

ATS

3|2024

Vol. 53

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

Polttoaine on kuvattava ennen loppusijoitusta

Käytetyn polttoaineen loppusijoitus edellyttää kehittyneitä mittauksia, joilla varmistetaan polttoainenippujen sisältö ennen kuin ne viedään maan uumeniin.

Uusia radioaktiivisia lääkkeitä

Radioaktiivisten lääkkeiden käyttö diagnoosien teossa ja hoidoissa on kasvusuunnassa, ja niiden kehitys edellyttää kansainvälisiä verkostoja ja yhteistyötä.

Haitallista kasvustoa voimalaitoksilla

Vieraslajit aiheuttavat lisääntyntä kasvustoa voimalaitosten merivesijärjestelmissä ja tilanne saattaa pahentua Itämeren lämpenemisen myötä.



Julkaisija / Publisher

Suomen Atomiteknillinen Seura – Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y.
www.ats-fns.fi

Johtokunta / Board**Puheenjohtaja / President**

DI Hanna Tynys
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

Prof., TkT Samuli Siltanen
samuli.siltanen@helsinki.fi

Sihteeri / Secretary General

FM, DI Jenna Järvenpää
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Elina Syrjälahti
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

Dos. Taina Kurki-Suonio
taina.kurki-suonio@aalto.fi

TkT Antti Snicker
antti.snicker@vtt.fi

DI Topi Tupasela
topi.tupasela@stuk.fi

DI Janne Valkonen
janne.valkonen@platom.fi

Toimihenkilöt / Functionaries**ATS Young Generation**

Ins (AMK) Juuso Soikkeli
juuso.soikkeli@konecranes.com

**Kansainvälisten asioiden sihteeri /
International Affairs**

MSc Ana Jambrina
ana.jambrina@vtt.fi

Women in Nuclear Finland

FM Jenna Levo
jenna.levo@tvo.fi

www.vastaava / Webmaster

DI Teemu Sällylä
webmaster@ats-fns.fi

ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkT Riitta Kyrki-Rajamäki
rkyrki@gmail.com

Toimitus / Editors**Vastaava päätoimittaja / Editor-in-Chief**

TkT Jarmo Ala-Heikkilä
jarmo.ala-heikkila@aalto.fi

**Tieteellinen päätoimittaja /
Scientific Chief Editor**

FT Antti Rätty
antti.ratty@vtt.fi

**Ajankohtaispäätoimittaja /
Topical Chief Editor**

DI Tapani Raunio
tapani.e.raunio@fortum.com

Ulkoasu ja taitto / Layout

Katariina Korhonen
Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

FM Sophie Haapalehto
sophie.haapalehto@posiva.fi

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@gmail.com

TkT Henri Loukusa
henri.loukusa@gmail.com

DI Aleksi Savolainen
aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund
mervi.soderlund@fortum.com

Toimituksen yhteystiedot**ATS Ydintekniikka**

c/o Jarmo Ala-Heikkilä
PL 15600
00076 Aalto
p. 050 433 1198

Painopaikka

Hämeen Kirjapaino Oy, Espoo
ISSN-0356-0473

Vuonna 1966 perustetun Suomen Atomiteknillisen Seuran (ATS) tarkoituksena on edistää ydintekniikan alan tuntemusta ja kehitystä Suomessa, toimia yhdyssiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi sekä vaihtaa tietoja ja kokemuksia kansainvälisellä tasolla. ATS on Tieteellisten seurain valtuuskunnan jäsenseura.

ATS Ydintekniikka on ATS:n julkaisema, neljästi vuodessa ilmestyvä aikakautinen julkaisu. ATS:n tavoitteena on, että ATS Ydintekniikka on johtava teknistieteellinen ammattijulkaisu Suomessa.

ATS ei vastaa julkaistuissa artikkeleissa ja kirjoituksissa olevista tiedoista ja näkökannoista. Toimitus pidättää itsellään oikeuden lyhentää, tiivistää ja muokata julkaistavaksi tarkoitettuja artikkeleja ja kirjoituksia.

Sammakot kattilassa

OTSIKKONI ON JO NIIN KULUNUT kielikuva, että kukaan ei odota enää saavansa sen alla gourmet-välipalan kokousohjetta. Sanonnan mukaisesti sammakot eivät hoksaa loikata pois kattilasta, jota hiljalleen lämmitetään liedellä, aivan kuten ihmiskunta ei huomaa lopettaa ainoan tunnetun elinkelpoisen planeetan lämmittämistä ylimääräisillä kasvihuonekaasuilla.

Meidän ei tarvitse kuin vilkaista viimeisen vuoden kuukausittaisten keskilämpötilojen kuvaajaa huomataksemme, että ollaan mittaus historian selkeällä ennätystasolla. Kun Armand Duplantisin tapauksessa tällaisesta havainnosta voi innostua, niin planeetan keskilämpötilan kuvaajan tapauksessa on syytä huolestua.

Pitemmän aikavälin keskilämpötilan kuvaajassa viimeisen 60 vuoden kehitystrendi on selkeästi koillisen suuntaan. Esiteolliseen aikaan verrattuna ollaan jo reilusti yli celsiusasteen verran ylempänä, ja Pariisin ilmastosopi-

muksessa vuonna 2015 tavoitteeksi asetettua maksiminousua 1,5 astetta jo kolkutellaan.

Korkeampi keskilämpötila tarkoittaa, että ilmakehässä on enemmän energiaa, jolloin ilmastossa aina havaitut ääri-ilmiöt tulevat aina vain äärimmäisemmiksi. Viime aikoina on uutisoitu rankkasateista ja maanvyörymistä Kaakkois-Aasiassa, missä miljoonat ihmiset ovat joutuneet jättämään kotinsa ja kaipaavat puhdasta juomavettä. Keski-Euroopassa rankkasateet nostivat jokien pintoja ja tulvittivat kymmeniä kaupunkeja veden, mudan ja niiden mukanaan tuoman rojun peittoon. Toisaalla taas kärsitään kuivuudesta ja pohjaveden häviämisestä.

Valtaosa ihmisen aiheuttamasta ilmastomuutoksesta johtuu fossiilisten polttoainien polttamisesta. Vaikka niitä on pyritty korvaamaan ydin-, tuuli- ja aurinkovoimalla, joiden kapasiteetti nousee vuodesta toiseen, niin edelleen vuonna 2023 fossiilisten polt-



toaineiden kulutus kasvoi kaikkien aikojen huippuunsa.

Vanhan viisaan valtiomiehen sanoin: ”Tarttis tehreä jotain.” Puheet eivät enää riitä, vaan meidän on paitsi rakennettava lisää vähäpäästöistä energiantuotantoa niin myös alettava vähentää energiankulutustamme merkittävästi. Muussa tapauksessa gourmet-annokset jäävät historiaan.

Jarmo Ala-Heikkilä
Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Sammakot kattilassa.....	3
Pääkirjoitus: Ydinvoiman uusi aikakausi.....	4
Editorial: The New Era of Nuclear Power.....	5
Pakina: Innovaatio- ja lainsäädäntöprosessit ovat monimutkaisia ja aikaa vieviä toteuttaa.....	34

Tapahtumat

Ydinvoima-alan avainpelaajat mukana Helsingissä – Nordic Nuclear Forum oli kuin ydinvoima-alan suuri roolipeli.....	6
Jäsentilaisuus: ”Uusia ydinvoimahankkeita Pohjoismaihin?”.....	9
Illallisristeily saaristossa 9.8.2024.....	10
ATS YG Summer Symposium 2024.....	13
Ajankohtaista Advancing Innovations in Radiopharmaceuticals at the NOMATEN Centre of Excellence.....	16

Itämeren vieraslajien aiheuttamat ongelmat voimalaitoksissa – nykyhetki ja tulevaisuus.....	20
Tiede ja tekniikka Väitös: Gammatomografialla tarkempia kuvia käytetystä ydinpolttoaineesta..... <i>Riina Virta</i>	23
Väitös: Röntgenkuvantamisesta apua bentoniittipuskurin mallintamiseen..... <i>Tero Harjupatana</i>	27
Diplomityö: Suurien kielimallien hyödyntäminen vaatimusten jäljityksessä ydinvoima-alalla..... <i>Pyy Aho</i>	31

Ydinvoiman uusi aika-kausi

YDINENERGIA ELÄÄ PARHAILLAAN merkittävää muutoksen aikaa. Yleisön suhtautuminen ydinenergiaan sekä Suomessa että kansainvälisesti on myönteisempää kuin aikoihin, ja jopa vihreät puolueet ovat alkaneet tukea ydinvoimaa. Monissa Euroopan maissa suunnitellaan nyt uusia ydinvoimaloita, ja useat valtiot pyrkivät käynnistämään ydinenergian tuottamisen.

Osallistuin äskettäin konferenssiin, jossa käsiteltiin säteilyn vaikutusten mallintamista materiaaleissa. Tutkimustavoitteidemme soveltamista ydinreaktorien suunnitteluun esiteltiin avoimemmin ja ylpemmin kuin koskaan aiemmin. Tämä on selkeä vastakohta varhaisille kokemuksilleni samasta konferenssisarjasta Yhdysvalloissa muutama vuosi sitten, jolloin välttelin tarkoituksella mainitsemasta sanaa ”nuclear” lentokentän turvatarkastuksessa, kun minulta kysyttiin matkani tarkoitusta ja tutkimusaiheittani.

Ydinenergiaa kohtaan kasvava kiinnostus ja hyväksyntä on ymmärrettävää, kun otetaan huomioon ilmastomuutoksen jatkuvat haasteet sekä se, että muut vihreiksi ja uusiutuviksi luokitellut energialähteet ovat osoittautuneet vähemmän ympäristön kannalta kestäviksi ja eivät niin aidosti uusiutuviksi kuin alun perin ajateltiin.

Äskettäisellä lennolla Saksan yllä huomioitani herättivät lukuisat tuulivoimalat ja aurinkopaneelipuistot, jotka olivat levinneet muuten idyllisiin maisemiin. Näistä mittavista asennuksista huolimatta aurinko- ja tuulivoima kattavat yhä vain murto-osan Saksan sähköntarpeesta. On yhä selvempää, ettei tämä lähestymistapa riitä täyttämään energiantarvettamme erityisesti siksi, että tuotantoa rajoittavat sääolosuhteiden ja vuorokaudenajan tuoma epävakaus.

Viimeaikaiset kehityssuunnat ja uusien ydinvoimaloiden rakentaminen edellyttävät



kymmenientuhansien ydinvoima-alan ammattilaisten palkkaamista. Euroopan yliopistot pyrkivät vastaamaan asiantuntijoiden kasvavaan tarpeeseen, mikä on haasteellista, kun pitkän aikaa sekä tutkimusta että koulutusta on vähennetty useimmissa maissa. Kansainvälinen yhteistyö on nyt entistäkin tärkeämpää, ei vain koulutuksen ja infrastruktuurin rajallisten resurssien vuoksi, vaan myös jotta voimme tukea maita, jotka vasta pyrkivät ydinenergian tuottajiksi ja joilla on toistaiseksi vähemmän kotimaista asiantuntemusta.

Vastataksemme tähän tarpeeseen Aalto-yliopisto osallistuu aktiivisesti useisiin hankkeisiin, kuten ENEN- ja Unite!-ohjelmiin. Lisäksi Aalto tekee yhteistyötä Tšekin teknillisen yliopiston kanssa hyödyntäen heidän tutkimusreaktoriaan, jotta Suomen seuraavan sukupolven ydinvoima-asiantuntijat saavat tarvitsemaansa käytännön koulutusta. Myös teollisuuden osallistuminen koulutustalkoisiin on ratkaisevan tärkeätä, jotta koulutusohjelmat pysyvät relevantteina yksityiselle sektorille. Tässä suhteessa merkittävänä askeleena voidaan pitää uutta DENSE-tohtorikoulutusverkostoa, jota rahoittaa Valtion ydinjätehuoltorahasto VYR ja johon osallistuvat kaikki suomalaiset yliopistot ja tutkimuslaitokset.

Kasvavan asiantuntijatarpeen kattamisen lisäksi on tarvetta panostaa tieteelliseen tutkimukseen ja teknologiseen kehitykseen. Tutkimus vaatii riittävää rahoitusta, joka ydinvoimateknologian alalla on viime aikoina kohdistunut pääasiassa fuusioon sekä nykyisten reaktoreiden turvallisuuden varmistamiseen.

Fuusiota pidetään usein ydinenergian tuotannon ”graaalin maljana”, kun taas olemassa olevien reaktoreiden turvallisuus on kaikille perustavanlaatuinen tavoite.

Näiden lisäksi kuitenkin monilla muilla teknologioilla on potentiaalia tarjota merkittäviä hyötyjä. Yliopistot ja tutkimuslaitokset voivat olla avainasemassa näiden teknologioiden tutkimisessa ja kehittämisessä erityisesti ratkaisessa haasteita, jotka liittyvät materiaalien käyttäytymiseen uusissa käyttöolosuhteissa sekä käytetyn polttoaineen kierrätykseen liittyvään kemiaan – kierrätys kun on keskeinen osa kestävästä kiertotaloutta.

Suomi on pieni maa, mutta vahvuutemme piilee joustavuudessamme ja päättäväisyydessämme. Kun päätämme yhdessä, että jokin on tarpeellista, osaamme toimia globaaleina edelläkävijöinä, kuten Posivan loppusijoituslaitoksen onnistunut valmistuminen osoittaa. Nyt on aika sitoutua johtamaan maailmaa paitsi ydinjätteen turvallisessa loppusijoituksessa niin myös ydinvoimateknologian uuden sukupolven kehittämisessä. Meillä on tietynlainen globaali vastuu ottaa johtava rooli uusissa kehityshankkeissa, erityisesti kun huomioidaan asiantuntemuksemme ydinvoiman turvallisuudessa, joka on maailmalla tunnustettu ja jota on aina pidettävä ensisijaisena prioriteettinamme.

Andrea Sand
apulaisprofessori
Aalto-yliopisto
andrea.sand@aalto.fi

The New Era of Nuclear Power

NUCLEAR ENERGY IS CURRENTLY witnessing a period of significant transformation. Public opinion, both in Finland and internationally, is more favorable than we have seen in a long time, with even the green parties turning pro-nuclear. Numerous European countries are now planning new nuclear power plants, and several nations are pursuing nuclear energy production for the first time.

At a recent conference that I attended, on modeling radiation effects in materials, the application of our research objectives to the advancement of nuclear reactor design was presented with a level of openness and pride that has been previously absent. This marks a sharp contrast to my early experience from the same conference series, in the United States some years ago, where I deliberately avoided mentioning the term “nuclear” during airport security checks, when questioned about the purpose of my travel and my research topic.

The resurgence of interest in and acceptance of nuclear energy is understandable, given the ongoing challenges with global warming, and the realization that other energy sources deemed to be green and renewable are proving to be less environmentally sustainable and not as genuinely renewable as initially perceived.

During a recent flight over Germany, I was struck by the vast number of wind turbines and solar panel farms dispersed across the otherwise scenic landscapes. Despite these extensive installations, solar and wind power still generate only a fraction of Germany’s electricity requirements. It is becoming increasingly evident that this approach will not suffice to meet our population’s energy demands, not

least of all because of the instability of production from sources dependent on the weather or the time of day.

These recent developments, and the forthcoming construction of new nuclear power plants, will necessitate the employment of tens of thousands of skilled professionals in the nuclear field. France, for instance, anticipates the need for 100,000 new employees solely for its own energy production, while Sweden’s requirements also number in the tens of thousands.

Universities across Europe are striving to address the impending demand for experts, following an extended period during which both research and education in this field were significantly reduced in most countries worldwide. The urgent need for international collaboration is apparent, not only to address the limited resources available for education and infrastructure but also to support countries with less domestic expertise.

In response to this need, Aalto University is actively involved in various initiatives, including educational programs like ENEN and Unite!. Additionally, Aalto maintains a partnership with Czech Technical University, utilizing their research reactor to train Finland’s next generation of nuclear experts. The involvement of industry is also a crucial factor in ensuring that education remains relevant to the private sector. The newly established DENSE doctoral education network, funded by the National Nuclear Waste Management Fund VYR and involving all Finnish universities and research institutes, represents a decisive step in this direction.

In addition to the growing demand for highly educated experts, there is also a pressing need for scientific research and technological development. Research necessitates adequate funding, which, within the realm of new nuclear technology, has primarily been directed towards fusion, as well as supporting the enhancement of safety measures in existing reactors.

Fusion is often regarded as the “holy grail” of nuclear energy production, while the safety of current reactors remains a critical concern for all nations. However, numerous other technologies also hold the potential to offer substantial benefits. Universities and research

institutes can play a pivotal role in exploring and advancing these technologies, addressing challenges ranging from the material demands stemming from new operating conditions to the chemistry involved in recycling spent fuel – a crucial component of a sustainable circular economy.

Finland is a small nation, and our strength lies in our flexibility and determination. When we collectively decide that something is necessary, we possess the capability to lead on a global scale, as evidenced by the successful completion of Posiva’s final repository for spent nuclear fuel. It is now time to commit to leading the world not only in the safe disposal of nuclear waste but also in the renewal of the generation of nuclear power. In a sense, we have a responsibility to the global community to take a leading role in new developments, particularly given our recognized expertise in nuclear safety, which must always remain our foremost priority.

Andrea Sand

Associate Professor
Aalto University
andrea.sand@aalto.fi

Ydinvoima-alan avainpelaajat mukana Helsingissä

Nordic Nuclear Forum oli kuin ydinvoima-alan suuri roolipeli

FinNuclearin järjestämä Nordic Nuclear Forum Helsingissä Pikku-Finlandiassa toukokuun 2024 lopulla oli kuin suuri roolipeli. Siinä olivat osallisena avainpelurit eli kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA, ydinenergia-yhtiöiden yhteenliittymä WANO, ydinvoimayhtiöitä, projektitoimijoita, poliitikkoja, regulaattori ja ydinvoimasta kiinnostunutta asiantuntijayleisöä. Ydinvoimapelurien keskustelu selkeytti osapuolten rooleja, mikä kirkasti roolipelin osallisten asemaa energiamaailman kokonaisuudessa.

Teksti ja kuvat: Risto Valkeapää

SUOMEN HALLITUKSEN YMPÄRISTÖ- JA ilmastoministeri Kai Mykkänen kiteytti asian poliittisesta näkökulmasta sanomalla, että ydinvoimaa tarvitaan sähköverkkoja vakauttavana puhtaana päästövapaana perustehona. ”Kysymys ei ole valinnasta ydin-

voiman ja uusiutuvien energiantuotantomuotojen välillä, vaan siitä että tarvitaan molemmat”, hän totesi.

Erityistä kiinnostusta foorumitapahtumaan toi Ruotsin hallituksen nimeämän ydinvoimakoordinaattorin Carl Berglöfin läsnäolo. Berglöf toimi vuosikautia Ruotsin teollisuuden palveluksessa, kunnes hänestä tuli hallituksen ydinvoima-asiaa edistävää asiantuntijakoordinaattori.

Berglöf on tuonut Ruotsin hallitukselle tekemissään raporteissa esiin keskustelutilaisuuksien merkityksen Ruotsin uusimman ydinvoimastrategian edistämiseksi. Foorumeissa selkeytetään toimijoiden roolijakoa. Koordinointi ei myöskään saa jäädä kesken, kun asiat ajan mittaan edistyvät.

Berglöf kertoi Ruotsin poliittisesta U-käännöksestä

Ydinvoiman kannatus on Ruotsissa kasvanut, ja maa pyrkii eroon fossiilisesta energiantuotannosta vuoteen 2040 mennessä. Tavoite ei

ole mahdoton, sillä jo nyt Ruotsissa sähkön tuotanto on miltei riippumaton fossiilisesta energiasta. Ruotsilla on runsaasti vesivoimaa, tuulivoimaa ja kolmannes sähköstä tehdään jo nyt ydinvoimalaitoksissa.

Ydinvoima on ollut vuosikymmeniä Ruotsissa poliittinen kysymys. Mutta samalla se on ollut myös toimiva käytännön kansallinen energian tekijä, joka on teollisuuden pitkään- teistyksen ansiosta toiminut osana kansallista energiahuoltoa, aivan kuin se olisi ollut poliittisesta maailmasta irrallinen asia.

Ruotsi tunnetaan historiasta teollisuusmaana, jonka johtava ydinvoiman erikoisyhtiö Asea-Atom on rakentanut 15 ydinvoimalaitosyksikköä. Se on toimittanut avaimet käteen -sopimuksella muun muassa TVO:n kaksi kiehutusvesireaktoria Olkiluodossa.

