittaa kokonaisena Loppusijoituslaitoksen ajotunnelin yhteyteen rakennettavaan matala- ja keskiaktiivisille jätteille tarkoitettuun tilaan, joka on esitetty kuvassa 28. (Posiva 2021b, 60.) Jos puhtaaksi mitatussa rautaisessa sisäosassa havaitaan kapselin avaamisesta johtuva poikkeama, mikä estää sen uudelleen käytön alkuperäisessä tarkoituksessa, voidaan se toimittaa kierrätettäväksi.



Kuva 28. Posivan loppusijoituslaitoksen ajotunnelin yhteyteen rakennettava matala- ja keskiaktiiviselle jätteelle suunniteltu tila noin 180 m syvyydessä (Posiva 2021b, 49).

Rautaisen sisäosan ja sen kannen uudelleen käyttöä kapselin sisäosana voisi mahdollisesti harkita, mikäli kontaminaatio on rajoittunut ainoastaan sisäosan kanaviin. Sisäosaa joudutaan kuitenkin käsittelemään kapselointilaitoksen valvomattomalla alueella myös ilman kantta, jolloin kontaminaation leviämisen riski kasvaa.

8 Johtopäätökset

Tämän opinnäyteyön tarkoituksena oli tutkia kapselin palautettavuuden mahdollisuuksia, kapselin materiaalien uudelleen käsittelyä ja tuottaa Posiva Oy:lle suunnitelma yhteistoimintakokeen yhteydessä tehtävästä kapselin palautuskokeesta. Opinnäytteen lopputuloksena voidaan todeta kapselin palautuksen olevan mahdollista ja palautuskokeen todennäköisesti onnistuvan tietyin riskein.

Kapselin palautus loppusijoitusreiästä saturoituneen bentoniittipuskurin keskeltä on todennettu aiemmin ruotsalaisen SKB:n toimesta. Samoin Posivan KSAA kapselin asennusajoneuvolla on harjoituskapseli sekä sijoitettu reikään, että nostettu reiästä menestyksekkäästi KSAA:n FAT- ja SAT-testeissä. Voidaan siis todeta, että Kapselin palautus loppusijoitusreiästä on mahdollista nykyisellä kalustolla.

Posivan käyttölupahakemuksessa todetaan, että kapselin palautus ja polttoaineen palautus kapselista tullaan todentamaan Posivan Yhteistoimintakokeen yhteydessä. Opinnäytetyön yhtenä osa-alueena oli palautuskokeen suunnittelu ja samalla kapselointilaitoksen palautusprosessin ja sen mahdollisten haasteiden selvitys. Tutkimusta tehtäessä selvisi, että kapselin palautus ei ole ollut prioriteettina kapselointilaitosta, sen järjestelmiä ja järjestelmien rajapintoja suunniteltaessa. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että palautus on haastavampaa, mitä pidemmälle kapselointiprosessi on edennyt. Samalla voidaan todeta, että palautus on vähemmän todennäköistä, mitä pidemmälle kapselointiprosessi on edennyt. Todennäköisin syy polttoaineen poistolle kapselista on kapselin kuparikannen epäonnistunut hitsaus.

Ennen varsinaista palautuskoetta tulisi kapselointilaitoksen järjestelmien rajapintojen toimivuus todentaa myös palautustilanteessa. Yhteistoimintakokeessa tehtävän palautuskokeen ohjeistuksen lisäksi tulisi myös laatia ohjeistus käyttötoiminnan aikana sattuviin mahdollisen palautuksen aikaisiin poikkeustilanteisiin, kuten koneistusaseman rikkoutumiseen ja palautuksen aikana sattuviin polttoainevaurioihin.

Palautuskokeen suunnittelun ja palautusprosessin tutkimisen haasteena oli tutkittavan tiedon vähäisyys, sekä aiheen parissa työskentelevien asiantuntijoiden eriävät mielipiteet. Posivan kapselointilaitos on maailman ensimmäinen käytettyä ydinpolttoainetta loppusijoitusta varten pakkaava tuotantolaitos, eikä kaikkia sen järjestelmiä ole vielä asennettu tai testattu

yhdessä niiden rajapintajärjestelmien kanssa. Ennen laitoksen järjestelmien valmistumista on mahdotonta tietää kapselin palautukseen liittyviä lopullisia haasteita.

Loppusijoituskapselin palautuksesta keskusteltaessa ja aihetta tutkiessa on myös muistettava, että syvälle maaperään loppusijoitettava polttoaine on tarkoituksellisesti vaikeasti palautettavaa. Periaatepäätöksessä mainitaan vielä, että polttoaineen on oltava palautettavissa, mikäli sille ilmenee myöhemmin parempaa käyttöä. Todennäköisin syy kapselin palautukselle on kuitenkin kapselin ulkopinnan vaurioituminen jossakin loppusijoituksen vaiheessa. Mikäli tulevaisuudessa päädytään palauttamaan useampi kapseli esimerkiksi polttoaineen uudelleen käytön takia, lienee tehokkaamman ja tarkoitukseen suunnitellun laitoksen rakentaminen aiheellista.