Kun puhutaan ydinvoiman poliittisesta U-käännöksestä, ei pidä unohtaa, että Ruotsin kuusi toimivaa ydinvoimalaitosyksikköä tuottavat tällä hetkellä noin kolmanneksen maan tarvitsemasta sähköstä. Vaikka Ruotsi 1970-80-lukujen vaihteessa luopui poliittisesti kansanäänestyspäätöksellä ydinvoiman käytöstä, se säilyi silti teollisuuden ansiosta ydinvoimaa käyttävänä valtiona.

Poliittiset päätökset ja todellisuus eivät ole olleet sama asia. Teollisuudessa ei siis Ruotsissa tapahtunut U-käännöstä, vaan se tapahtui politiikassa.

Pikku-Finlandian tilaisuudessa tuotiin useaan kertaan esiin väittämä, että ydinvoiman hyväksyttävyyden on lisääntynyt maailmanlaajuisesti, myös Euroopassa ja myös Ruotsissa. Kysymykseen, mihin ydinvoiman vastustus Ruotsissa perustuu, vastattiin, että vastustajat väittävät investointien ydinvoimaan olevan kalliita ja rakentamiseen hidasta. Molemmat väittämät ovat perusteltavissa.

Olkiluoto 3 on ydinvoiman ”Iisakin kirkko”

Pikku-Finlandiassa puhui Olkiluoto 3:n projektia esitellyt projektijohtaja Jouni Silvennoinen TVO:sta. Hän kertoi projektista. Siitä, että ydinvoimalan rakentaminen oli kestänyt pitkään kuin ”Iisakin kirkon” rakentaminen, mutta valmista tuli. Nyt ydinvoiman kirkolla Suomessa seisoo toimiva EPR. Se on 1600 megawatin N4- ja Konvoi-teknologian digitalisoitu versio, jolla tehdään sähköä vuosikymmeniä eteenpäin. Se on esimerkki muille maailman EPR-rakentajille.



Risto Valkeapää
YTM, journalistiikka
Journalisti ja tietokirjailija
risto.valkeapaa@gmail.com

Silvennoinen kertoi siis valmistuneesta projektista ja esitti virallisen kertomuksen asiasta.

Epävirallinen kertomus kaikkine projektin haasteineen olisi ollut mielenkiintoisempi, mutta sitä ei tilaisuudessa käsitelty. Epäviralliseen kertomukseen olisi sisällytynyt alkuperäisen Siemensin ja Framatomen konsortion eriytyminen, projektin sirpaloituminen, ranskalaisten yliote sekä laitoksen digitalisoinnin vaativuus. Prosessi rakentamispäätöksestä valmistumiseen vei paljon aikaa.

Virallisen kertomuksen mukaan Olkiluoto 3:n 1 600 megawatin EPR on tuotannossa ja toimii hyvin.

Pikku-Finlandiassa kerrottiin myös, että Iso-Britanniaan ollaan rakentamassa EDF:n ja kiinalaisten voimin kaksi EPR:ää. Uusia EPR-yksiköitä rakennetaan kansainvälisesti viidelle laitospaikalle yksitoista kappaletta.

EDF rakentaa Hinkley Point C:hen nuo kaksi EPR:ää, joista se omistaa 66,5 prosenttia ja China General Nuclear 33,5 prosenttia. Britannian turvallisuusviranomaisen ONR on myöntänyt yrityksille suostumuksensa. UK:ssa aiotaan rakentaa myös Sizewell C -laitospaikal- le kaksi EPR-yksikköä.

Eurooppa nousi Pikku-Finlandian foorumissa johtavaksi ydinvoiman edistäjäksi.



IAEA:n pääjohtaja Rafael Mariano Grossi.



Petra Lundström Fortumista.

Myös IAEA:lla roolinsa Ruotsin ydinvoimassa

Ruotsin poliittinen ydinvoiman U-käännös koskettaa myös kansainvälistä atomienergiajärjestöä IAEA:ta. Kansallinen ydinvoimakoordinaattori Carl Berglöf aikoo nimittäin saada IAEA:sta ulkopuolisen arvioitsijan Ruotsin ydinvoiman etenemishankkeeseen.

IAEA on suuntautunut ydinvoiman rakentamisen edistämiseen maissa, joissa ei vielä ole ydinvoimaa. Ruotsi tukeutuu kuitenkin IAEA:han sillä perusteella, että maassa ei ole pitkään aikaan rakennettu uutta ydinvoimaa. Kansainvälisen atomienergiajärjestön mu- kaantulon tarvetta perustellaan myös sillä, että sijoittajat tarvitsevat päätöstensä tueksi ulkopuolista asiantuntijanäkökulmaa.

Näistä asioista diskuteerataan siis Ruot- sissa. Ensinnäkin tehdään itsearviointi ydin- voimastrategioista. Odotettavissa on mielen- kiintoinen sisäpoliittinen keskustelu.

Ydinvoimakoordinaattori Berglöf on arvioi- nut, että ruotsalaisen ydinvoimatulevaisuuden tiellä on ainakin kolme merkittävää riskiä. Ne ovat regulaattori- eli viranomaisriski, rahoitus- riski ja poliittinen riski. Poliittista riskiä hän ei lähde arvioimaan, mutta kahteen ensin mai- nittuun haetaan siis lääkkeitä ruotsalaiseen tapaan diskuteerauksella foorumeissa ja ar- viointimenetelyssä omasta ja ulkopuolisesta näkökulmasta.

Viranomaisriskiä ei pidetä ratkaisevana, vaikka Ruotsin regulaattorilla ei ole pitkään ai- kaan ollut käsittelyssä uusien ydinvoimalaitos-

ten lupia. Ehkä kokemattomuudessa kuitenkin piilee melkoinen riski, joka ilmenee viimeistään luvitusprosessissa. Luvitusmenetelyssä pun- nitaan viranomaiseen osaamista.

Rahoitus on aina merkittävä ja jopa ratkai- seva riski, johon vaikuttavat muun muassa kor- kotason muutokset.

Kansainvälinen yhteistyö voi pienentää kansallisia riskejä. Ruotsi on tehnyt yhteis- työsopimuksia ydinvoiman kehittämisestä ai- nakin USA:n ja Ranskan kanssa. Berglöf pu- huu myös sponsoreista, minkä voi ymmärtää myös siten, että esimerkiksi Ranskan valtio ehkä lähtisi mukaan EPR:n rahoittamiseen Ruotsissa samaan malliin, kuin se takasi Olkiluoto 3 -projektin valmistumisen.

Ruotsin ydinvoiman lisäys haaste sähköverkoille

Ruotsin parlamentti hyväksyi viime vuoden marraskuussa tiekartan, jonka mukaises- ti edetään uuteen ydinvoimayhteiskuntaan. Tiekartassa on kaksi isoa ydinvoimalaa vuosille 2035, ja vuonna 2045 Ruotsissa pitäisi olla 10 uutta isoa ydinvoimayksikköä. Se tarkoittaa noin 10 000 MW uutta ydinsähkötehoa nykyi- seen verrattuna.

Berglöf kaipaa myös jatkuvaa koordinaa- tiota järjestelmältä, jonka pitää toimia kan- sallisella tasolla, seudullisella tasolla ja myös paikallisella tasolla.

Kysyin Berglöfiltä Suomen ja Ruotsin yh- teyttä, johon hän vastasi, että maittemme väli- nen yhteys on tärkeä. Suomella ja Ruotsilla on

jo tällä hetkellä tiivis ydinvoimayhteys, koska Fortum on merkittävänä pelurina ja omistajana Ruotsin ydinvoimalaitoksilla.

Voidaan visioida Suomi-Ruotsi-ydinvoimaunionista. Se olisi ydinvoimaan perustuva poliittinen ja taloudellinen valtioliittokokonaisuus, joka on jo myös sotilaallisesti liittoutunut.

Sähkö olisi kansalle merkittävä tekijä tässä luterilaisessa Pohjolassa. Jo nyt edistyksekkäimmät elävät Suomessa pörssisähkön maailmassa ja pesevät pyykkinsä halvimman sähkön pörssihinnan aikana. Kaikkein edistyksekkäimmät ajoittavat jopa ruuanlaiton pörssi-sähkön hinnan mukaan.

Suomen ja Ruotsin välisessä yhteydessä on ongelmakohtia, joista yksi on sähkönsiirrossa. Ruotsi on Suomen sähkönsiirtoyhteyksissä Manner-Eurooppaan Viron ohella ainoa vaihtoehto. Venäjän yhteys on poissuljettu.

Suomen sähkönsiirto Ruotsin kautta Manner-Eurooppaan kuormittaa kuitenkin jo ennestään kovilla olevaa Ruotsin pohjois-etelä-siirtoyhteyttä, minkä yhteyden parantaminen edellyttää suuria siirtoverkkoinvestointeja.

Keskeinen kysymys on myös suurten ydinvoimalayksiköiden maantieteellinen sijoittuminen. Tunnettu tosiasia on, että tuhannen megawatin atomivoimalaitos on ennen kaikkea sähkön tuotantolaitos. Kaukolämmön tuotanto ydinvoimalla on tässä asetelmassa SMR-teknologian varassa. SMR-laitosten sijoittaminen kuntiin ei välttämättä ole poliittisesti helppo ratkaisu.

Turvallisuus avainsana

”Ydinvoiman turvallinen käyttö on ydinvoimateollisuuden tulevan menestyksen elinehto”, STUKin pääjohtaja Petteri Tiippana totesi Nordic Nuclear Forumissa. Tiippana puhui turvallisuusviranomaisen näkökulmasta ja roolissa keskittyen pääosin Suomen tilanteeseen osana kansainvälistä kontekstia. Ajankohtaisina asioina hän mainitsi ilmastokysymykset, energiantuotannon turvallisuuden ja tuotantomuotojen kilpailukyvyyn.

Suomen hallitus tukee uusia tuotantomuotoja, rahoitusratkaisuja ja ydinvoimalainsäädännön päivittämistä ajanmukaiseksi. Hallitus fokusoi uusien projektin ja SMR:ien toteuttamiseen. Suomi on aktiivinen Euroopan Unionissa. Suomi tukee ydinvoiman lisärakentamista ja SMR:iä. Suomen nykyisiä reaktoriyksiköitä on tarkoitus käyttää vielä pitkään ja uusia yksiköitä, myös kevytesireaktoreita kehitetään.

Suomi virtaviivaistaa lisensointia ja yhteistyötä eri toimijoiden kanssa uusimalla lainsäädäntöä vuosina 2027-2028. Kansainvälinen yhteistyö on ehdottoman tärkeää yleisesti sovellettavien turvallisuusmääräysten kannalta, Tiippana totesi.

Vattenfallin asiantuntija Torbjörn Wahlborg totesi, että laajamittainen sähköistäminen on suurin yhteiskunnallinen muutosilmiö sitten teollisen vallankumouksen. Se on luonut valtavan hiilineutraalin energiantuotannon tarpeen.

”Vastataksemme tähän tarpeeseen meidän on uusittava vanhat reaktorit tai vielä parempana vaihtoehtona rakennettava aivan uusia. Tarvitaan mittavia voimalaitosprojekteja, mutta me teimme sen jo kerran aikaisemmin ja olen varma, että voimme tehdä sen jälleen”, Wahlborg julisti.

IAEA:n Grossi julisti ydinvoiman menestystä

Nordic Nuclear Forumia kunnoitti läsnäololaan myös IAEA:n pääjohtaja Rafael Mariano Grossi. Grossin mukaan ydinvoima-asenteissa on tapahtunut maailmanlaajuinen muutos positiiviseen suuntaan. Tällä hetkellä on olemassa positiivinen yhteisymmärrys ydinenergian suhteen, hän sanoi.

”Ydinvoimaa pitää viedä eteenpäin kiihtyvällä tahdilla. Sitä ei pidä vain ottaa mukaan yhtenä tekijänä eikä vain suvaittuna tai hyväksyttynä vaan edistettävänä”, Grossi sanoi.

Hänen mukaansa nyt eletään mahdollisuuksien ja tulevaisuuden näkymien aikaa. Samaan aikaan meillä täytyy olla myös selkeä näkemys teollisuuden ongelmista ja vastatuulista.

”Mutta olen varma, että ydinvoimasektorin sinnikkyys, erinomainen osaaminen ja periksiantamattomuus auttavat tekemään ydinvoimasta menestyksellisen energiantuotantomuodon”, Grossi julisti.

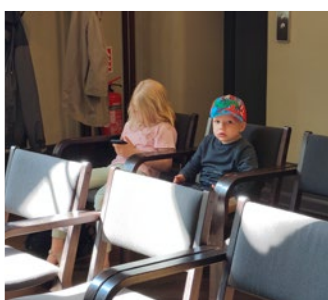


Yhteiskuvassa NNF2024-puhujat Petteri Tiippana (STUK), Jouni Silvennoinen (TVO), Petra Lundström (Fortum), Johan Svenningsson (Uniper) ja Torbjörn Wahlborg (Vattenfall).



Ruotsin hallituksen nimeämä ydinvoimakoordinaattori Carl Berglöf.

Tieteiden talon kokoussali on mieltäylentävä ja paikalla käymisen arvoinen. Myös paikalliset pullakahvit maksavat vaivan.



Tällä kertaa yleisön keski-ikää laski merkittävästi toisen esiintyjän jälkikasvun läsnäolo.

Jäsentilaisuus: "Uusia ydinvoimahankkeita Pohjoismaihin?"

Keskiviikkona 12.9.2024 pidettiin Tieteiden talolla mielenkiintoinen ja ajankohtainen jäsentilaisuus, jonka aiheena oli "Uusia ydinvoimahankkeita Pohjoismaihin?". Tilaisuus houkutteli paikan päälle noin 25 osallistujaa, mutta sen lisäksi saimme etäyhteydellä linjoille yli 40 kuulijaa. Etäosallistumismahdollisuutta jäsentilaisuuksiin tarjottaneen siis mahdollisuuksien mukaan myös jatkossa.

Teksti ja kuvat: Taina Kurki-Suonio



Dos. Taina Kurki-Suonio
Vanhempi yliopistonlehtori
Aalto-yliopisto, Teknillisen fysiikan laitos
taina.kurki-suonio@aalto.fi

JÄSENTILAISSUUDESSA KUULTIIN esitys Steady Energyn Lauri Muraselta vuonna 2023 perustetun yhtiön suunnitelmista tuottaa kaupallisesti suomalaisia kaukolämpöreaktoreita. Toisen puheenvuoron piti Fortumin uuden ydinvoiman tekninen johtaja Olli Kymäläinen meneillään olevan selvityshankkeen tavoitteista ja ensimmäisen vaiheen löydöksistä. Selvitys Fortumilla jatkuu vuoden 2024 loppuun.

Tilaisuuden puheet muodostivat hauskan vastaparin: nuori, dynaaminen yritys esitteli SMR-kehitystyötään, jonka jälkeen suuri,

arvovaltainen yritys esitteli selvitystyötä erilaisten vakiintuneiden vaihtoehtojen parissa. Ydinalan yleistä selväjärkisyyttä heijastaa se, että vaikka toisesta hehkui nuoruuden into ja toisessa pitkäaikaisen toiminnan mukanaan tuoma varovaisuus, niin lopulta aikatauluisa molemmat päätyivät jokseenkin samaan: uusia voimalaitoksia saadaan käyttöön ensi vuosikymmenen puolessa välissä.

Eniten keskustelua syntyi ydinvoiman ja tuulivoiman kilpailusta – jopa kaukolämmön tuotannossa.

Risteilyreitti vei Hevossalmen lävitse.

Illallisristeily saaristossa 9.8.2024

ATS järjestää jäsentapahtumia useamman kerran vuodessa. Tällä kertaa alkusyksyn ohjelmana oli jäsenistön toivoma illallisristeily Espoon ja Helsingin saaristossa.

Teksti ja kuvat: Taina Kurki-Suonio, Antti Snicker ja Eero Patrakka

ATS:N JÄSENRISTEILY VUONNA 2024 järjestettiin perjantaina elokuun 9. päivänä. Sääennuste oli hiukan arveluttava ukkosennusteineen, mutta 62 rohkeaa osallistujaa ilmestyi IHA-linesin laiturille

Kauppatorille sovittuun aikaan eli 14:30, jolloin aurinko paistoi ehkä liiankin lämpimästi. Aluksenamme toimi viehättävä Doris II ja kipparina Lasse Ihalainen (perheyhteyksen edustajana).

Opastettu risteily

Tilaisuus aloitettiin tervetuliaismaljoilla aluksen yläkannella, mikä vaati meiltä järjestäjiltä pientä paimentamista, koska aluksen sisätiloihin katetut pöydät buffetin ympärillä osoittautuivat joillekin osallistujille liian kutsuviksi. Kun seurakunta oli lopulta saatu kokoon yläkannelle, kipparimme esitteli lyhyesti laivan ja suunnitellun reitin.

Tämän jälkeen ATS:n puheenjohtaja Hanna Tynys sai mikrofonin ja aloitti virallisen ohjelman, jonka tärkein sisältö oli kiittää ATS-Senioreiden väistävää vetäjää Eero Patrakkaa pitkäaikaisista palveluksistaan yhteisölle sekä esitellä yhteisön uusi vetäjä, emeritaprofessori Riitta Kyrki-Rajamäki. Tilaisuuden avaus kruunattiin yhteisellä maljalla.

Suiden kustutuksen jälkeen mikrofoni siirtyi loppumatkaksi Jorma Aurelalle, joka oli ystävällisesti lupautunut tarjoamaan viihdykettä risteilyn ajaksi. Ja taso oli huikea! Jormahan on



Dos. Taina Kurki-Suonio
Vanhempi lehtori
Aalto-yliopisto
taina.kurki-suonio@aalto.fi



TkT Antti Snicker
Vanhempi tutkija
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
antti.snicker@vtt.fi



TkL Eero Patrakka
ATS Seniori
eero.patrakka@kolumbus.fi

Eero Patrakka mikrofonin ääressä, taustalla Hanna Tynys ja Jorma Aurela.



itse kokenut purjehtija ja lisäksi historiafriikki, joten risteilyn aikana saimme toinen toistaan mielenkiintoisempia informaatiopläjäyksiä Helsingin edustan saaristoon ja merenkulkuun liittyen.

Tietoa jaettiin ainakin kolmella osa-alueella: historian lisäksi liittyen maantieteeseen ja yhteiskuntapolitiikkaan. Vaikka tarinaa oli paljon, aikaa jäi myös merellisen buffetin antimien

nauttimiseen sekä seurusteluun vanhojen ystävien kanssa.

Säiden valtiat olivat lopulta armollisia tapahtumaamme kohtaan – ukkosmyrskyt kiersivät meidät eteläpuolelta, niin että taitavan kipparimme viisaiden reittivalintojen ansiosta vain pientä laivan heiluntaa oli huomattavissa ehkä tunnin ajan. Aurinko paistoi alkuristeilyn aikana aurinkokannella jopa niin lämpimästi, ettei takkeja todellakaan tarvittu.

Reittimme vei meidät ensin Espoon ulko-saariston kautta Suomenojan edustalle asti ja sitten takaisin itään sisäsaaristoa pitkin, jolloin voimistuneet tuulet eivät juuri häirineet. Matka jatkui Helsingin itäosiin, missä mielenkiintoista oli Hevossalmen läpiajo, jolloin meidän piti hetki odottaa sillan avaamista, sekä kapean, mantereen ja Villingin saaren erottavan salmen läpi ajaminen, minkä keskellä vielä töröttö iso luoto. Salmen jälkeisellä Villasaaren selällä Jorman kertomukset Jollaksen historiasta ja Uutelan ulkoilualueesta herättivät monen kiinnostuksen lähteä tutustumaan näihin alueisiin.

Paluumatkalla Kauppatorille saimme vielä kauhistella rakenteilla olevaa, valtavaa Kruunuvuoren siltaa, ja tutustua aktiivisen kiistelystä alaiseen Stansvikiin metsän tilanteeseen. Takaisin IHA-linesin laituriin saavuimme tasan suunnitellulla kellonlyömällä eli klo 20:00.

Aluksesta purkautui ilmeisen iloinen, tapahtumaan tyytyväinen ja hyvin ruokittu joukko. Meille järjestäjille jäi vahva vaikutelma siitä,

että tällaisia tapahtumia kannattaa järjestää myös jatkossa.

Eero Patrakka: "Senioreissa on virtaa"

ATS:n johtokunnassa keskusteltiin loppukeksillä 2009 seuran eläkeläisille tarkoitetun "veteraaniryhmän" perustamisesta Young Generationin mallin mukaisesti. Johtokunta kyseli halukkaita vetäjiä, joita ilmaantui täydet kolme kappaletta. Valinta kohdistui minuun, ilmeisesti sen takia, että olin toiminut ATS:n puheenjohtajana 1990-luvulla.

Varsinaisena vastaehdokkaana oli tänä vuonna menehtynyt Tapani Graae, jonka mahdollisuuksia heikensi se, että hän asui Ruotsissa. Tapanista tuli senioriryhmälle korvaamaton toimija, jonka ansioita olivat ekskursion järjestäminen Västeråsiin ja Baltian maihin.

ATS:n vuosikokous hyväksyi ATS-Seniorien perustamisen maaliskuussa 2010, ja Seniorien toiminta käynnistyi vilkkaana heti samana keväänä. Heti ensimmäisenä vuotena jäseniksi ilmoittautui 58 henkilöä, ja jäsenmäärämme kasvoi tasaisesti saavuttaen tänä vuonna 100 henkilön rajapyykin. Lukua tarkasteltaessa on otettava huomioon, että Seniorien toimintaan osallistuminen edellyttää aktiivisuutta siinä määrin, että on itse ilmoittauduttava jäseneksi.

ATS:n jäsenrekisterissä oli tätä kirjoitettaessa 729 nimeä, joista yli 65-vuotiaita oli 201.



Jorma Aurela toimi risteilyn oppaana.



*Risteilyllallinen mais-
tui. Tämän pöydän ää-
ressä ATS-Senioreita:
Seppo Karttunen,
Rainer Salomaa, Eero
Patrakka ja Riitta
Kyrki-Rajamäki.*

Enintään 50 vuotta täyttäneitä oli 380, joten vähemmistöjäsenistä (349) oli yli 50-vuotiaita. Onko tämä vähän vai paljon lieenee makuasia, mutta uskoakseni ydinvoiman uusi tuleminen on näkynyt ATS:nkin kiinnostavuudessa ja tietysti toiminnassakin.

ATS-Seniorit suunnittelivat tulevan toimintansa huolellisesti ja laativat heti alkuun toimintasäännön, jota on nähdäkseni pystytty hyvin noudattamaan. Seniorit täydentävät seuran yleistä toimintaa omalle jäsenistölleen suuntaamallaan aktiviteeteilla, joista tärkeimmiksi ovat muodostuneet lounastilaisuudet ja ekskursion.

Näiden järjestäminen on edellyttänyt lukuisten jäsentemme työpanosta. Esimerkiksi lounastilaisuuksien yhteydessä pidettyjä esityksiä on tähän mennessä ollut parikymmentä, joista noin puolet on toteutettu seniorien omin voimin. Toista puolta varten on hankittu ulkopuolinen esiintyjä.

Ekskursioita ja tutustumiskäyntejä on tehty kaikkiaan 11 kotimaahan ja neljä ulkomaille. Ulkomaan ekskursion Ruotsiin, Baltian maihin, Venäjälle ja Ranskaan on hoidettu ryhmämatkoina. Viimeksi mainitun matkan vastuuhenkilö oli Timo Vanttola, joka on järjestänyt muitakin tilaisuuksia.

Kun vielä otetaan huomioon seniorien panos tiedotustoiminnassa, jossa merkittävin saavutus oli ATS:n historiikin laatiminen, ei ole perusteetonta todeta, että Senioreissa on ollut ja on edelleen virtaa. Korona-aika heikensi virran voimakkuutta pahemman kerran, eikä toiminta ole vielä saavuttanut entistä intensiteettiä.

Ehdin toimia ATS-Seniorien vetäjänä yli 14 vuoden ajan. Työni ei olisi ollut mahdollista ilman lukuisten ihmisten merkittävää panosta. Yhdessä olemme tehneet senioriryhmästäme kiinnostavan ja viihdyttävän samanhenkisten jäsenten konklaavin, jonka tilaisuuksiin on aina ollut miellyttävää osallistua. Kiitän kaikkia toimintaamme vaikuttaneita antautuvasta työstä yhteisen asian puolesta. Samalla toivottan seuraajalleni lukuisia onnistuneita vuosia seniorien vetäjänä.

Katsaus tuleviin tapahtumiin

Johtokunta haluaa tässä yhteydessä mainita tulevista tapahtumista seuraavaa:

- Sysseminari järjestetään Helsingin Yliopiston pienessä juhlasalissa 20.11. klo 13 alkaen.
- Jäsenistön toiveesta lokakuun lopussa 29.10. jäsentapahtuma Raumalla.

- Ensi keväälle luvassa uusi yritys ekskursion Kajaaniin, kohteena paitsi superlaskentatietokone CSC:llä niin nyt myös Terrafame ja ajankohtana alustavasti huhtikuun alku (4.4.).

Kaikista tulevista tapahtumista lähetetään lisätietoa ja ilmoittautumislinkki tulevissa uutiskirjeissä ja/tai sähköpostitse. Johtokunta ottaa vastaan ehdotuksia tulevista jäsentapahtumista.

Lisäksi johtokunta mainitsee, että jäsenten toivomaan ulkomaan ekskursion etsitään tapahtumajärjestäjää/vetäjää. Jos olet innokkaasti lähdössä ekskursiolle, omaat hyviä kontakteja potentiaaliseen kohteeseen ja haluat nähdä vaivaa järjestelyjen suhteen, ole yhteydessä johtokuntaan!



ATS YG ja symposiumiin osallistujat valmiina lounaalle ja kesäkisailuun (kuva: Juuso Soikkeli).

ATS YG Summer Symposium järjestettiin tänä kesänä Willa Vatkulassa Hausjärvellä 7. kesäkuuta. Symposiumista vastasi poikkeuksellisesti ATS YG:n oma tiimi, joka koostui eri yritysten edustajista. Tilaisuuden sponsoreina toimivat VTT, Fortum, TVO ja Platom. Tilaisuus keräsi noin 90 osallistujaa ympäri Suomea ja useamman Ruotsistakin.

Teksti: Jenna Järvenpää ja Roope Lipiäinen



DI, FM Jenna Järvenpää

Research Scientist, – Nuclear Energy Solutions

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
jenna.jarvenpaa@vtt.fi



DI, Roope Lipiäinen

Design Engineer, Nuclear Safety
Fortum Power and Heat Oy
roope.lipiainen@fortum.fi

ATS YG:N PERINTEINEN ydinvoimasta ja -energiasta kiinnostuneille opiskelville nuorille ja valmistuneille suunnattu Summer Symposium noudatti hyväksittyä havaittua tuttua kaavaa: ensin keskityttiin asiaan esitysten ja kysymysten kautta ja sitten verkostoiduttiin haastavien ja monipuolisten rastitehtävien avulla. Lopuksi iltaa vietettiin saunateltan, paljujen, kitaramusiikin ja herkullisten hot dogien äärellä auringon paistaessa.

Esityksiä SMR-kentältä

Tämän vuoden Summer Symposium käsitteli hyvin laajasti pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR). Seminaariosuuden teema oli ”Mikä on SMR?”. Teemaa käsittelevät Sylvi Räisänen Fortumilta, Tomi Pakarinen Platomilta, Jens Hartmann LUT-yliopistolta, Hannu Tuulensuu Steady Energyltä sekä Rebekka Komu VTT:ltä.

Sylvi Räisänen (Fortum) esitteli diplomityönsä alustavia simulointituloksia höyrösykleistä sekä sähkön ja lämmön yhteistuotannosta käyttäen esimerkkinä ranskalaista NUWARD-reaktoria. Tomi Pakarinen (Platom) taas esitteli NuScale-reaktorin mallintamista TRACE-systeemikoodilla. Platomien mallinnus normaalin syöttöveden menetyk-

SMR-aihepiiri innosti lähes sataa kotimaista ja kansainvälistä kuulijaa (kuva: Juuso Soikkeli)



sestä antoi vakuuttavia tuloksia 1 % päähän NuScalen omista tuloksista.

Jens Hartmann (LUT-yliopisto) esitteli tuloksia julkaisemastaan artikkelista ”The operator and the seven small modular reactors – An estimate of the number of reactors that a single reactor operator can safely operate”. Esimerkkinä yhdellä laitosalueella voi olla jopa 12 NuScale-reaktoria. Reaktorit ovat yksinkertaisempia kuin tavanomaiset suuret ydinvoimalaitokset, joten operaattoreita ei välttämättä tarvita yhtä monta. Tutkimuksessa verrattiin lennonjohdon toimintaa useamman lentokoneen ohjauksesta ydinvoimalaitosten operointiin sekä oli tehty kysely usealle reaktoriope-
raattorille, kuinka monta reaktoria he uskoisivat olevan mahdollista valvoa eri olosuhteissa.

Hannu Tuulensuu (Steady Energy) ja Rebekka Komu (VTT) esittelivät LDR-50-reaktoria, joka on matalalämpöinen (150 °C) ja matalatehoinen (50 MW lämpöteho) kaukolämmön tuotantoon suunniteltu reaktori. Steady Energy on tutkinut eurooppalaisia kaukolämpöverkkoja ja erityisesti Puolassa on huomattu olevan mahdollisuuksia useille reaktoreille. Ensimmäisten kaupallisten laitosten rakentaminen pystytään aloittamaan 2030.

Rebekka Komu taas esitteli LDR-50:n turvallisuusanalyysien tuloksia SBO- ja LOCA-onnettomuustilanteissa käyttäen Apros-systeemikoodia, OpenFOAM CFD-ohjelmaa ja neutroniikan laskentaa VTT:n Kraken-

Willa Vatkula tarjosi loistavat tilat sekä seminaariosuuteen että ulkorasteille (kuva: Juuso Soikkeli)



koodikytkennällä. Tulokset osoittivat jälkilämmönpoiston toimivan ja laitosdesignin ehkäisevän ongelmia.

Tiivistä kisailua ryhmissä

Seminaariosuuden jälkeen luvassa oli lounas ja ryhmiin jakautuminen. Mukana olleet seitsemän Ringhalsin, OKG:n, Vattenfallin ja Westinghouse Electric Sweden:in edustajaa sulautuivat joukkoon helposti ja toivottavasti oppivat muutaman sanan suomea illan aikana. He olivat kuulleet huhua ATS YG:n hyvästä meiningistä, tasokkaista seminaariesityksistä sekä mukavasta jäsenistöstä, joten päättivät tulla Suomeen vierailulle ensin VTT:n Ydinturvallisuustalolle ja Tutkimushalliin sekä seuraavana päivänä Summer Symposiumiin. ATS YG on aiemminkin ottanut vastaan ruot-

salaisia YG-nuoria ja jatkossakin panostamme rajat ylittävään yhteistyöhön.

Perinteeksi muodostunut kesäkisailu toteutettiin aurinkoisessa säässä kymmenellä joukkueella kymmenellä eri miehitetyllä rastilla. YG-nuoret niin Suomesta kuin Ruotsista pääsivät heittämään tikkaa, ratkomaan vaikeita pulmapelejä, kokeilemaan telepaattisia kykyjään numerokorttien pinoamisessa, sanoittamaan ydinvoimalauluja kitaran ääressä sekä testaamaan osaamistaan tietovisassa. Lisäksi joukkueet pääsivät kisaamaan frisbeen heitossa, jalkapallon tähtäyksessä, rikkinäisessä puhelimessa, esineiden tunnistamisessa SMR:ien osiksi, foliohatun taiteilusta SMR:n osaksi sekä kohta vanhenevan ydinenergialain heittämisessä ”kadotukseen” kaikilla Suomen virallisilla kielillä.

ATS YG haluaa erityisesti kiittää Olkiluodon YG:tä, Pasi Antikaista ja Orvokki Eerolaa sekä



Rebekka Komun ja Hannu Tuulensuun esitykset käsittelivät LDR-50-kaukolämpöreaktoria (kuva: Juuso Soikkeli).



Uusien ydinvoimaan liittyvien sanoitusten keksimiseen tarvittiin joukkueen tukea (kuva: Juuso Soikkeli).



Yhden joukkueen taidonnäyte SMR-esineen tai -asian taittelusta (kuva: Juuso Soikkeli).



Jens Hartmann sivusi esityksessään Saksan ydinvoiman tilannetta ja ydinennergian käytön lopettamista (kuva: Juuso Soikkeli).



Petsattu ja huollettu voittajapokaali valmiina seuraavalle organisaatiolle (kuva: Jenna Järvenpää).

mutta mukana olleita innovatiivisista ja hyvin toteutetuista rasteista! Tiedätkö sinä, mistä tulee Vatkula-tilan nimi, mikä on hauste tai Homer J. Simpsonin ammatti? Tai pystyisitkö tunnistamaan rikkiäisen puhelimen keskivaiheella lauseen: "Kuutelot tehdään kuoritusta maidosta, ohrajuhuista, suolasta ja kiirattusta sianrasvasta ja niiden kanssa juodaan puolukkaserpää".

Palkintojen jaolla kohti tulevaisuutta

Illan hämärtyessä oli palkintojen aika. Kesäakisailun voitti Moderators-joukkue useamman pisteen erolla toiseen (TBA 2030) ja kolmanteen (Coolant Hukkas) joukkueeseen. ATS YG Summer Symposiumin perinteiden mukaan palkittiin kesäakisailuun osallistunut paras organisaatio. Tällä kertaa voiton vei Hausjärven kupeessa Willa Vatkulan ylisillä Fortum Loviisa, joka sai niukasti enemmän pisteitä kuin toiseksi jäänyt TVO ja kolmanneksi jäänyt VTT. Vasta korjattu, petsattu ja kiillotettu kiertopalkintopokaali lähti Fortum Loviisan matkaan ja toivottavasti löytää itsensä myös seuraavaan ATS YG Summer Symposiumiin ensi vuonna.

Kyseisen kiertopalkinnon historiassa, joka ulottuu vuoteen 2005, on Fortum Loviisa voittanut kerran aiemmin (2019), Fortum Keilalahti/-niemi neljä kertaa (2011–2012, 2016, 2022), VTT myös neljästi (2008, 2010, 2013, 2023), STUK kahdesti (2006–2007) kuin myös COVID-19 (2020–2021), sekä TVO kolmesti (2009, 2014, 2017). Kerran onni on suosinut Fortum Nuclear Servicea (2005), Helsingin yliopiston radiokemistejä (2015), sekä Fennovoimaa (2018).

ATS YG lämpimästi suosittelee kaikkia yrityksiä ja korkeakouluja kannustamaan omia kesätyöntekijöitä ja opiskelijoita osallistumaan ilmaiseen Summer Symposiumiin sekä muihin ATS YG:n järjestämiin tapahtumiin. Kiitämme myös VTT:tä, Fortumia, TVO:ta ja Platomia tuesta tämän Summer Symposiumin mahdollistamiseksi sekä Willa Vatkulaa erittäin hyvästä palvelusta ja herkullisista tarjoiluista.

Eriyiset kiitokset haluamme antaa myös Platomin Herkko Pirkkalaiselle erinomaisista ja sujuvista käytännön järjestelyistä muun muassa seminaarin toteuttamisessa sekä saunateltan hankkimisessa ja lämmittämässä. 

Advancing Innovations in Radiopharmaceuticals at the NOMATEN Centre of Excellence

The NOMATEN Centre of Excellence (CoE) in Multifunctional Materials for Industrial and Medical Applications is a collaborative initiative involving the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) in Poland, the Technical Research Centre of Finland (VTT), and the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA). While at the forefront of cutting-edge research on next-generation structural steels and alloys resistant to radiation, temperature, and corrosion, NOMATEN also pioneers innovative studies in the development of theranostic molecular radiopharmaceuticals. These advancements aim in targeted, personalized medicine to revolutionize therapeutic approaches, leading to more effective treatments and significantly improved patient outcomes.

Text: M. Pruszyński, A. Krzyczmonik, K. Iljin **Figures:** Copyrights of all figures are owned by the NCBJ



Marek Pruszyński, PhD, DSc
Head of the Novel Radiopharmaceuticals Group
NOMATEN Centre of Excellence
National Centre for Nuclear Research
marek.pruszynski@ncbj.gov.pl



Anna Krzyczmonik, PhD
Novel Radiopharmaceuticals Group
NOMATEN Centre of Excellence
National Centre for Nuclear Research
anna.krzyczmonik@ncbj.gov.pl



Kristiina Iljin, PhD
Research Team Leader
Immunotechnology, Sensing Solutions
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
Kristiina.Iljin@vtt.fi

THE NOMATEN CENTRE OF EXCELLENCE was established in September 2018 as part of the European Union's Teaming for Excellence project and is based at the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) in Otwock-Świerk, Poland [1]. Its mission is to bridge the gap between nuclear and non-nuclear technologies, especially to transfer advanced knowledge from the nuclear sector to benefit broader industries and healthcare.

International collaboration, knowledge exchange, and dissemination are key components of this initiative. The vision and concept of NOMATEN were outlined in a previous article published in *ATS Ydintekniikka* 1/2024 [2], whereas *ATS Ydintekniikka* 2/2024 [3] detailed the collaboration between Polish and Finnish groups on the development of new generations of steels and high-entropy alloys, as well as studies on the impact of radiation damage on their mechanical properties.

The next exciting area of cooperation is in radiopharmaceutical sciences, focusing on developing new solutions for both diagnosis and therapy in nuclear medicine. This article provides a brief overview of the innovative work currently being pursued by NOMATEN in this field.

Innovations and Developments in Radiopharmaceuticals

Radiopharmaceuticals are a crucial class of medical compounds that combine radioactive isotopes with pharmaceutical agents, playing a vital role in modern nuclear medicine. These compounds are essential for both diagnostic and therapeutic applications.

Research reactor MARIA at the National Centre for Nuclear Research, NCBJ

In diagnostic imaging, radiopharmaceuticals are administered to patients, where they bind to specific targets and emit radiation detectable by imaging devices. This allows clinicians to visualize conditions such as cancer, heart disease, metabolic as well as neurological disorders with exceptional precision.

Therapeutically, radiopharmaceuticals offer a targeted approach by delivering radiation directly to diseased cells, such as malignant tumours, while minimizing exposure to healthy tissues. This precise delivery mostly results in fewer side effects and is often combined with conventional treatments like chemotherapy or surgery, ultimately improving patient outcomes.

Looking ahead, the field of radiopharmaceuticals is on the cusp of ground-breaking advancements. Researchers are developing new compounds with enhanced targeting capabilities, which could enable more personalized treatments tailored to the specific biological characteristics of each patient's condition.

Additionally, there is a strong focus on improving the production processes for medically relevant radioisotopes, aiming to make them more economically viable and widely available. Innovations in the stable coupling of these radioisotopes to biomolecules are also critical. These advancements are expected to lead to more effective therapies for challenging medical conditions.

The Novel Radiopharmaceuticals Research Group at NOMATEN CoE, in collaboration with scientists from VTT, CEA and Radioisotope Centre POLATOM (NCBJ), is working together to advance these developments. Key research areas include:

- i. Radionuclide production. Our research explores innovative production methods for both established and emerging radioisotopes. Leveraging the advanced facilities of the MARIA research reactor and the newly installed IBA Cyclone 30XP cyclotron at the CERAD centre within NCBJ, we aim to enhance the efficiency and scalability of radionuclide production. This includes optimizing processes for both commercial and novel isotopes to meet the growing demands of nuclear medicine.
- ii. Target material preparation and irradiation. We focus on preparing target materials in various forms, such as very thin layers electrodeposited or vaporized on



support, thin foils, powders, or solutions. Effective radiochemical separation is crucial, requiring not only high recovery rates of the produced radioisotopes but also efficient recovery of the target materials, which are often isotopically enriched and therefore costly.

- iii. Novel targeting vectors development. Developing biomolecules that precisely target specific receptors on cancerous cells is vital for personalized medicine. Researchers at VTT have expertise in developing monoclonal antibody fragments and other proteins for bioanalytical, diagnostic, and pre-clinical applications. For example, Carcinoembryonic Antigen and Human Epidermal Growth Factor Receptor 2 targeting antibodies have been produced at VTT in different formats. Additionally, scientists at POLATOM are developing new receptor-targeting peptides, including those for Somatostatin Receptor subtype 2 and Prostate-Specific Membrane Antigen (PSMA).
- iv. Biomolecule labelling. Ensuring the stable coupling of radioisotopes to biomolecules, including monoclonal antibodies, their fragments, and peptides, is critical for precise diagnostics and therapeutics. Our collaboration with research groups from CEA and Université Paris-Saclay focuses on developing various prosthetic groups and nanometric organic platforms (micelles, as well as macrocyclic original molecules named bambusurils) for radio-

labelling with halogen elements, also using advanced techniques such as disulphide rebridging to enhance labelling efficiency and accuracy when amino-acid-based structures are concerned, without forgetting the development of generic, ultra-fast and efficient labelling methodologies dedicated to radiometals.