Lähteet

Castner, H & Dralle, C. W & Fuerstenau, C. E & Holliday, D. B & Holsberg, P. W & Medley, D & Mertes, T & Peters, D & Rogers, M. N & Turrif, J & Wold, K. G. 1997. Copper and Copper Alloys. Miami FL: Copper Development Association. 61 s.

Davis, J.R. 2001. Copper and Copper Alloys. ASM Specialty Handbook. Materials Park OH: ASM International. 652 s.

Glöser, S & Soulier, M & Tercero Espinoza, L. 2013. Dynamic Analysis of Global Copper Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation. Envinronmental Science & Technology. 47. s. 6564–6572.

Eerola, O. 2022. Säteilyturvallisuusinsinööri. Teollisuuden Voima Oyj. Teams-haastattelu. 28.11.2022. Haastattelijana Marianna Hanni. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Eng, A. 2008. Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Retrieval phase. Project report. Svensk Kärnbränslehantering AB. 47 s.

Hilden, K. 2014. Säteilysuojelu käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksella. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikan koulutusohjelma. 131 s.

Huttunen, J. 2021. FSAR-Y7 Radioaktiiviset aineet. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Jokiranta, M. 2022. Järjestelmävastaava. Posiva Oy. Haastattelu 21.9.2022. Olkiluoto. Haastattelijana Marianna Hanni. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Jonsson, M & Emilsson, G & Emilsson L. 2018. Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04. Svensk Kärnbränslehantering AB & Posiva Oy. 156 s.

Jätelaki 17.6.2011/646

Kajander, M. 2021a. PK.236 Canister welding system FSW, system description. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Kajander, M. 2021b. PK.264 Kapselin koneistusasema, järjestelmäkuvaus. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Kukkola, T. 2013. Encapsulation Plant Design 2012. Working Report. Fortum Power and Heat Oy. 48 s.

Mishra, R.S & Ma, Z.Y. 2005. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering. a review journal. Vol. 50 (1-2). s. 1-78.

Mustonen, A. 2016. Operatiivinen säteilysuojelu Posivan kapselointi- ja loppusijoituslaitoksilla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, School of Energy Systems, Energiatekniikan koulutusohjelma. 116 s.

Paajanen, A. 2022. Järjestelmävastaava. Posiva Oy. Teams-haastattelu 16.9.2022. Haastattelijana Marianna Hanni. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Palomäki, J & Ristimäki, L. 2013. Laitoskuvaus 2012. Kapselointi- ja loppusijoituslaitossuunnitelmien yhteenvetoraportti. Työraportti. Posiva Oy. 134 s.

Paunonen, M & Nummi, O & Eurajoki, T. 2015. Waste Management of the Encapsulation Plant. Working Report. Posiva Oy. 66 s.

Posiva Oy. 2015. Liite 17: Muu viranomaisen tarpeelliseksi katsoma selvitys: Selvitys loppusijoitustilojen avattavuudesta, siihen vaikuttavista tekijöistä, avaustekniikasta, avaamisen turvallisuudesta ja arvio avaamisen kustannuksista [Posivan loppusijoituslaitoksen laajentamista koskeva periaatepäätös 2010]. Rakennuslupahakemus, Olkiluodon kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamiseksi käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten. 9 s.

Posiva Oy. 2020. Loppusijoituskokeet. Luettavissa: https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/loppusijoituskokeet.html [luettu 10.9.2022]

Posiva Oy. 2021a. Buffer, Backfill and Closure Evolution. Working Report 2021-08. 401 s.

Posiva Oy. 2021b. Käyttölupahakemus. Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen käyttölupahakemus. 362 s.

Posiva Oy. 2022a. Canister Evolution. Working Report 2021-06. 342 s.

Posiva Oy. 2022b. FAT-raportti. Sisäinen dokumentti.

Posiva Oy 2022c. Ulkoinen Säteily Tasot -2.900-+31.100. Sisäinen dokumentti.

Posiva Oy.2023. Posiva Oy:n animaatio kapselointilaitoksesta. YouTube-video. Julkaistu 27.2.2023. Viitattu 13.3.2023. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=ty7PC_MFv-g

Ranta-aho, A. 2008. Review of the Radiation Protection Calculations for the Encpasulation Plant. Working Report 2008-63. Posiva Oy. 83 s.

Rantamäki, P. 2021. Projektisuunnitelma – yhteistoimintakoe ilman käytettyä polttoainetta. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Rantamäki, P & Hansen, J & Niskanen, M & Mustonen, S. 2022. Posivan sisäinen FISST-projektin kokemusraportti. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Riihimäki, J. 2021. FSAR-Y5 Rakentaminen ja käyttö. Posiva Oy. Sisäinen dokumentti.