- v. Multimodal nanomaterials development. Some of these nanomaterials are engineered to possess luminescent properties upon exposure to Near Infrared Radiation (NIR) and to incorporate radioisotopes, allowing for dual-mode detection of cancerous cells, such as those in lymph nodes. Together with scientists from CEA, studies are performed on the design and synthesis of theranostic micellar nanocarriers for imaging and targeted radiosensitization due to the encapsulation of gold nanoparticles in micelles and their simultaneous labelling with theranostic lutetium-177 radioisotope.
- vi. Preclinical evaluation. Comprehensive evaluations, including both *in vitro* and *in vivo* studies, are conducted to assess the efficacy and safety of the developed compounds and materials. This rigorous testing is essential for validating the potential of new radiopharmaceuticals before they advance to clinical trials. Here again, the collaboration with CEA is crucial, in particular via the expertise and equipment belonging to the Service Hospitalier Frédéric Joliot.

Unique Alliance and Research Infrastructure

The NOMATEN CoE benefits from the unwavering commitment of all three partners, who contribute their research expertise and infrastructure to advance the Centre's mission. The NCBJ, located in Poland, is one of the largest scientific institutes in Central Europe, equipped with state-of-the-art chemical, radiochemical, and biological laboratories. These facilities enable detailed studies and the advancement of radiopharmaceutical technologies.

At the core of this infrastructure is the MARIA research reactor, the only operational nuclear reactor in Poland and one of the world's foremost producers of isotopes for radiopharmaceuticals. As the fourth largest research reactor in Europe by power, MARIA utilizes neutrons to irradiate target materials, producing critical radioisotopes used in medicine and industry. The reactor is particularly important for producing iodine-131, molybdenum-99, lutetium-177, and other essential isotopes in nuclear medicine.

In addition to the MARIA reactor, the Centre for Design and Synthesis of Molecularly Targeted Radiopharmaceuticals (CERAD, NCBJ) accommodates a Cyclone 30XP cyclotron provided by the Belgian company IBA. This advanced cyclotron is capable of accelerating protons and alpha particles to 30 MeV and deuterons to 15 MeV, positioning it as one of only three such cyclotrons in Europe. This high-energy cyclotron enables the production of a wide range of medical radioisotopes, including those not previously produced in Poland, such as astatine-211 and iodine-123, alongside more traditional isotopes like fluorine-18, copper-64, and zirconium-89.

The NCBJ also houses the Radioisotope Centre POLATOM, which is a well-known manufacturer and distributor of radioisotopes and radiopharmaceuticals used in nuclear medicine. This centre is GMP (Good Manufacturing Practice)-certified for radiopharmaceutical manufacture for both diagnostic and therapy, as well as for the preparation of radiopharmaceuticals for clinical trials.

The combination of a nuclear reactor and a 30 MeV cyclotron within a single institute is a unique and powerful feature of the NCBJ. This integrated approach allows for comprehensive radiopharmaceutical research, covering all stages from production to application, with-

out the need for external sourcing of radioisotopes. Collaboration with VTT enhances these capabilities by providing access to novel antibodies and their fragments developed through phage display technology, a cost-effective and time-efficient alternative to traditional hybridoma methods that bypasses the need for immunizations and mammalian cell cultures.

Partnering with CEA further strengthens our work by allowing the development of innovative methodologies for the stable coupling of various radioisotopes to targeting vectors, including rapid "click" reactions mandatory for short-lived radioisotopes. Additionally, close cooperation with POLATOM ensures rigorous preclinical evaluations, supporting the translation of our research into clinical applications and routine production.

Together, these extensive resources and collaborative efforts position the NOMATEN CoE to drive significant advancements in personalized medicine. Our ongoing innovations in molecular radiopharmaceuticals are poised to make a substantial impact, paving the way for future breakthroughs.

Future Plans of the NOMATEN CoE

The research at NOMATEN CoE is focused on advancing the field of theranostic radiopharmaceuticals. Through collaboration with partner institutions, we bring together expertise across the full spectrum of radiopharmaceutical research, from radionuclide production and purification to radiolabelling and the application of these technologies to novel biomolecules, including targeting peptides and small molecules developed by our partners, culminating in comprehensive preclinical evaluations, both *in vitro* and *in vivo*.

To achieve our ambitious goals, we plan to leverage our state-of-the-art infrastructure and invest in advanced equipment, supported by recent funding. The expansion strategy includes enhancing our preclinical laboratory with modern SPECT-CT and PET-CT imaging systems, which we aim to integrate in the near future with optical imaging technologies such as fluorescence and bioluminescence tomography, Cherenkov imaging, and magnetic resonance imaging.

Additionally, we plan to upgrade or replace key equipment, including multimodal plate readers (featuring fluorescence, chemiluminescence, and autoradiography modules), flow and image cytometers with updated lasers and filters, multi-channel gamma and beta scintillation counters, and fluorescence microscopes. These investments in cutting-edge technology will empower us to conduct a comprehensive range of studies on novel radiopharmaceuticals and their preclinical evaluation, demonstrating both diagnostic potential and therapeutic efficacy.

We are excited to build collaborations with other research groups and industry partners to expand our capacity for participating in European projects within large consortia and to offer specialized research services to industrial partners. By joining forces, we can drive innovation and make meaningful contributions to the field of radiopharmaceuticals.

As we expand our research infrastructure, we are also opening new opportunities for talented professionals, including recruitment of specialists in cyclotron operation and SPECT-PET-CT imaging systems. Additionally, the grants we have received will allow us to welcome ambitious and passionate scientists who are eager to work in an internation-



Installation of the IBA Cyclone 30XP cyclotron at the CERAD centre, NCBJ.



Group photo of the participants of the NOMRad 2024 conference.

al team and collaborate with leading experts in the field.

If you are interested in joining to our team, please follow recruitment offers on NOMATEN CoE, POLATOM and CERAD websites. We invite you to connect with us also to learn more about the radiopharmaceutical studies at NOMATEN CoE or to discuss potential collaboration opportunities.

NOMRad 2024 – A Hub for Radiopharmaceutical Innovations

The NOMATEN CoE successfully hosted the inaugural NOMATEN International Radiopharmaceutical Conference (NOMRad 2024) on June 25-27, 2024, in Warsaw, Poland [4]. The scientific committee was composed of representatives from NOMATEN (Marek Pruszyński) and collaborating institutions: CEA (Frédéric Dollé), VTT (Kristiina Iljin), and POLATOM (Renata Mikołajczak).

The conference was organised as part of a project funded by the Polish National Agency for Academic Exchange (NAWA) under the Welcome to Poland programme. For the first two days, the conference took place in a central Warsaw venue, offering a vibrant setting for scientific exchange. On the third day, participants had the opportunity to visit NCBJ to explore its research facilities.

The event attracted nearly 100 attendees from three continents and 13 countries, with more than half of the participants travelling from abroad. The conference featured four distinguished invited speakers: Prof. Michael R. Zalutsky, Prof. Alfred Morgenstern, Prof. Jolanta Kunikowska, and Prof. Valery

Radchenko, who delivered insightful lectures on current topics in radiochemistry and nuclear medicine.

Attendees presented their research across a range of topics including radioisotope production and separation, radiolabelling with both metallic and non-metallic radioisotopes, preclinical studies, and clinical trials. In addition to oral presentations, participants had the opportunity to showcase their work through poster presentations.

PhD students also participated in the 3-Minute Thesis (MT180) competition, where they succinctly presented their dissertation topics in one slide only, and within 180 seconds. The scientific committee awarded the Young Scientist Awards in several categories: best MT180 presentation, best poster presentation, and best oral presentation.

The conference provided participants with opportunities to network, connect, and build a diverse community, particularly for young scientists, with researchers across various disciplines. It also sparked discussion on collaboration between NOMATEN CoE and the Radiochemistry and Preclinical PET Imaging departments at the University of Turku.

Following the overwhelmingly positive feedback from participants, the NOMRad conference is set to become a recurring event, with the next edition planned for 2026.

Acknowledgements

NOMATEN Centre of Excellence received funding from the following grants:

The European Union Horizon 2020 research and innovation programme under

grant agreement No 857470 and from the European Regional Development Fund via Foundation for Polish Science International Research Agenda PLUS programme grant No MAB PLUS/2018/8.

The European Union budget in the competition H2020-WIDESPREAD-2018-2020/WIDESPREAD-01-2018-2019: Teaming Phase 2. in the preparation, implementation and updating of activities, maintenance of material resources necessary for carrying out activities, acquisition and modernisation of scientific and research apparatus, maintenance and development of personnel potential necessary for the implementation of activities, and dissemination of the results of scientific activities.

The state budget within the framework of the undertaking of the Ministry of Science and Higher Education “Support for the activities of Centres of Excellence established under Horizon 2020”.

We want to acknowledge and express our gratitude to Director of Research Frédéric Dollé from Fundamental Research Division of Frédéric Joliot Life Science Institute of the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA) for his excellent work especially in supporting NOMATEN CoE to organize the first NOMRad conference and developing the scientific network under the radiopharmaceutical research.



References

- 1 <https://nomaten.ncbj.gov.pl>
- 2 ATS Ydintekniikka, 1 vol. 53 (2024) p. 9
- 3 ATS Ydintekniikka, 2 vol. 53 (2024) p. 15
- 4 <https://events.ncbj.gov.pl/event/322>



Kaspianpolyypikasvustoa lämmönsiirtimessä (kuva: Teollisuuden Voima Oyj).

Itämeren vieraslajien aiheuttamat ongelmat voimalaitoksissa – nykyhetki ja tulevaisuus

Itämeren odotetaan lämpenevän ja jäätalvien lyhentyvän ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Samalla olosuhteet voivat muuttua aiempaa suosiollisemmiksi sekä alueella esiintyvien lajien että uusien vieraslajien esiintymisen kannalta. Tämä tulee ottaa huomioon runsaasti jäähdytystä käyttävien voimalaitosten toiminnassa ja uusien voimalaitosten suunnittelussa.

Teksti: Satu Ojala



FM Satu Ojala

Ympäristöasiantuntija
Fortum Power and Heat Oy
satu.ojala@fortum.com

MONET ITÄMEREN RANNALLA sijaitsevat voimalaitokset hyödyntävät suuria määriä merivettä jäähdytykseen. Meriveden käytöstä on kokemuksia jo pitkältä ajalta, mutta ilmastonmuutos ja uusien paikallisesti ennalta tuntemattomien eliölajien ilmestyminen muuttavat laitosten toimintaympäristöä.

Ennakoimattomia ongelmia on ilmaantunut, kun järjestelmiin on päässyt uusia vieraslajeja, jotka aiheuttavat niin kutsuttua fouling-haittaa. Fouling-haitassa järjestelmissä kasvavien organismien vaikutuksesta virtaukset putkistoissa heikentyvät ja putket voivat jopa tukkeutua, jolloin ilmiö voi laitoksen käy-

tettävyyden ja taloudellisuuden heikkenemisen lisäksi vaarantaa myös laitoksen turvallisuuden.

Voimalaitoskohtaista tietoa tästä aihepiiristä on julkistettu varsin niukasti ainakin Suomessa, mistä heräsi Fortum Power and Heat Oy:ssä (Fortum) ajatus tehdä selvitys aiheeseen liittyen. Selvitys on toteutettu Energiategollisuus ry:n Ympäristöpoolin rahoituksella sekä Fortumin ydinvoimaliiketoiminnan tutkimus- ja kehitysrahoituksella. Selvitykseen tietoja antaneita yhtiöitä olivat: Teollisuuden Voima Oyj, Helen Oy, Oskarshamn Kraftgrupp AB ja Forsmarks Kraftgrupp AB. Selvityksessä on hyödynnetty myös Fortumin Loviisan ja Inkoon voimalaitoksen toiminnasta kertynyttä tietoa.

Tämän selvityksen päätavoitteena oli koota tietoa ongelmista, joita vieraslajit ovat aiheuttaneet suuria määriä merivettä käyttäville voimalaitoksille Itämeren ranta-alueilla Suomessa ja Ruotsissa. Selvitys rajattiin koskemaan ensisijaisesti voimalaitosten käytön kannalta haitallisimpia selkärangattomia vieraslajeja. Selvitys on ladattavissa sivustolta <https://energia.fi/julkaisut/vieraslajien-aiheuttamat-ongelmat-voimalaitoksissa-fortum-power-and-heat-oy-2023/>.

Vieraslajit Itämerellä ja niiden torjuminen

Vieraslailla tarkoitetaan kasvia, eläintä tai muuta eliölajia, jotka ihmisen toiminnan, tahattoman tai tahallisen, seurauksena ovat levinneet uusille alueille. Vieraslajia pidetään haitallisena, jos sen tuonnin tai leviämisen on todettu muun muassa uhkaavan tai haittaavan luonnon monimuotoisuutta. Vieraslajit voivat myös aiheuttaa merkittävää taloudellista haittaa.

Osa Itämerellä tavatuista vieraslajeista on asettunut elämään sinne pysyvästi. Ne pystyvät lisääntymään ainakin osassa Itämeren. Vuonna 2016 Itämeren merellisen ympäristön suojelukomissio (HELCOM) arvioi, että koko Itämeressä on noin 140 ei-kotoperäistä tai tuntemattomasta alkuperästä olevaa lajia.

Vieraslajit.fi-sivustolla on tällä hetkellä esitelty 36 lajia, jotka on tavattu Itämerellä Suomen aluevesillä.

Vieraslaalien siirtyminen ja leviäminen uusille alueille on seurausta ihmisen toiminnasta. Vieraslajeja pääsee kulkeutumaan Itämereen muun muassa laivaliikenteen mukana paino-

lastivesitankeissa. Myös pienemmät alukset ja veneet voivat levittää fouling-lajeja vesialueiden välillä.

Kehityksen yleiskuva on, että ilmastonmuutoksen edetessä Itämeri lämpenee ja talvet tulevat olemaan leudompia, jolloin lämmintä vettä tarvitsevat vieraslajit tulevat todennäköisesti yleistymään ja levittäytymään Itämerellä entistä pohjoisemmaksi. Lisäksi paikalliset ongelmat voivat korostua, sillä vesialue, joka altistuu voimalaitoksen jäähdytysveden tuomalle lämpövaikutukselle, voi tarjota suotuisan elinympäristön vieraslajeille.

Vieraslaalien torjuntatoimista tehokkaimpia ovat ennakoivat toimenpiteet, sillä lajin levittäytyttyä ja vakiinnuttua uudelle vesistöalueelle sen poistaminen sieltä on usein liki mahdotonta. Vieraslaalien leviämisen estämisestä säännellään lainsäädännöllä, sekä EU-tasolla että kansallisella tasolla.

Alusten painolastivesiä koskeva kansainvälinen yleissopimus tuli voimaan vuonna 2017. Sopimuksen mukaiset toimenpiteet vähentävät tulevaisuudessa vieraslajien leviämistä uusille alueille. Sopimus velvoittaa varusta-

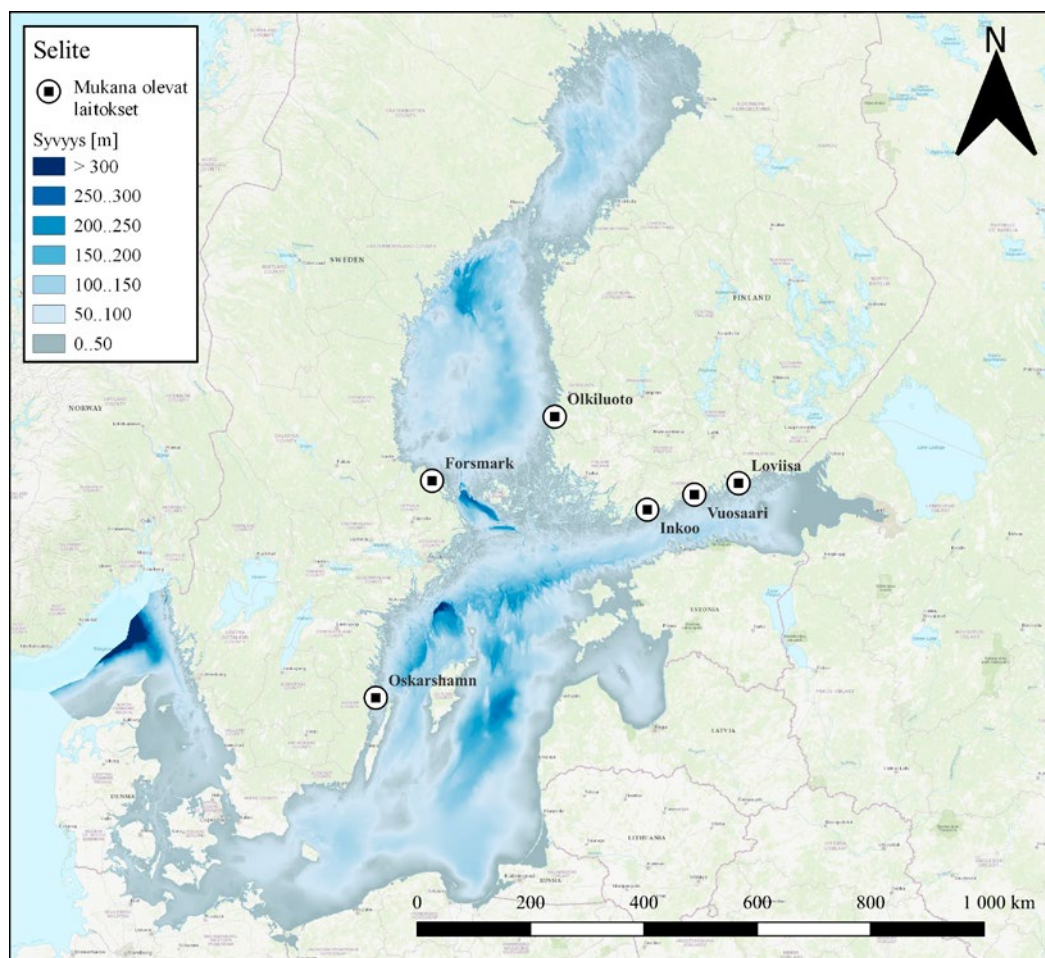
maan alukset painolastivesien käsittelylaitteistolla, joka estää vieraslajien leviämisen. Itämeren rannikkovaltiot tekevät yhteistyötä painolastivesiyleissopimuksessa määritettyjen toimien yhtenäistämiseksi Itämerellä.

Voimalaitosten kokemat fouling-haitat ja niiden laajuus

Selvitykseen kerättiin tietoja fouling-haitan laajuudesta kuudesta Itämeren ranta-alueella sijaitsevasta voimalaitoksesta. Laitoksista neljä sijaitsee tai on sijainnut Suomessa (Loviisan ydinvoimalaitos, Olkiluodon ydinvoimalaitos, Vuosaaren voimalaitokset ja Inkoon purettu voimalaitos) ja kaksi Ruotsissa (Oskarshamnin ydinvoimalaitos ja Forsmarkin ydinvoimalaitos). Voimalaitokset, erityisesti ydinvoimalat, käyttävät tuotannossa suuria määriä merivettä jäähdytysvetenään ja johtavat veden lämmenneenä takaisin vesistöön.

Selvityksen perusteella voimalaitosten kokemat haitat ja niiden laajuus ovat varsin erilaisia keskenään. Haittaa voimalaitoksilla aiheuttavat lähinnä ne lajit (fouling-lajit), jotka

Selvityksessä tarkasteltujen Fortum Power and Heat Oy:n (Loviisa ja Inkoo), Teollisuuden Voima Oyj:n (Olkiluoto), Helen Oy:n (Vuosaari), Oskarshamn Kraftgrupp AB:n (Oskarshamn) ja Forsmarks Kraftgrupp AB:n (Forsmark) voimalaitosten sijainnit Suomessa ja Ruotsissa (kuva: Fortum).



kykenevät kiinnittymään järjestelmien koville pinnoille ja muodostamaan yhdyskuntia (fouling-ilmiö).

Fouling-lajit aiheuttavat merivesijärjestelmien likaantumisen ja tukkeutumisongelmia vaikuttaen heikentävästi virtaukseen ja lämmönvaihtimien lämmönsiirtoon ja sitä kautta voimalaitoksen hyötysuhteeseen. Fouling-lajit saattavat aiheuttaa myös suoran uhan voimalaitosten jäähdytysvedenottojärjestelmille tukkimalla veden virtauskanavia tai kuluttamalla rakenteita.

Vieraslajeista selkeintä haittaa selvitykseen osallistuneilla voimalaitoksilla ovat aiheuttaneet kaspianpolyppi (*Cordylophora caspia*), valesinisimpukka (*Mytilopsis leucophaea*) ja merirokko (*Amphibalanus improvisus*). Vieraslajien lisäksi voimalaitoksella ongelmia ja haittoja voivat aiheuttaa myös kotoperäiset lajit, jotka ovat jollekin erityiselle seudulle ominaisia lajeja, kuten sinisimpukat (*Mytilus edulis*). Voimalaitosten näkökulmasta fouling-lajien aiheuttaman ongelman ydin on, että useimmat merkittävistä fouling-lajeista ovat vieraslajeja ja uusia vieraslajeja havaitaan Itämerellä jatkuvasti.

Selvityksen perusteella voidaan tehdä joitain karkeita johtopäätöksiä erilaisten ratkaisujen alttiudesta fouling-haitoille. Meriveden ottoaukon sijainti ja ympäristö (muun muassa syvyys, merialueen suojaisuus, merenpohjan luonne, lajit) vaikuttavat joidenkin lajien viihtymiseen ja sitä kautta kulkeutumiseen

alueella. Simpukoiden esiintymiseen järjestelmissä voivat vaikuttaa vedenottoisyvyys ja lämmenneen jäähdytysveden jälleenkierron esiintyminen.

Fouling-ongelman torjunta voimalaitoksilla

Merivesijärjestelmien fouling-ongelmaa on jo nykyään torjuttava voimalaitoksilla eri tavoin. Vuosihuollon aikana laitoksien merivettä sisältäviä järjestelmiä puhdistetaan tyypillisesti mekaanisesti sinne kertyneestä fouling-eliöstä. Käyttöjakson aikana monilla laitoksilla on käytössä pieniin kumipalloihin perustuva pesupallojärjestelmä, mikä helpottaa fouling-ongelmaa.

Fouling-haitan torjuntaan on mahdollista käyttää myös kemikaaleja. Kemikaaleja käytetään mahdollisesti pesujen yhteydessä tai ennakoivaan torjuntaan lupaehtojen puitteissa. Yleisesti kemikaalien käyttöä kuitenkin pyritään välttämään, jotta vesistöön ei päätyisi ylimääristä kemikaalikuormitusta.

Pohdintaa ja jatkoselvityksiä

Selvitys herätti runsaasti jatkoselvityksiä. Selvityksen tulosten perusteella on ilmeistä, että uusien laitosten suunnittelussa on syytä panostaa sekä kotoperäisten lajien että vieraslajien elinolosuhteiden ymmärtämiseen, fouling-ilmiöön ja merivesijärjestelmän omi-

naisuuksiin. Esimerkiksi järjestelmien suunnittelulla voidaan vaikuttaa virtausnopeuksiin ja sitä kautta fouling-eliöiden kiinnittymisen hillitsemiseen, järjestelmien osien erotusmahdollisuuksiin fouling-eliöiden tuhoamiseksi ja pesujen toteutukseen.

Fouling-lajit eivät välttämättä ole ainoita mahdollisia riskejä aiheuttavia lajeja. Voimalaitokset kertoivat myös muun muassa kalojen, levien sekä yksi voimalaitos myös meduusojen aiheuttamista haitoista merivesijärjestelmissä.

Myös lajeista, jotka eivät pääse rakentisiin, saattaa aiheutua epäsuoria uhkia laitoksille. Usein alueelle levittäytyneet ja sinne vakiintuvat uudet vieraslajit muuttavat jo alueella elävien lajien välistä dynamiikkaa, mikä saattaa aiheuttaa häiriöitä ravintoketjussa. Petojen vähentyessä laitoksille vahinkoja aiheuttava laji voi päästä lisääntymään ja näin lisäämään voimalaitoksille aiheutuvan riskin suuruutta.

Itämeren odotetaan lämpenevän ja jäätälvien lyhentyvän ilmastomuutoksen vaikutuksesta. Samalla olosuhteet muuttuvat aiempaa suosiollisemmaksi joidenkin alueella jo esiintyvien vieraslajien esiintymisen kannalta. Monia uusia lajeja ilmestyyneen Itämerelle lähi-tulevaisuudessa, vaikka lajien levittämistä tai kulkeutumista uusille alueille esimerkiksi laivojen mukana pyritäänkin estämään. Näin ollen uusien vieraslajien vaikutusten ennakkoinnille onkin nähtävissä jonkinlainen tarve. 

Väitös: Gammatomografialla tarkempia kuvia käytetystä ydinpolttoaineesta

Riina Virta

Säteilyturvakeskus sekä Fysiikan tutkimuslaitos (HIP)

Ennen kuin käytetty ydinpolttoaine loppusijoitetaan eurajokelaiseen kallioperään, polttoainenippujen sisäl- löstä on kerättävä täsmällistä tietoa ydinmateriaalivalvonnan mittauksilla. Gammaemissiotomografialla voidaan muodostaa tarkka poikkileikkauskuva, jossa nipun sisältämät aktiiviset sauvat näkyvät. Väitöskirjatutkimuksessani kehitin tätä gammakuvantamisen menetelmää Suomen käyttöön soveltuvaksi. Lopputuloksena poikkileikkauskuvien laatu parani erityisesti kuvantamisen kannalta haastavassa nipun kes- kiosassa, ja osoitin menetelmän toimivan myös ilmassa toteutettavissa mittauksissa tavanomaisten veden alla tapahtuvien mittausten lisäksi.

Before spent nuclear fuel is disposed of in the geological repository at Eurajoki, we need to do precise nucle- ar safeguards measurements on the fuel. With gamma emission tomography we can construct an accurate cross-sectional image where the active fuel rods in the assembly are visible. In my doctoral dissertation, I devel- oped this gamma imaging method to better suit the needs of the Finnish geological repository operations. The cross-sectional images improved especially in the central part of the fuel assembly, which has proven to be dif- ficult for imaging. I also showed that the method performs well in measurements conducted in air, in addition to the usual underwater measurements.

Suomen ydinvoimalaitoksilla syntynyt käytetty ydinpolttoaine loppusi- joitetaan Eurajoen Olkiluotoon, jossa Posivan loppusijoituslaitos aloittaa toimintansa lähivuosina. Käytetty polttoaine pakataan kuparikapse- leihin ja sijoitetaan yli 400 metrin syvyyteen peruskallioon louhittuihin tunneleihin, kauas elollisesta ympäristöstä.

Ydinmateriaalivalvonnalla varmistetaan nipun sisältö

Käytetyn ydinpolttoaineen sisältämän uraanin ja plutoniumin vuoksi polttoaineniput ovat tarkassa valvonnassa. Ydinmateriaalivalvonnalla huolehditaan siitä, että ydinmateriaaleja käytetään ainoastaan sovit- tuihin, rauhanomaisiin tarkoituksiin. Loppusijoitettu polttoaine ei ole enää luoksepäästävissä, joten se täytyy mitata tarkasti ennen loppusi- joitusta. Ydinmateriaalivalvonnan mittauksilla varmennetaan nipusta ilmoitettujen tietojen oikeellisuus, eli yksinkertaistaen katsotaan, että kaikki ilmoitetut sauvat ovat tallella ja että nippu todella sisältää käy- tettyä ydinpolttoainetta.

Kaikki polttoaineniput mitataan kahdella eri mittausmenetelmällä, joilla nipun sisällöstä saadaan tarkkaa tietoa kajoamatta sen eheyteen. Sauvakohtaista tietoa gamma-aktiivisuudesta saadaan passiivisella gam- maemissiotomografialla (PGET) [1] ja fissiilin materiaalin olemassaolo varmennetaan passiivisella neutronialbedoreaktiivisuusmittauksella

(PNAR) [2]. Gammaemissiotomografiaa eli viipalekuvausta hyödyntä- mällä polttoaineesta voidaan muodostaa poikkileikkauskuva, jossa näkyy yksittäisten sauvojen gamma-aktiivisuus [3]. Tieto polttoaineen ominai- suuksista ja sisällöstä on myös tallennettava huolellisesti, jotta tulevai- suudessaakin kaikki tarvittava ymmärrys on jälkipolvien käytettävissä.

Viipalekuvaus on käänteisongelma

Passiivinen gammaemissiotomografialaite PGET on munkkirinkilän muotoinen, muutaman sadan kilon painoinen kamera, joka upotetaan mittauksia varten käytetyn ydinpolttoaineen välivaraston vesialtaaseen. Mittausten ajaksi polttoainenippu lasketaan vedessä rinkilän keskelle. Vesitiiviin kuoren sisällä molemmiin puolin rinkilää sijaitsee 91 CdZnTe- puolijohdegammamallaisinta vahvojen wolframikollimaattoreiden takana.

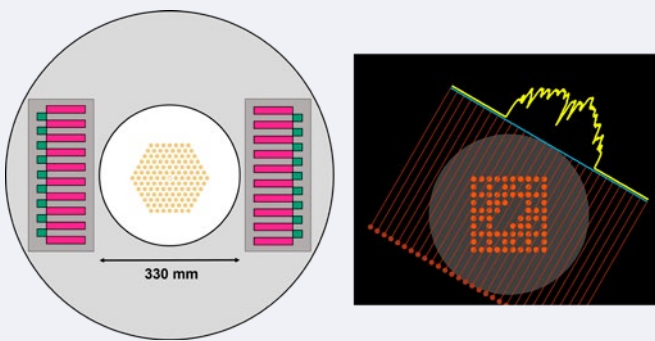
Viitisen minuuttia kestävän mittauksen aikana ilmaisinvirit pyöräh- tävät nipun ympäri ja mittaavat gammasignaalin joka suunnasta nipun ympäriltä. Kollimaattorit huolehtivat siitä, että kullakin hetkellä tiedäm- me tarkasti, mistä suunnasta gammakvantti millekin ilmaisimelle päätyi. Tomografia perustuu juuri tähän suuntatietoon. Laitetta ja menetelmää havainnollistaa kuva 1.

Ilmaisinten keräämästä gammadatasta pystymme muodostamaan tarkan poikkileikkauskuvan polttoainenipusta modernin inversio- eli

käänteislaskennan keinoin. Käänteisongelmana tässä tapauksessa on selvittää polttoaineen sisältö pelkän mittausdatan perusteella. Kuva 2 näyttää tyypillisen laskennan lopputuloksen eli aktiivisuus- ja vaimennuspoikkileikkaukset nipusta. Tarkemmin menetelmän alkuvaiheista ja siinä käytettävistä matemaattisista tekniikoista voit lukea ATS Ydintekniikan numerosta 4/2020 [4], jossa kerroimme Samuli Siltasen kanssa PGET-menetelmän silloisesta kehitysvaiheesta.

Kenttämittauksia välivarastojen vesialtaissa

Väitöskirjatutkimuksessani kehitin passiivista gammaemissiotomografiaa paremmin Suomen loppusijoitukseen sopivaksi. Pohjan tutkimukselleni muodostivat laajat kenttämittaukset vuosien 2017–2023 aikana Olkiluodon ja Loviisan voimalaitoksilla. Vuosittaisissa mittauskampanjoissa mittasimme välivarastojen eri-ikäisiä polttoainenippuja PGET-laitteella ja tutkimme mittausparametrien vaikutusta poikkileikkauksien laatuun. Vuosien aikana kertyi laaja kirjasto mittausdataa erilaisista polttoainenipuista, joiden kirjoa on kuvattu taulukossa 1.



Kuva 1. Gammaemissiotomografia perustuu eri suunnista polttoaineen ympäriltä ilmaisimelle kerättävään tietoon. Vasemmalla on PGET-laitte ylhäältä päin kuvattuna (ei oikeassa mittakaavassa). Pinkkien kollimaattorien takaa polttoainetta mittaavat vihreät ilmaisimet. Keskireiässä on mitattava VVER-440-polttoainenippu. Oikeanpuoleisessa kuvassa esitetään gammamittauksen anatomia: säteilevien punaisten sauvojen lähettämä gammasäteily mitataan ilmaisimilla keltaisena signaalina. Oranssit viivat kertovat kollimaattorien määräämät suunnat, joista säteily saavuttaa ilmaisimet. Eri pyörähdyskulmista saadaan erilainen signaali. Oikeanpuoleinen kuva: Samuli Siltanen.

Taulukko 1. Mitattujen polttoainenippujen ominaisuuksia ja mittauskampanjoita.

mitattuja polttoainenippuja yhteensä	133
nippuja, joissa poistettuja sauvoja	15
alkuperäisen väkevöinnin vaihteluväli	1,9 – 4,4 %
keskiarvopalamien vaihteluväli	5,7 – 56 GWh/tU
jäähtymisajan vaihteluväli	1,9 – 39 vuotta
mittauksia Olkiluodon laitoksella vuosina	2017, 2019, 2021, 2022, 2023
mittauksia Loviisan laitoksella vuosina	2017, 2018, 2020, 2021, 2023
mitatut polttoainetyypit	VVER-440, 8x8-1, 9x9-1 AB, ATRIUM-10, GE-12, GE-14, SVEA-64, SVEA-100, SVEA-96 OPTIMA, SVEA-96 OPTIMA2

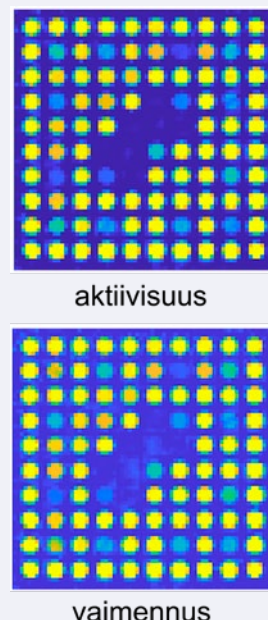
Haasteena käytetyn ydinpolttoaineen tomografiassa on se, että polttoaineen uraani vaimentaa gammasäteilyä voimakkaasti. Vaimennuksen seurauksena suurin osa polttoaineen sisäosista peräisin olevista gammakvantteista jää matkan varrelle eikä koskaan saavuta ilmaisimia. Tätä ongelmaa lähdim ratkaisemaan muuttamalla mittausparametreja fiksummiksi, jotta saisimme mahdollisimman paljon tietoa polttoaineen keskiosista. Vaihtoehtoina oli esimerkiksi valita mittauskulmat viisaasti, kaventaa gammaenergiaikkunoita ja jopa vaihtaa mitattavaa radioisotooppia.

Gammadataa kerätään energiaikkunoissa

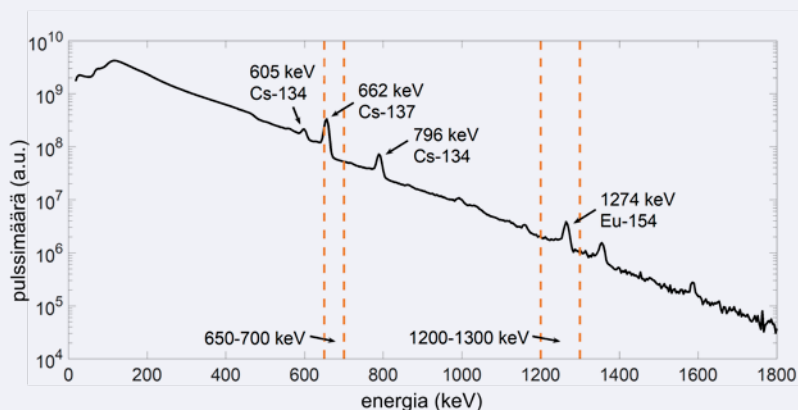
Yksi tärkeä mittausparametri gammatomografiassa on valitun gammaenergiakunnan leveys ja sijoittelu [5]. Tomografiassa pääajatuksena on saada vangituksi gammakvantit, jotka matkaavat säteilyilmaisimelle suoraan kuvattavasta kohteesta eivätkä siroa matkan varrella. Nämä kvantit sisältävät parhaan kuvantamistiedon eivätkä vääristä lopputulosta antamalla virheellistä tietoa säteilyn alkuperäisestä suunnasta.

Tutkimassamme hyvin jäähtyneessä ja loppusijoitukseen päätyvässä polttoaineessa on mittaushetkellä jäljellä enää muutamia radioisotooppeja, joista voimme saada riittävän vahvan signaalin. Hyödyntämällä tätä tietoa voimme valita gammaenergiakunnat niin, että vangitsemme halutusta radioisotoopista vain täysenergiapiikin eli suoraan syntyneistä ilmaisimille saapuneet gammakvantit. Pitkään jäähtyneen polttoaineen tapauksessa tämä tarkoittaa useimmiten Cs-137-isotooppia ja gammaenergiakunaa 650–700 keV, jolla täysenergiapiikki 662 keV:n energialla jää haaviin. Piikkiä ja gammaenergiakunaa havainnollistaa enemmän kuva 3.

Vähemmän jäähtyneiden nippujen tapauksessa tutkimme myös europiumin täysenergiapiikin voimaa polttoaineen keskiosien kuvan-



Kuva 2. Mittauksen ja laskennan lopputuloksena saadaan kaksi poikkileikkauksuvaa polttoainenipusta. Aktiivisuuskuva näyttää, missä gamma-aktiiviset sauvat ovat, kun taas vaimennuskuva näkyy kaikki gammasäteilyä vaimentava materiaali. Useimmiten käytetyn ydinpolttoaineen tapauksessa nämä kaksi kuvaa muistuttavat läheisesti toisiaan. Mutta mitä tapahtuisi, jos yksi uraanisauva olisi korvattu ei-säteilevällä materiaalilla? Tämä sauva puuttuisi aktiivisuuskuvaan, mutta näkyisi kuitenkin vaimennuskuvaan!



Kuva 3. Gammaenergiaikkuna (oranssit katkoviivat) valitaan mitattavan kohteen mukaan. Gammaenergispektrissä eri energioilla näkyvät piikit ovat peräisin tutuista radioisotoopeista. Kuvan spektri on mitattu seitsemän vuotta jäähtyneestä polttoaineesta, joten Cs-137:n lisäksi jäljellä on myös Cs-134- ja Eu-154-isotooppeja. Yli 20 vuotta jäähtyneessä polttoaineesta Cs-137 on ainoa järkevää signaalia antava isotooppi. Vähemmän jäähtyneille nipuille Eu-154 saattaa myös olla vartenotettava vaihtoehto.

tamisessa [5]. Vaikka Eu-154-isotoopin puoliintumisaika on vain 8,6 vuotta cesiumin 30 vuoden sijaan, europiumiakin vaikuttanut olevan jäljellä yllättävän paljon mittaamassamme polttoaineesta. Europiumin etuna on se, että sen pääenergiapiikki on huomattavasti korkeammalla energialla kuin cesiumilla (1274 keV vs. 662 keV), joten toivoimme sen tuovan enemmän suuntatietoa nipun sisäosista, vaikka pulssimäärät olisivatkin heikompia. Tulokset osoittivatkin lupaavaa tarkkuutta, mutta moninkertaisesti tavanomaista pidemmät mittaussajat rajoittavat tämän radioisotoopin käyttöä nopeampaisissa rutiinimittauksissa.

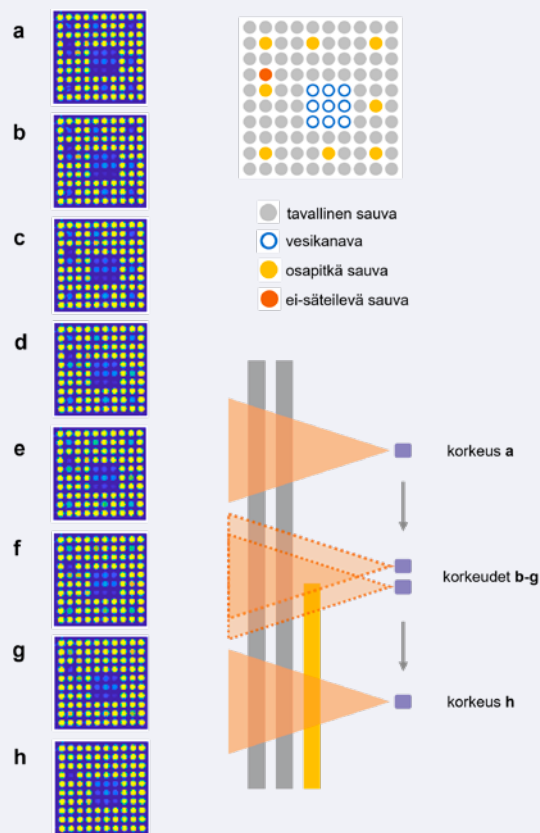
Osapitkien sauvojen havaitseminen

Kenttämittauksissa minulla oli mahdollisuus testailla gammaemissio- menetelmän kykyä myös erikoisissa tapauksissa. Huomasimme jo varhain PGET-mittausten tarkkuuden sauvan sisäisten aktiivisuuserojen havaitsemisessa. Vuonna 2021 tutkimme Olkiluodossa, voisiko menetelmällä havaita aktiivisuuseroja myös polttoaineen pituussuunnassa, vaikka laitteen näkökenttä onkin verrattain laaja juuri tässä aksiaalissa suunnassa [5]. Laitteen kollimoinnin vuoksi gammailmaisimet nimittäin näkevät noin 30 senttimetrin viipaleen nipusta pituussuunnassa joka hetki, ja muodostettu poikkileikkaukkuva on keskiarvoistus tästä. Halusimme kuitenkin kokeilla, voisiko osittain pituussuunnassa päätkeistyn sauvan huomata mittaauksista.