Saanio, Timo & Raiko Heikki. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskapseleiden palautettavuus. Työraportti 99-21. Posiva Oy. 48 s.

Säteilyturvakeskus 2019. Ohje YVL B4 Ydinpolttoaine ja reaktori. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-4

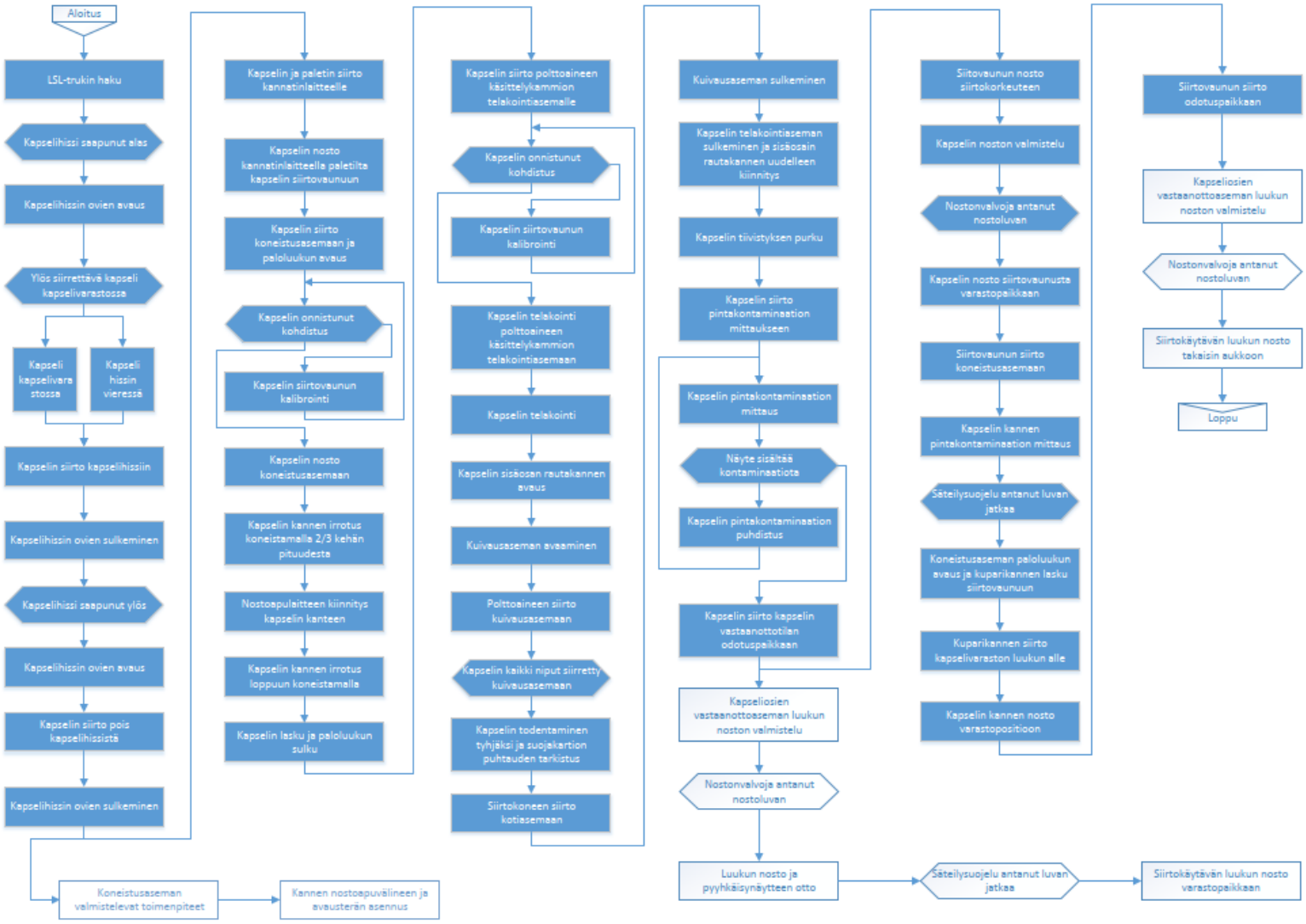
Säteilyturvakeskus. 2019. Ohje YVL C.2 Ydinlaitoksen työntekijöiden säteilysuojelu ja säteilyaltistuksen seuranta. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLC-2

Säteilyturvakeskus. 2019. Ohje D.4 Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLD-4

Säteilyturvakeskus. 2018. Säteilyturvakeskuksen määräys vapaarajoista ja vapauttamisrajoista. STUK SY/1/2018. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/maarays/stuk-sy-1-2018

Tamminen, J. 2022. Järjestelmävastaava. Posiva Oy. Teams-haastattelu 19.9.2022. Haastattelijana Marianna Hanni. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Valtioneuvoston päätös käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuudesta 478/1999. Annettu 25.3.1999

Ydinenergialaki 11.12.1987/99

Liite 1. Vuokaavio kapselin palautuskokeesta