Siispä teimme mittaussarjan, jossa suoritimme gammamittauksen kahden senttimetrin välein nipun pituussuunnassa sellaisen kohdan yli, jossa nipun sisältämät osapitkät sauvat päättyivät. Tulosten perusteella huomasimme, että laite kykenee yllättävään tarkkuuteen myös tässä aksiaalissa suunnassa. Kuva 4 näyttää, miltä mittaussarja osapitkien sauvojen reunan yli näytti.

Entä mittaukset kuumakammiossa ilman vettä?

Yksi väitöskirjani tärkeä lopputulos liittyy mittausten menetelmän ilmamittauskykyyn [6]. PGET-laite on alun perin suunniteltu vedenalaisia mittausta varten, eikä sitä ollut tarkoitettu käyttää ilman veden tuomaa suojaa.



Kuva 4. Osapitkien sauvojen päättymiskohdan yli tehty mittaus näyttää, kuinka pienikin määrä pituussuunnassa puuttuvaa sauvaa voidaan havaita. Vasemmalla näkyvät aktiivisuuskuvat eri korkeuksilla toteutetuista mittaauksista. Osapitkät sauvat ilmestyvät hiljalleen näkyviin, kun laite liikkuu ylhäältä alas kahden senttimetrin askelilla.

Käytetty polttoaine nimittäin säteilee niin voimakkaasti, että mittauskohdan ulkopuolella oleva nipun osa saattaisi vaikuttaa häiriönä mittauksessa, ellei nipun ympärillä oleva vesi tarjoaisi vaimennusta. Posivan kapselointilaitokselle on kuitenkin tulossa mittauspiste, jossa käytetty polttoainetta voidaan mitata kuumakammiossa, jossa vettä ei ole vaimentamassa säteilyä. Tutkimme siis laitteen kykyä suoriutua tällaisista mittaauksista ja tuottaa riittävän selkeitä kuvia myös kapselointilaitoksella.

Aluksi vaikutti siltä, että testimittauksia oikealla käytetyllä ydinpolttoaineella ei mitenkään päästäisi tekemään kuumakammiossa, koska pääsy tällaisiin paikkoihin on kiven alla. Aloitimme siis pienen mitta- kaavan testeillä, joissa käytimme kobolista valmistettuja säteilytettyjä mallisauvoja. Nämä eri gammaenergialla säteilevät, eri materiaalista tehdyt lyhyemmät sauvat eivät tietysti monessa suhteessa vastanneet oikeaa uraanipolttoainetta, mutta pystyimme testaamaan perusperiaatteen toimivuuden.

Mittasimme mallinippuja vuonna 2022 Wienin Atominstitutissa sekä ilmassa että vedessä, ja pystyimme osoittamaan, ettei ilma väliaineena aiheuta mitään perustavanlaatuisia ongelmia. Mittausasetelma hyödynsi nokkelaa muoviputkimenetelmää, joka jalostettiin alun perin vitsillä heitetystä ajatuksesta upottaa vesialtaaseen alasuin käännetty ämpäri. Kuva 5 havainnollistaa mittaussasetelmaa.

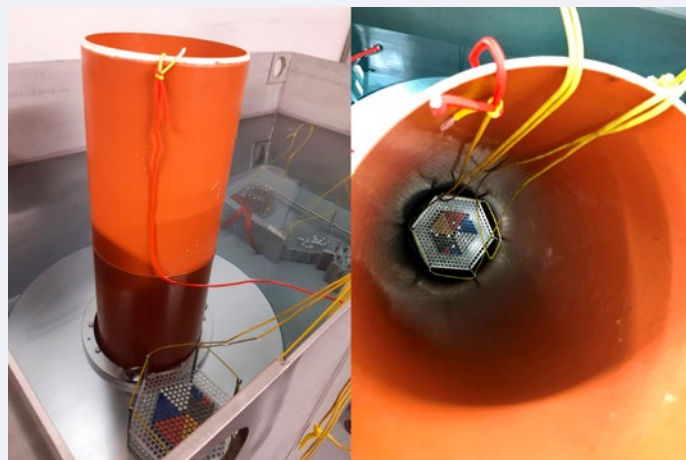
Seuraavana vuonna onnistuimme tekemään myös oikeamman mitatakaan testejä, kun Kansainväliselle atomienergiajärjestölle IAEA:lle tukea antava Sveitsin tukiohjelma tarjosi mahdollisuuden kuumakammimittauksiin oikealla polttoaineella. Laitteisto selvisi Sveitsin kokeista hienosti eikä esteitä ilmamittausten onnistumiselle ilmennyt. Menetelmä on siis valmiina loppusijoitustoiminnan alkamiseen Olkiluodossa!

Kehitys jatkuu tulevaisuudessakin

Vaikka väitöstutkimuksessani kehitin PGET-menetelmää paremmin loppusijoitukseen soveltuvaksi, uutta paranneltavaa löytyy aina. Menetelmä on kuitenkin jo nykyisellään riittävän tarkka ydinmateriaalivalvonnan tarpeisiin. Käyttötoiminnan aikaisessa käytössä laite ohjelmistoinen pääsee toki tulikokeeseen, jossa varmasti saamme vielä viilata yhtä jos toistakin.

Gammaemissiotomografialla on menetelmänä vielä paljon annettavaa ydinmateriaalivalvonnessa, sillä polttoaineen sisällön kvantitatiivinenkin määrittäminen voisi onnistua mittauksen avulla. Esimerkiksi kokonaispalamaa voisi hyvin arvioida Cs-137- ja Eu-154-isotooppien suhteesta. Tarkoille ainetta rikkomattomille menetelmille löytyy aina kiinnostavia käyttökohteita.

Väitöskirja "Gamma tomography of spent nuclear fuel for geological repository safeguards" osana Fysiikan tutkimuslaitoksen HIP internal report -julkaisusarjaa hyväksyttiin Helsingin yliopiston matemaattis-luonnontieteellisessä tiedekunnassa 27.8.2024. Sähköinen versio: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-8428-3>.

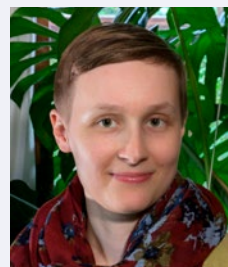


Kuva 5. Ilma-vesimittausten mittausasetelma rakennettiin insinööriluovuu-della. Vasemmalla näkyvän vesialtaan pohjalla on PGET-laite, jonka sisään asetettu muoviputki toimii ratkaisevassa asemassa ilman ja veden erot-tajana. Mitattava mallinippu odottaa laitteen päällä asettamista putkeen. Oikealla näkyy putken sisäinen mittaus tilanne, kun putkessa on väliaineena ilmaa. Vesimittausta varten mallinipun asemointi pidettiin samana, mutta putki täytettiin vedellä.

Viitteet

- [1] R. Virta, R. Backholm, T. A. Bubba, T. Helin, M. Moring, S. Siltanen, P. Dendooven, and T. Honkamaa, "Fuel rod classification from Passive Gamma Emission Tomography (PGET) of spent nuclear fuel assemblies," ESARDA Bulletin, vol. 61, pp. 10–21, 2020. doi: 10.2760/217080.
- [2] T. Tupasela, P. Dendooven, S. J. Tobin, V. Litichevskiy, P. Koponen, A. Turunen, M. Moring, and T. Honkamaa, "Passive neutron albedo reactivity measurements of spent nuclear fuel," Nuclear Instruments and Methods in Physics, Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 986, p. 164 707, 2021. doi: 10.1016/j.nima.2020.164707.
- [3] R. Backholm, T. A. Bubba, C. Bélanger-Champagne, T. Helin, P. Dendooven, and S. Siltanen, "Simultaneous reconstruction of emission and attenuation in passive gamma emission tomography of spent nuclear fuel," Inverse Problems and Imaging, vol. 14, no. 2, pp. 317–337, 2020. doi: 10.3934/ipi.2020014.
- [4] S. Siltanen and R. Virta, "Gammaemissiotomografia paljastaa ydinpolttoaineen sisällön," ATS Ydintekniikka, 4/2020, pp. 22–25.
- [5] R. Virta, T. A. Bubba, M. Moring, S. Siltanen, T. Honkamaa, and P. Dendooven, "Improved Passive Gamma Emission Tomography image quality in the central region of spent nuclear fuel," Scientific Reports, vol. 12, no. 12473, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-16642-0.
- [6] R. Virta, T. A. Bubba, M. Moring, S. Siltanen, T. Honkamaa, and P. Dendooven, "In-air and in-water performance comparison of Passive Gamma Emission Tomography with activated Co-60 rods," Scientific Reports, vol. 13, no. 16189, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-42978-2.

Kirjoittaja



DI, FT Riina Virta
Tarkastaja
Säteilyturvakeskus
riina.virta@stuk.fi

Väitös: Röntgenkuvantamisesta apua bentoniittipuskurin mallintamiseen

Tero Harjupatana
Jyväskylän yliopisto

Väitöstyössä kehitettiin menetelmä veden kulkeutumisen ja muodonmuutoksen mittaamiseen paisuvissa materiaaleissa. Menetelmässä näytteen kastumista seurataan sopivin väliajoin otettujen röntgen- tai röntgentomografiakuvien avulla. Erilaisia kuvakorjaus- ja kuva-analyysitekniikoita käyttämällä lopullisina tuloksina saadaan kiintoaineen ja veden tiheysjakaumat sekä siirtymävektorikentät ajan funktiona. Menetelmän tärkeimpänä sovelluskohteena oli ydinjätteen loppusijoituksessa puskuriaineena käytettävä bentoniitti. Menetelmällä tuotettu yksityiskohtainen tieto auttaa mallintamaan puskuria ja siten arvioimaan loppusijoituskonseptin kokonaisturvallisuutta.

In this dissertation, a method for measuring water transport and deformation in swelling materials was developed. In the method, the wetting of a sample is monitored by taking X-ray or X-ray tomographic images at suitable intervals. By using various image correction and analysis techniques, the density distributions of solid and water and the displacement fields as a function of time are obtained as the final results. The most important application of the method was bentonite, a buffer material used in nuclear waste disposal. The detailed data produced by the method help to model the buffer, and thus to assess the overall safety of the disposal concept.

Korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitus alkaa lähivuosina Suomessa, ensimmäisenä maailmassa. Loppusijoituksessa käytetävän moniesteperiaatteen tarkoituksena on eristää jätteet mahdollisimman hyvin elollisesta luonnosta. Peruskallion ja ydinjätekapsoelin välisellä bentoniittipuskurilla on merkittävä rooli, sillä sen tehtävänä on suojella kanisteria pohjavedeltä ja kallioliikunnoilta sekä hidastaa radionuklidien vapautumista, mikäli kanisteri rikkoutuu. Bentoniitti on tähän tarkoitukseen sopiva materiaali, sillä se läpäisee heikosti vettä, on muovautuvaa ja veden vaikutuksesta paisuvana materiaalina se täyttää ja tiivistää rakoja.

Veden kulkeutumisen ja bentoniitin mekaanisen käyttäytymisen luotettava mallintaminen on tärkeää puskurin toimintakyvyn arvioimiseksi. Bentoniitti on kuitenkin osoittautunut haastavaksi materiaaliksi mallintaa, sillä sen rakenne ja vuorovaikutukset veden kanssa ovat monimutkaisia. Haastavuutta lisäävät kulkeutumiseen ja käyttäytymiseen vaikuttavat monet tekijät, kuten bentoniitin koostumus ja tiheys, pohjaveden suolapitoisuus ja paine sekä lämpötila.

Mallien kehittämistä varten tarvitaan siten yksityiskohtaista ja kattavaa kokeellista aikasarjatietoa veden kulkeutumisesta ja muodon-

muutoksesta bentoniitissa. Tällaisen tiedon tuottamiseen paisuville materiaaleille ei kuitenkaan ole ollut käytännöllisiä menetelmiä. Tässä väitöstyössä kehitettiin näytettä rikkomattomaan röntgenkuvantamiseen perustuva menetelmä, jotta puuttuvaa tietoa saadaan tuotettua mallinnusta varten. Menetelmää sovellettiin pääasiassa bentoniittinäytteisiin mutta myös biokomposiittimateriaaliin.

Röntgenkuvantaminen

Perinteinen röntgenkuvantaminen perustuu röntgensäteilyn vaimenemiseen materiaalissa. Kaksiulotteisen röntgenkuvan kirkkausarvot vastaavat näytteen läpäisyä, joka riippuu näytteen kolmiulotteisesta vaimennuskerroinjakaumasta. Vaimennuskerroin μ riippuu röntgensäteilyn energiasta, materiaalista ja on suoraan verrannollinen tiheyteen. Yhdisteiden ja seoksien vaimennuskerroin on osiensa summa. Röntgenkuvaus soveltuu rajoitetusti materiaalin sisärakenteen tutkimiseen kolmiulotteisen tiedon puuttuessa.

Röntgentomografiassa näytteestä otetaan eri suunnista suuri määrä röntgenkuvia, joiden avulla voidaan rekonstruoida näytteen vaimen-

nuskerroinjakauma, eli saadaan näytteestä röntgentomografiakuva. Röntgentomografia mahdollistaa siten kolmiulotteisen sisärakenteen tutkimisen näytettä hajottamatta. Röntgenkuvaus ja -tomografia ovat olleet pitkään tärkeitä kuvantamismenetelmiä lääketieteessä, mutta niitä käytetään yhä enemmän myös teollisuudessa ja tutkimuksessa. Materiaalitutkimuksessa käytetään tyypillisesti röntgenmikrotomografialaitteita, joiden paikkaresoluutio (1–100 µm) mahdollistaa monien heterogeenisten materiaalien sisärakenteen tutkimisen.

Röntgentomografiakuvat ovat yleensä geometrisesti tarkkoja, mutta kuviin perustuva kvantitatiivinen tiheysmittaus on haastavaa erilaisien kuvavirheiden takia. Kuvavirheitä aiheuttavat esimerkiksi röntgenlähteen ja -kameran epäideaalisuudet ja epästabiilisuudet sekä röntgensäteilyn sironta. Yksi merkittävimmistä kuvavirheistä on niin sanottu säteilyn koveneminen, joka syntyy röntgenputken tuottaman monienergisien säteilyn seurauksena. Rekonstruktio-matematiikka olettaa säteilyn olevan yksiennergistä, mikä johtaa vääristyneeseen vaimennuskerroinjakaumaan. Tämän kuvavirheen korjaamiseen on olemassa standardimenetelmä, jonka tarkkuus riittää tavanomaiseen kuvantamiseen.

Menetelmä

Menetelmässä näytteen kastumisprosessia seurataan ottamalla siitä sopivin väliajoin röntgentomografiakuvia. Veden imeytyminen kasvat-
taa näytteen vaimennuskertointa, joten yksinkertaisimmillaan kas-
tuneen ja kuivan tilan välinen erotuskuva voidaan kalibroida vastaa-
maan vesipitoisuusjakaumaa. Monet materiaalit kuitenkin muuttavat
muotoaan veden vaikutuksesta, jolloin myös kiintoaineen tiheyden-
muutokset vaikuttavat näytteen vaimennuskerroinjakaumaan, eikä
yllä esitetty analyysi toimi sellaisenaan. Väitöstyössä tämä ongelma

ratkaistiin mittaamalla näytteen muodonmuutos ja huomioimalla se
analyysissä.

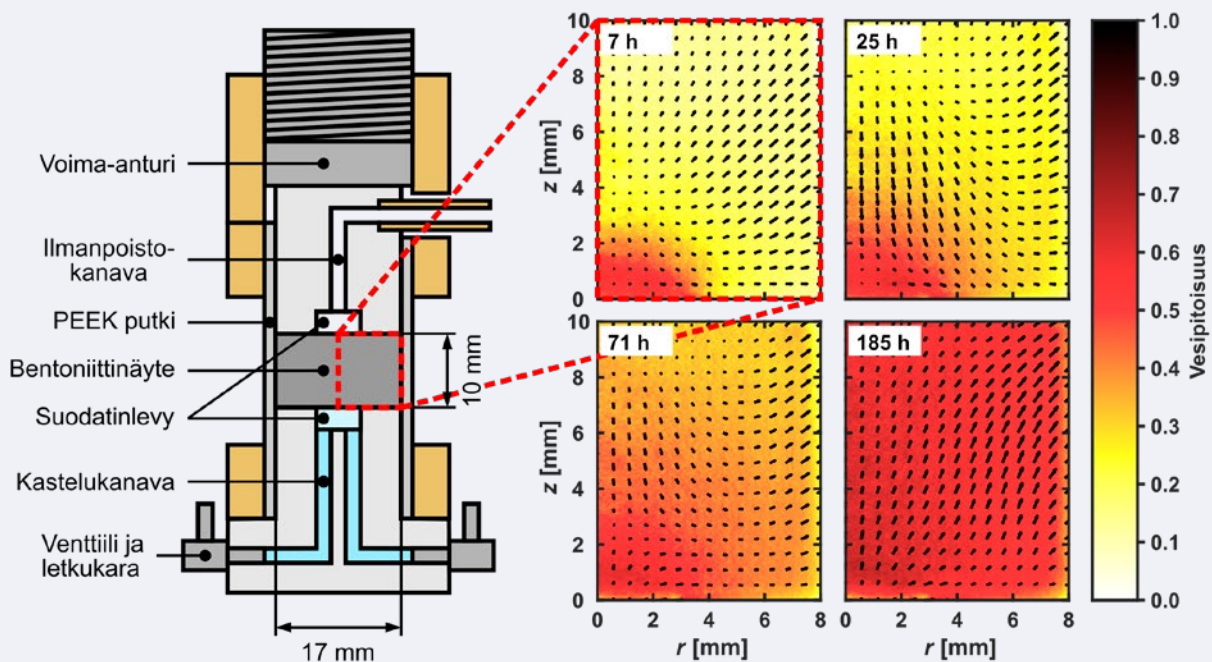
Menetelmässä näytteen oletetaan koostuvan kiintoaineesta ja ve-
destä (ilma voidaan unohtaa pienen tiheyden vuoksi), jolloin näytteen
vaimennuskerroin on

$$\mu = c_s \cdot \rho_s + c_w \cdot \rho_w \quad (1)$$

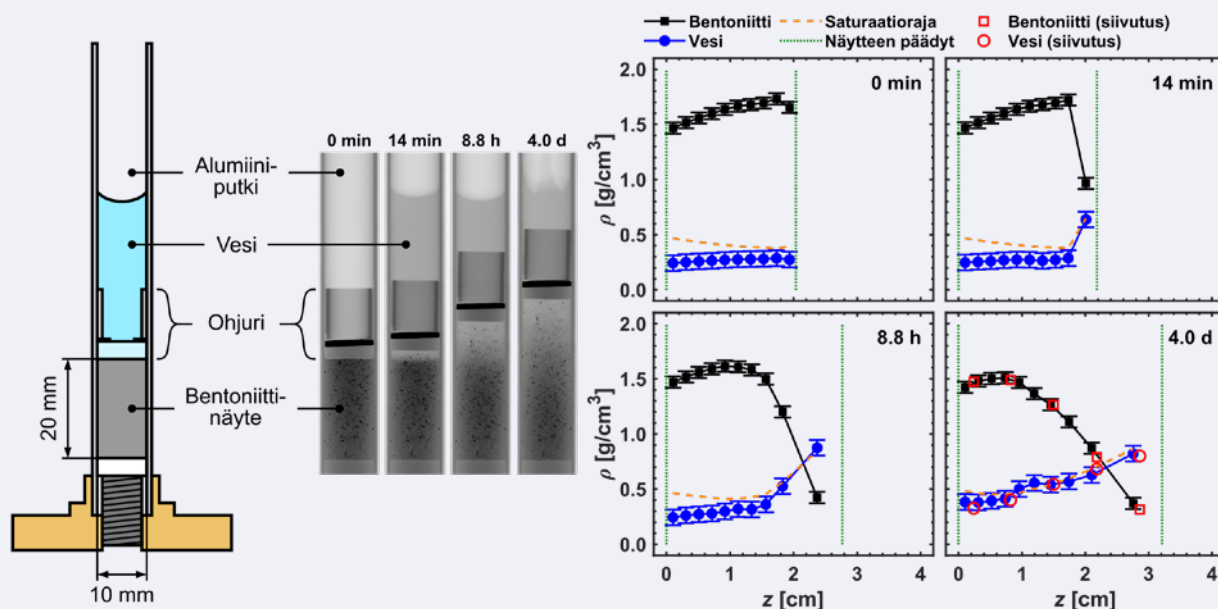
missä ρ_s ja ρ_w ovat kiintoaineen ja veden osatiheydet. Kiintoaineen ja
veden massavaimennuskertoimet c_s ja c_w voidaan useimmiten määrit-
tää näytteen eri tilojen kuvista tai vaihtoehtoisesti kuvaamalla erillisiä
kalibroitin näytteitä. Näytteestä otettujen kuvien joukosta valitaan yksi
referenssitilaksi, jossa vesipitoisuusjakauma $w = \rho_w / \rho_s$ tunnetaan.
Tyypillinen valinta on alkutila, jossa näyte on yleensä täysin kuiva tai
kosteuden tiedetään jakautuvan tasaisesti. Tämä tieto mahdollistaa
kiintoaineen referenssitilan osatiheysjakauman $\rho_{s,ref}$ määrittämisen
referenssitilan kuvasta yhtälön 1 avulla.

Sopivaa kuvakorrelaatiotekniikkaa käyttämällä voidaan mitata refe-
renssitilan ja deformaation tilan välinen siirtymävektorikenttä u , jonka
avulla saadaan kiintoaineen osatiheysjakaumaksi deformaationeessa
tilassa $\rho_s = \rho_{s,ref} / (1 + \nabla \cdot u)$. Lopulta deformaation tilan kuvasta voi-
daan laskea veden osatiheysjakauma käyttäen yhtälöä 1. Menetelmä
tuottaa siten kolmiulotteiset kiintoaineen ja veden osatiheysjakaumat
sekä siirtymävektorikentät ajan funktiona.

Näytteen muodonmuutos on mitattava tarkasti, sillä menetelmä on
herkkä siirtymien virheille. Tätä varten näytteen tulee sisältää kattavas-
ti yksityiskohtia ja paikkaresoluution tulee olla riittävä yksityiskohtien
ja niiden liikkeen erottamiseen. Aikaresoluution kannalta kuvausaika
tulee pitää riittävän lyhyenä ja kuvia tulee ottaa sopivan usein suh-
teessa kastumisprosessin nopeuteen. Koska tavanomainen röntgen-
mikrotomografia voi joissakin tapauksissa olla liian hidas (kuvausaika



Kuva 1. Bentonitiin vakiotilavuuskokeen näytekammio ja esimerkit tuloksista neljänä eri ajanhetkenä. Tulostuvien vesipitoisuusjakaumat ja siirtymävektori-
kentät on keskiarvoistettu sylinterisymmetrisesti ja siirtymät on skaalattu tekijällä 5.



Kuva 2. Bentoniitin yksikulotteisen paisumiskokeen näyteputki sekä esimerkit röntgenkuvista ja tuloksista neljänä eri ajanhetkenä. Näytteen yläpuolella olevan vettä läpäisevän ohjurin tarkoituksena oli helpottaa näytteen yläpinnan seuraamista kokeen aikana. Tulostukuvissa on putkensuuntaisten osatiheysprofiilien lisäksi saturaatorajat (kiintoaineen osatiheydestä riippuva suurin mahdollinen veden osatiheys) ja viimeisessä tulostukuvassa on näytteen siivutuksesta saatu validointidata.

10 min – 10 h), voidaan menetelmässä käyttää myös pelkkää röntgenkuvausta. Tämä mahdollistaa huomattavasti nopeampien prosessien seurannan, sillä yksittäinen röntgenkuva saadaan otettua sekunneissa. Röntgenkuvausta voidaan tosin hyödyntää vain yksi- tai kaksikulotteisissa näyte- ja kastelugeometrioissa.

Väitöstyössä kehitettiin myös standardia korjausmenetelmää kehittyneempi versio säteilyn kovenemisesta aiheutuvaan kuvavirheeseen, joka korjaa samalla lähteen ja kameran epästabiilisuuksista ja -ideaalisuuksista johtuvia virheitä ja siten lisää kuvien vertailukelpoisuutta ja menetelmän tarkkuutta. Kehitetty korjausmenetelmä perustuu kuvausten yhteydessä otettuihin röntgenkuvien eripaksuisista referenssilevyistä. Referenssilevyn materiaalin (efektiivisen) järjestysluvun ollessa lähellä näytteen materiaalin vastaavaa voidaan otettujen referenssikuvien avulla kuvasignaali korjata pikseleittäin vastaamaan yksienergistä säteilyä, jolloin rekonstruktio tuottaa lähes vääristymättömän vaimennuskerroinjakauman.

Sovelluskohteet

Menetelmää sovellettiin ensimmäisenä veden kulkeutumisesta ja muodonmuutosten mittaamiseen vakioilavuudessa pidettyihin bentoniittinäytteisiin [1]. Tämän koetyypin tarkoituksena oli tuottaa mallintamiseen tarvittavaa tietoa hyvin määritellyissä näyte- ja kastelugeometrioissa. Sylinterinmuotoisia näytteitä kasteltiin vedellä suodatinlevyn kautta alapäädyistä. Kokeissa muuteltiin bentoniitin alkutiheyttä ja suodatinlevyn halkaisijaa. Kukin näyte kammioineen kuvattiin röntgentomografialla (kuvausaika 45 min) noin 10 kertaa 1–2 viikkoa kestävä kokeen aikana. Kuvassa 1 on esitetty kokeissa käytetyn

näytekammion rakenne ja esimerkkejä tuloksista. Tulostukvasarjasta nähdään veden diffuusiomainen eteneminen (ei selkeää vesirintamaa) ja siirtymävektorikentän monimutkainen aikakehitys. Kokeen aikana seurattiin myös bentoniittinäytteen tuottamaa paisuntapainetta voima-anturien avulla.

Toisena pääsovelluksena oli bentoniitin yksikulotteisen paisumisen seuraaminen [2]. Tämän koetyypin tarkoituksena oli jäljitellä bentoniitin eroosiota (erityisesti sen alkuvaihetta) pohjaveden täyttämään kalliorakoon. Kokeessa vettä laitettiin putkessa olevan bentoniittinäytteen päälle, minkä jälkeen nopeaa paisumisprosessia seurattiin röntgenkuvaamalla näytettä 20 s – 20 min välein neljän päivän ajan. Näissä kokeissa muuteltiin bentoniitin alkutiheyttä ja -kosteuspitoisuutta.

Kuvassa 2 on esitetty kokeissa käytetyn näyteputken rakenne sekä esimerkit röntgenkuvista ja tuloksista. Tuloksista nähdään, että näytteen yläpää kastuu ja paisuu alussa hyvin nopeasti, minkä jälkeen vesi ja siihen liittyvä muodonmuutos etenevät hidastuen näytteen alapäästä kohti. Kokeen jälkeen näyte siivutettiin ja siivujen osatiheydet mitattiin punnitsemalla ne ennen ja jälkeen uunikuivatusta. Viimeisestä tulostukuvasta nähdään, että siivutuksen ja menetelmän antamat tulokset ovat hyvin yhtenevät.

Vaikka menetelmän tärkeimpänä sovelluskohteena oli bentoniitti, sitä sovellettiin väitöstyössä myös biokomposiittimateriaaliin, jossa matriisimateriaalina oli biopohjainen muovi ja vahvikkeena puukuitua [3]. Biokomposiitti on ympäristöystävällinen vaihtoehto tavalliselle komposiittimateriaalille, mutta huonona puolena on luonnonkuitujen herkkyys kosteudelle. Menetelmän avulla saatiin mitattua arvokasta aikasarjatietoa veden kulkeutumisesta, jota voidaan hyödyntää biokomposiittimateriaalien kehittämisessä.

Johtopäätökset

Väitöstyössä kehitetty röntgenkuvantamiseen perustuva menetelmä veden kulkeutumisen ja muodonmuutoksen mittaamiseksi mahdollistaa ainutlaatuisen yksityiskohtaisen tiedon hankkimisen paisuvien materiaalien mallintamista varten. Menetelmän toimivuuden tärkeimpiä edellytyksiä ovat riittävä paikka- ja aikaresoluutio, useiden kuvavirheiden huolellinen korjaaminen ja näytteen muodonmuutoksen tarkka mittaaminen.

Menetelmää sovellettiin onnistuneesti ydinjätteen loppusijoituk-

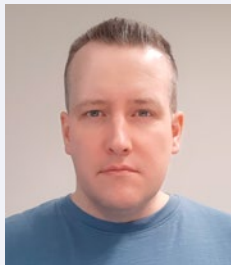
sessä käytettävään bentoniittisaveen, mutta myös biokomposiittimateriaaliin. Menetelmän avulla tuotettua tietoa voidaan hyödyntää entistä parempien kulkeutumis- ja materiaalmallien kehittämiseen ja validointiin. Luotettavaa mallinnusta tarvitaan loppusijoituskonseptin kokonaisturvallisuuden arvioinnissa ja kestävämpien biokomposiittimateriaalien kehittämisessä.

Väitöskirja on hyväksytty Jyväskylän yliopistossa 13.9.2023 ja on saatavilla osoitteesta: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-9718-2>

Viitteet

- [1] Harjupatana, T., Alaraudanjoki, J., & Kataja, M. (2015). X-ray tomographic method for measuring three-dimensional deformation and water content distribution in swelling clays. *Applied Clay Science*, 114(September), 386-394. DOI: 10.1016/j.clay.2015.06.016
- [2] Harjupatana, T., Miettinen, A., & Kataja, M. (2022). A method for measuring wetting and swelling of bentonite using X-ray imaging. *Applied Clay Science*, 221, Article 106485. DOI: 10.1016/j.clay.2022.106485
- [3] Miettinen, A., Harjupatana, T., Kataja, M., Fortino, S., & Immonen, K. (2016). Time-resolved X-ray microtomographic measurement of water transport in wood-fibre reinforced composite material. In B. Madsen, A. Biel, Y. Kusano, H. Lilholt, L. Mikkelsen, L. Mishnaevsky, & B. Sørensen (Eds.), 37th Risø International Symposium on Materials Science (Article 012037). Institute of Physics Publishing Ltd.. IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 139. DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012037

Kirjoittaja



FT Tero Harjupatana
Tutkijatohtori
Jyväskylän yliopisto
tero.t.harjupatana@juu.fi

Diplomityö: Suurien kielimallien hyödyntäminen vaatimusten jäljityksessä ydinvoima-alalla

Pyy Aho
Fortum Power and Heat Oy

Ydinvoimalaitoksiin liittyvät projektit sisältävät usein suuren määrän vaatimuksia, ja viranomais määräykset edellyttävät vaatimusten jäljitystä koko projektin elinkaaren ajan. Vaatimusten suuren määrän takia jäljityslinkkien luominen ja tarkastaminen manuaalisesti on työlästä ja aikaa vievää ja voisi siten hyötyä automatisoinnista. Diplomityössä kehitettiin automatisoituun vaatimusten jäljitykseen prototyyppi, joka hyödyntää suuria kielimalleja vaatimusten välisen sekä vaatimusten ja dokumentaation välisen samankaltaisuuden laskennassa.

Projects related to nuclear power plants often include a large number of requirements, which need to be traced throughout the project life-cycle. Due to the large number of requirements, tracing them manually can be laborious and time-consuming. To alleviate this, a prototype for automated candidate trace link generation was developed. The prototype utilizes large language models (LLMs) to calculate the similarity between requirements and between requirements and design documentation.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten suuria kielimalleja voidaan hyödyntää vaatimusten jäljitysprosessin parantamiseen ydinvoima-alalla. Työssä keskityttiin Loviisan ydinvoimalaan liittyviin muutosprojekteihin. Neljää asiantuntijaa haastateltiin organisaation nykyisiin vaatimusten jäljityskäytäntöihin liittyen.

Työn kirjallisuuskatsaus keskittyi vaatimusten jäljitykseen ja jäljityksen automatisointiin, sekä suurien kielimallien hyödyntämiseen vaatimusten jäljityksessä. Haastatteluiden ja kirjallisuuskatsauksen tuloksia hyödynnettiin prototyypin tavoitteiden ja vaatimusten määrittelyssä sekä arkkitehtuurin suunnittelussa.

Tausta

Vaatimusten jäljityksellä viitataan vaatimusten ja muiden suunnitteluai-
neistojen, kuten teknisen dokumentaation tai testiraporttien, välisten
linkkien luontiin ja hallintaan [1]. Jäljitys helpottaa suunnittelun stan-
dardien ja määräysten täyttymisen arviointia, sekä auttaa muutosten
laajuuden ja vaikutusten arvioinnissa [1]. Suunnittelun vaatimustenmu-
kaisuus ja sen arviointi on erityisen tärkeässä roolissa ydinvoima-alalla.
Lisäksi YVL B.1-341 edellyttää, että vaatimusten on oltava jäljitettävissä
eri suunnitteluvaiheissa [2].

Jäljityslinkkien luominen manuaalisesti voi olla hyvin työlästä, jos
vaatimusten määrä on suuri. Jäljityslinkkien luonnin automatisointiin

on esitetty monia ratkaisuja, joista erityisesti esikoulutetut suuret kie-
limallit ovat tuottaneet lupaavia tuloksia [3].

Suuret kielimallit voidaan jakaa tekstiä generoiviin (esim. GPT-4)
ja tekstiä koodaaviin (esim. BERT) malleihin [4]. Tekstiä koodaavien
mallien on näytetty pärjäävän tekstinluokittelutehtävissä yhtä hyvin
tai jopa paremmin kuin huomattavasti suuremmat tekstiä generoivat
mallit [5], [6].

Mallien koulutuksessa on yleensä kaksi päävaihetta: esikoulutus
(pre-training) ja jatkokoulutus (fine-tuning). Esikoulutuksella viitataan
mallin koulutukseen suurella määrällä luokittelematonta dataa yleisen
tason tehtävissä, kuten seuraavan sanan ennustus. Esikoulutuksen
tavoitteena on kouluttaa malli ymmärtämään tekstiä ja sanojen väli-
siä suhteita [7]. Esikoulutettu kielimalli voidaan jatkokouluttaa tiet-
tyyn tehtävään, kuten tekstin samankaltaisuuden määrittelyyn. Jatkokoulutuksessa käytetään luokiteltua dataa, jota on yleensä huo-
mattavasti pienempi määrä kuin esikoulutuksessa.

Prototyypin kehitys automatisoituun jäljityslinkkien luontiin

Prototyypille määriteltiin kaksi käyttötapausta haastatteluissa tul-
leen palautteen pohjalta: vaatimusten välinen jäljitys (req2req) sekä
vaatimusten ja suunnitteludokumentation välinen jäljitys (req2doc).

Prototyypin toiminta jälkimmäisessä käyttötapauksessa on esitetty kuvassa 1. Vaatimusten välisessä jäljityksessä on suunnitteludokumenttaation jakamista ja jäsentelyä lukuun ottamatta samat vaiheet. Työssä rajoituttiin englanninkielisiin vaatimuksiin ja dokumentaatioon.

Prototyypin perusidea on käyttää esikoulutettuja suuria kielimalleja vaatimusten ja dokumenttien osioiden muuntamiseen numeerisiksi vektoreiksi. Kahden vektorin välistä kosinikulmaa käytetään vaatimusten (tai vaatimuksen ja dokumentin osion) välisen samankaltaisuuden mittarina. Yhtä lähtövaatimusta vertaillaan jokaiseen kohdevaatimukseen tai dokumentin osioon, jonka jälkeen mahdolliset linkit järjestetään niiden välisen kosinikulma-arvon perusteella. Lopulta linkeistä valitaan viisi kaikkein samankaltaisinta linkkiä, jotka palautetaan käyttäjälle.

Prototyypin toteutuksessa käytettiin kielimalleja *sentence-transformers*-kirjastosta, joita on jatkokoulutettu yleiseen tekstin samankaltaisuuden määrittelyyn [8]. Työssä vertailtiin kahta erikokoista RoBERTa-kielimallia (82M ja 355M parametria). Tämän lisäksi malleja koulutettiin aiemmissa Loviisan projekteissa luoduilla jäljitysinkeillä. Koulutus- ja testausdata sisälsi erilaisia vaatimuksia (esim. natiivi- ja prosessivaatimuksia) erityyppisistä projekteista.

Työn tulokset

Prototyypin tarkkuuden mittarina käytettiin ”recall”-arvoa, joka kertoo prototyypin palauttamien linkkien ja kaikkien tosi-linkkien suhteen. Prototyypin luomien linkkien tarkkuus oli kohtalaisella tasolla vaatimusten välisessä jäljityksessä: kolmessa neljästä testitapauksesta sen palauttamat top-5-jäljitysinkeistä sisälsivät keskimäärin 80 % oikeista linkeistä.

Kuvassa 2 on esitetty tulosten tarkkuus datasetissä, jossa natiivi-vaatimuksia on linkitetty prosessivaatimuksiin. Kuvasta nähdään, että

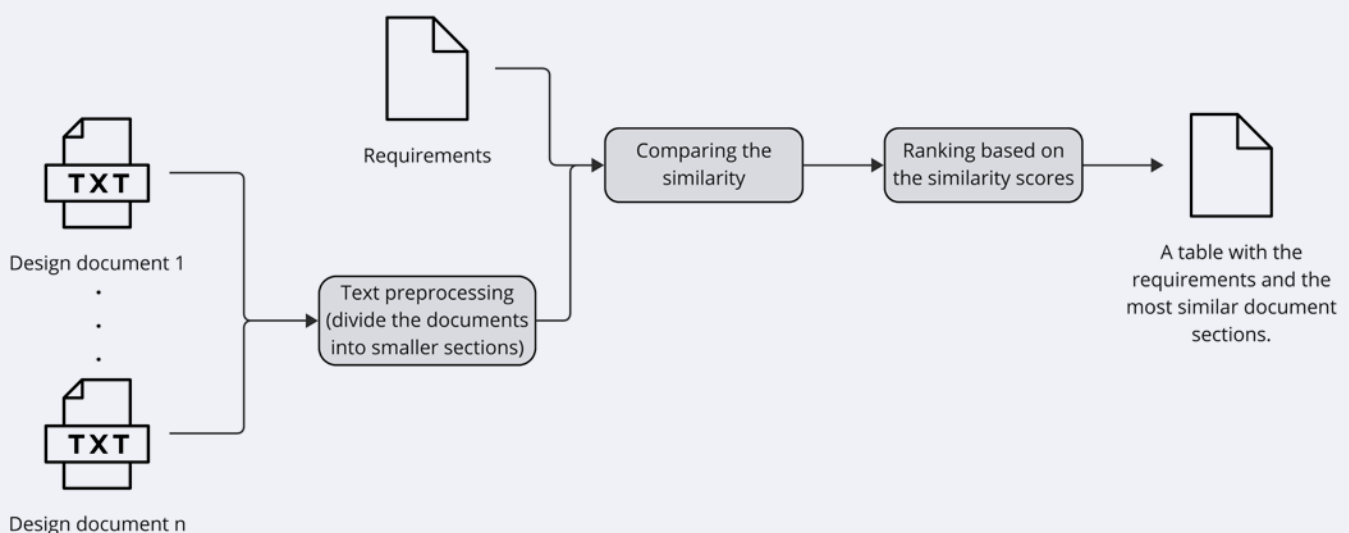
projektin jäljitysdatalla jatkokoulutettu malli pärjää selkeästi paremmin kuin pelkästään yleisellä datalla koulutettu kielimalli (Basic LLM) ja klassinen tiedonhakuun perustuva VSM-toteutus. Tulosten tarkkuus req2doc-käyttötapauksessa oli kuitenkin huomattavasti huonompi: prototyypin palauttamat top-5-linkit sisälsivät vain noin 50 % kaikista tosi-linkkeistä.

Tarkkuuden lisäksi myös prototyypin suorituskykyä arvioitiin. Suuria vaatimusmääriä vertailtaessa prototyypin suorituskyky oli hyväksyttävällä tasolla molemmissa käyttötapauksissa, ja suurien kielimallien ajaminen vei suurimman osan suoritusajasta. Tämän lisäksi dokumenttien jakamiseen ja jäsentelyyn käytetty suoritusajasta oli mitätöntä kielimallien koko suoritusajasta verrattuna (noin 2-3 % koko suoritusajasta).

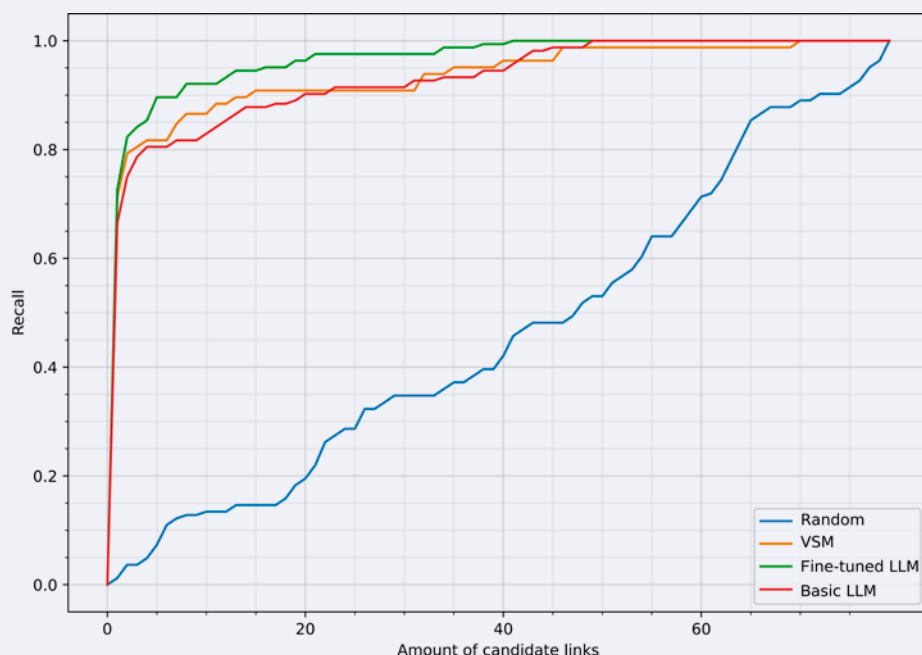
Kaiken kaikkiaan työn tulokset osoittivat, että prototyypin käyttämä samankaltaisuuden perustuva lähestymistapa voisi olla hyödyllinen vaatimusten välisessä jäljityksessä, ja luotujen jäljitysinlinkkien tarkkuus on suurempi, kun vertailtavien vaatimusten tekninen yksityiskohtaisuus on samankaltaista. Työssä esitetty samankaltaisuuden perustuva lähestymistapa ei kuitenkaan vaikuta soveltuvan yhtä hyvin vaatimusten ja vaatimusten täyttymiseen liittyvien dokumenttiosioiden välisten jäljitysinlinkkien luomiseen.

Seuraavaksi prototyypin tarkoitus testata vaatimusten välisessä jäljityksessä käynnissä olevassa projektissa, mikä mahdollistaa prototyypin käytettävyyden ja hyödyllisyyden arvioinnin loppukäyttäjien palautteen perusteella. Tämän jälkeen voidaan pohtia prototyypin toiminnallisuuden integrointia käytössä oleviin vaatimustenhallintajärjestelmiin.

Opinnäytetyö on hyväksytty Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa 19.8.2024.



Kuva 1. Prototyypin toiminnan yltason kuvaus vaatimusten ja dokumentaation välisessä jäljityksessä.



Kuva 2. Prototyypin tarkkuus vaatimusten välisessä jäljityksessä. Kuvaajassa on esitetty työssä kokeiltujen toteutusten tarkkuus (recall), kun prototyypin ehdottamien kandidaattilinkkien määrää kasvatetaan.

Viitteet

- [1] K. E. Wiegers and J. Beatty, Software requirements, 3rd edition. Microsoft Press, 2013.
- [2] STUK, YVL B.1 Safety design of a nuclear power plant. 2019. [Online]. Available: <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLB-1>.
- [3] J. Lin, Y. Liu, Q. Zeng, M. Jiang, and J. Cleland-Huang, "Traceability transformed: Generating more accurate links with pre-trained bert models", in 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE), 2021, pp. 324–335.
- [4] S. Minaee, N. Kalchbrenner, E. Cambria, N. Nikzad, M. Chenaghlu, and J. Gao, "Deep learning–based text classification: A comprehensive review", ACM Comput. Surv., vol. 54, no. 3, Apr. 2021.
- [5] Y. Chae and T. Davidson, "Large language models for text classification: From zero-shot learning to fine-tuning", Aug. 2023. doi: 10.31235/osf.io/sthwk.
- [6] H. Yu, Z. Yang, K. Pelrine, J. F. Godbout, and R. Rabbany, "Open, closed, or small language models for text classification?", 2023. arXiv: 2308.10092 [cs.CL].
- [7] D. Jurafsky and J. H. Martin, Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition, 2023. [Online]. Available: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/>
- [8] N. Reimers and I. Gurevych, "Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks", in Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Association for Computational Linguistics, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1908.10084>.

Kirjoittaja



DI Pyry Aho
Suunnitteluinsinööri
Fortum Power and Heat Oy
pyry.aho@fortum.com

Innovaatio- ja lainsäädäntöprosessit ovat monimutkaisia ja aikaa vieviä toteuttaa

ERITOTEN INNOVAATIOIDEN lainsäädäntöprosessit ovat sitä, sillä eihän innovaatioita voi ylipäättään saattaa tehokkaan lainsäädännön piiriin ennen kuin ne ovat totta ja olemassa. Näin on yleisesti, yhtä lailla niin kansallisesti kuin maailmanlaajuisesti.

Johan jo innovaatioiden patentoiminen on sinänsä lainsäädännön piiriin saattamista, mutta vasta valmistelemaa, ei vielä tehokasta lainsäädäntöä innovaatioiden soveltamiseen teollisuuden kaupallisiksi hyödykkeiksi. On monta haastetta matkalla, monivaiheisia ja monimutkaisia seikkoja ja kaiken aikaa aikaa vain palaa. Ja samaan aikaan myös monet muut yhteiskunnan asiat ja tapahtumat vaativat päättäjien ja toimijoiden toimia: maailmanlaajuisen ”pelikenttä” muuttuu kaiken aikaa, aikaikkunat aukeavat ja sulkeutuvat yleensä hallitsemattoman ennustamattomasti.

Mutta en mene nyt heti pakinan alussa tähän otsikon vääntämään, pakinan loppupuolella vasta. Pitää tähän väliin kirjoittaa se itse pakina. Toimikoon alkukappale ikään kuin pakinan ingressinä, sellaistaahan ei pakinoissa juurikaan harrasteta, mutta mikä estää otsikon todeksi todistamisen heti alkuun?

Eipä mikään ja niin pääsenkin kirjoittamaan noista monista muista yhteiskunnan asioista ja tapahtumista, jotka olennaisessa määrin ohjaavat maailman menoa. Ja siinä sivussa myös sitä, että otsikon asiat ovat monimutkaisia ja aikaa vieviä, joskus jopa vuosisadoissa määrin edestakaisin myötä- ja vastamäessä aikaa vieviä.

NO NIIN. Kesä sitten tuli ja meni, kivaa oli. Niin kauas kuin muistan, olen aina noin ajatellut kesästä. Mutta antaa noiden pitkälti yli puolen sadan muistojen kesän nyt jäädä rauhaan; menen pohtimaan kahden viimeisen kesän asioita ja tapahtumia, ne kun vaikuttavat olennaisessa määrin tässä nykyhetkessäkin. Olennainen kysymys näiden kahden kesän ja niiden väli-

sen ajan on ja on ollut, kuinka Suomen hallitus suoriutuu näinä maailmanpolitiikan epävarmoina aikoina.

Lähden siitä teoriasta tai skenaariosta, että parempi että hallitus suoriutuu kuin ettei suoriudu. Kansallisen yhteiskuntarauhan ja yksilön tarkoituksenmukaisimman asioiden kulun kannalta toimintakykyinen maan hallitus luo parhaat edellytykset ennustaa ja visioida tulevaisuuden asioiden kulkua niin yhteiskunnan kuin yksilön tasolla. Selkokielellä tarkoitan, että jos hallitus ei suoriudu vaan kaatuu, asiat oleellisesti muuttuvat ja niitä tulisi pohtia aivan uudelta pohjalta. Se olisi toisen pakinan juttu, mutta nyt mennään tällä jutulla.

Siispä tähän nykyhetkeen. Urheilua täpösen täynnä olleen televisiokesän jälkeen politiikka on jälleen kesälomien vieton jälkeen palannut myös Suomen eduskuntaan. Ja kuten aiemmin niin edelleen hallitus pyrkii toteuttamaan pääministerin sanoin ”hyvää hallitusohjelmaansa” ja oppositio kaatamaan hallituksen. Turvallisuusasioissa onneksi kuitenkin vallitsee varsin hyvä ja laaja yhteisymmärrys asioiden hoidossa.

Edistettäviä asioita hallituksella on paljon ja oppositio pyrkii parhaansa mukaan kamppaamaan hallitusta ja synnyttämään eripuraa hallituspuolueiden keskuudessa. Eduskunnan työn ulkopuolelta sen agendalle tulee lisää erilaisia asioita, jotka nekin on tavalla tai toisella käsiteltävä. On selvää, ettei näitä kaikkia asioita voi vaalikauden aikana saada kuntoon, vaan hallituksen on osattava priorisoida ja ohittaa haasteellisten asioiden ristiaallokossa karikot, joihin se voisi kaatua.

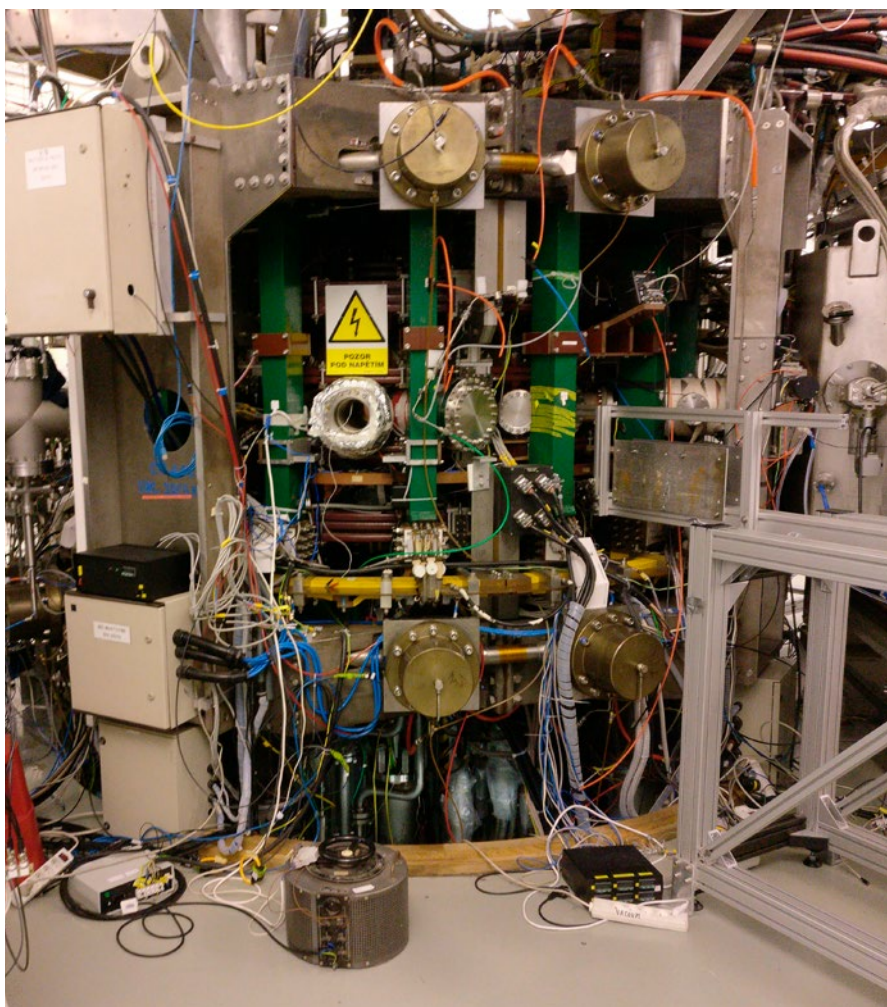
Viimeiset neljä vuosikymmentä hallitukset Suomessa ovatkin käytännössä selviytyneet seuraaviin sääntömääräisiin vaaleihin, mikä on selvä osoitus suomalaisen yhteiskunnan vakaudesta. Suomen itsenäisyyden alusta Kekkosen aikakauden päätökseen asti eli runsaan kuuden vuosikymmenen ajan Suomen

hallitusten keski-ikä oli vain yhden vuoden luokkaa, joten maan ohjattavuuden ennuste on sittemmin parantunut oleellisesti. Hyvä niin!

MITÄ ERITYISEN haasteellisia asioita Orpon hallituksen aikana näen olevan? Lainsäädäntötyö kaiken kaikkiaan, siinä rasismi ja syrjäytyminen, maahanmuutto, talouden ankara korjauskuuri ja -kuri, kansalaisten kohtelu tasa-arvo- ja oikeudenmukaisuusmielessä, soten hyvinvointialueiden toimintojen kehitystyö, aluepolitiikka, työmarkkina-asiat, kulttuuri- ja viestintäasiat, EU:n mahdolliset myös Suomeen vaikuttavat ja Suomen taloutta vaikeuttavat toimet. Ehkäpä tässä haasteellisimmat? Kaikki nuo asiat ovat niin lyhyen kuin pitkän aikavälin kysymyksiä, joten helpolla hallitus ei todellakaan tule pääsemään.

Oikeastaan Suomi heräsi ”liintukotonsa” oloista rasismi- ja syrjäytymiskysymysten karuun maailmaan vasta kesällä 2023. Samoin maahanmuuttokysymykseen, kun asia sukelsi hallituksen oman sisäisen työskentelyn agendalle aiheuttamaan ristiriitoja hallituspuolueitten välillä ja työmarkkinajärjestöjen ja opposition kritisoidessa tiukasti sen toimia. Syksyllä 2023 itärajalla alkoi niin sanottu ”välineellistetty maahanmuutto”, johon liittyvä mittavin lainsäädäntöponnistus käytiin eduskunnassa kesäkuussa 2024, kun rajaturvallisuuspoikkeuslaki hyväksyttiin ennen eduskunnan kesälomille lähtöä.

On olemassa sanonta, että jos lampaaaksi haluaa, niin keritsijöitä kyllä riittää. Pääministerillä on hankala asema sovitella hallituksessa olevien ristiriitojen välillä. Toistaiseksi hän on onnistunut tasapainoilemaan sovittelevasti, ei ole suostunut eikä joutunut lampaaksi keritsijöilleen, vaan kuin rauhallisen lehmän hermoilla varustettuna johtaa provosoitumatta koalitionhallitustaan ja toistamalla toistaen ”hyvään hallitusohjel-



Compass-fuusiolaitteen monimutkaisuutta (kuva: Jarmo Ala-Heikkilä).

maan” vedoten puolustautuu opposition kriittikää vastaan.

Tämä johtamistyyli näyttää sopivan hyvin tähän rauhattomaan maailmantilanteen aikaan. Kukin aika valitsee johtajansa; ”management by perkele” -johtamistyyli saattaisi johtaa näiden lukuisien erilaisten identiteettien aikoina varmaankin kaaokseen.

URHEILUA TULVILLAAN olleen kesän 2024 jälkeen on nyt palattu syksyisen työssä ahertamisen arkeen. Loppukesästä tapahtuneesta Hukkajoen jokihelmisimpukoitten turmasta saattaa olla seurauksena isoakin asennemuutosta Suomen metsänomistajien keskuudessa. Heitä on arviolta 600 000, ja mediaanimetsänomistaja omistaa noin 10 hehtaaria metsää. Metsähehtaarin arvo lienee jossain välillä 5 000–10 000 euroa ja sen vuotuisen metsänkasvun lisäarvo hehtaaria kohti on Ylen TV-uutisten mukaan varsin vaatimaton 200 euroa.

Näiden lukujen pohjalta visioin suuren osan Suomen metsänomistajista näkevän metsän tuoton itselleen jokseenkin marginaalisen pieneksi ja passivoituvan vain omistamaan pieniä metsätonttejaan. Iso osa heistä on iäkästä joukkoa, saaneet metsätonttinsa perintönä, asuvat kaupungissa, metsätontit sijaitsevat kaukana heistä. Näin kuin itsestään metsien avohakkuut vähenevät ja metsät muuttuvat pikkuhiljaa jatkuvan kasvun metsiksi. Tällainen kehitys rauhoittaisi metsänhoidollista keskustelua ja edistäisi luontokadon torjuntaa.

ISO KIRJA eli Raamattu kertoo kuinka ”usko, toivo ja rakkaus” ovat kaikki suuria ja tärkeitä ja niistä suurin on rakkaus. Näitä kaikkia kannattaa pitää mukana ”työkalupakissa” eri asioissa ja aloilla, niin yrityksissä kuin yksilöiden elämässä. Raamatusta tuttujen termien arkiset vastineet ovat visio, missio ja passio. Erityisesti tieteen ja taiteen aloilla ne ovat keskeisiä kä-

sitteitä: voi sanoa, että ne ”pitävät tekijäänsä tiellä”, antavat suuntaa ja sisältöä työlle, muistuttavat tavoitteista ja määränpäästä.

Oman julkaisumme ATS Ydintekniikan aihepiiristä on helppoa löytää asioita, joissa on tarvittu ja edelleen tarvitaan visiota, missiota ja passiota. Ja lisäänpä tähän vielä obsessiion eli pakkomielteen. Siitäkin voi olla hyötyä, kunhan sille ei anna liikaa ”siimaa”.

Ydinenenergia-alalla on oltu niin myötä- kuin vastamäessä, uskoa ja toivoa on tarvittu ja rakkautta lajiin, passiota. Niinpä tällä hetkellä ydinenenergian asema Suomen energiahuollossa on jo pitkään ollut merkittävä ja on edelleen kasvamaan päin. Mutta myös aikaa on tässä kaikessa kulunut, ihmisiin yksiköissä ilmaisten jo useita sukupolvia.

Edelleen kaupallinen fuusio heiluu kuin porkkana kepin päässä aasin saavuttamattomissa. Ja sitten kun aikanaan ollaan tekniikan osalta maalissa, aikaa kuluu siihen, että yhteiskunta lain valmisteluineen on valmis ottamaan uuden teknologian vastaan ja käyttöön. On muutosvastarintaa uutta kohtaan.

Historiasta on hauskoja esimerkkejä muutoksesta, kuinka punalippumies kulkee auton edessä varoittamassa ihmisiä, että takana tulee auto. Vähitellen autosta tuli se hyödyke, joka se nyt on. Sitten kun ollaan valmiita antamaan periksi muutokselle, kuluu vielä vaihtelevassa määrin aikaa, että saadaan innovaatiolle rahoitus ja ryhdytään rakennustyöhön.

MUTTA TÄMÄNHÄN JO KERROIN pakinani otosikossa, joten siinä ei siis mitään uutta. Ellei sitten siinä, että nykyinen elämänrytmimme median ja viestinnän vauhdittamana on niin kovin kiivasta ja malttamatonta, että vauhdin hillitseminen on kovasti toivottavaa. ”Tässä ja nyt” -eläminen on se mitä teemme, ei ”sitten kun” -eläminen.

Selkokielellä ilmaisten tarkoitan, että priorisoisimme ratkaisemaan tämän hetken akuutteja globaaleja ja kuitenkin ratkaistavissa olevia tärkeitä täsmähaasteita emmekä siinä sivussa myös kaikkia mahdollisia maan ja taivaan välillä ilmeneviä tulevaisuuden haasteita, eläisimme aidosti tätä päivää resurssiemme ja voimiemme mukaan.

Urheilutermein ilmaisten mutkamäessä lasketellaan mutkitellen, jotta vauhti ei liikaa kasvaisi ja muuttuisi syöksylaskuksi. Elämä on erikoispujottelun lailla monimutkaista, ei suoraviivaista syöksylaskua. Onneksi, sanoisin ja sanonkin. Siinä ikään kuin ehtii enemmän ja pidemmälle. Kuten eteläitalialainen sananlasku tietää kertoa: ”Hitain pääsee kauimmas.”

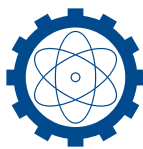
Turvallisuusfilosofi

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
c/o Jenna Järvenpää
PL 1000
02044 VTT

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi

**ATS**

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA –
ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND r.y.
FINNISH NUCLEAR SOCIETY

KANNATUSJÄSENET

FinNuclear ry

**Pohjoismainen
Ydinvakuutuspooli**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**

**Fortum Power
and Heat Oy**

Pohjolan Voima Oy

Teollisuuden Voima Oy

Konecranes Oy

Posiva Oy

TVO Nuclear Services Oy

Pagode Oy

Steady Energy Oy

Westinghouse

Platom Oy

Sweco Finland Oy