

ATS

1|2023

Vol. 52

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

Pienreaktoreiden kokeellista mallinnusta

LUT-yliopiston MOTEL-koelaitteistolla tutkitaan pienreaktoreiden toimintaa, muun muassa niiden höyrystimien käyttäytymistä.

Kaukolämpöreaktori naapuriin?

Moni suomalainen suhtautuu positiivisesti ydinenergiaan, mutta ei silti halua pienreaktoria asuinalueensa lähistölle.

Krakenin lonkerot syleilevät entistä tiukemmin

VTT:n kehittämä reaktorimallinnuksen laskentajärjestelmä on etenevässä kansainväliseen jakeluun ja kotimaiseen kelpoistukseen.

13	14 Probe	15	16	17	18	19	20	21
24	25	26	27	28	29	30	31	32
36	37	38 Probe	39	40	41	42	43 Probe	44
49	50	51	52	53	54 Probe	55	56	57
63	64	65	66 Probe	67	68	69	70	71
77	78	79	80	81	82	83 Probe	84	85
91	92	93	94	95 Probe	96	97	98	99
104	105	106 Probe	107	108	109	110	111 Probe	112
116 Probe	117	118	119	120	121	122	123	124
127	128	129	130	131	132	133	134	135 Probe
	137	138	139	140 Probe	141	142	143	144

Julkaisija / Publisher

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

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / President

TkT Markus Airila
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

MSc Ana Jambrina
ana.jambrina@vtt.fi

Sihteeri / Secretary General

FM Jussi Peltonen
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

FM Maria Lindholm
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

SK Tuomo Huttunen
tuomo.huttunen@rolls-royce-smr.com

DI Olli Nevander
olli480@hotmail.com

TkT Antti Snicker
antti.snicker@aalto.fi

DI Elina Syrjälähti
elina.syrjalahti@tvo.fi

Toimihenkilöt / Functionaries

ATS Young Generation

DI Pekka Pihlanko
pekka.pihlanko@platom.fi

Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

DI Santeri Myllynen
santeri.myllynen@fortum.com

Women in Nuclear Finland

FM Jenna Levo
jenna.levo@tvo.fi

www.vastaava / Webmaster

DI Juha-Pekka Hyvärinen
webmaster@ats-fns.fi

ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkL Eero Patrakka
eero.patrakka@kolumbus.fi

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 Alekski Savolainen
aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund
mervi.soderlund@fortum.com

Toimituksen yhteystiedot

ATS Ydintekniikka

c/o Jarmo Ala-Heikkilä
PL 15100
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 yhdysiteenä 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.

Pitkiä näkymiä

VALTIOEUUVOSTO MYÖNSI 16.2.2023 Fortumille luvan käyttää Loviisan voimalaitosyksiköitä vuoden 2050 loppuun. Lupaa edelsi perusteellinen ympäristövaikutusten arviointivaihe, minkä jälkeen Fortum jätti jatkolupahakemuksen vuoden 2022 keväällä. Hakemus läpäisi viranomaisen seulan, minkä jälkeen valtioneuvoston oli arvattavasti helppo tehdä päätöksensä. Onhan olemassa olevan ja hyväksi havaitun ydinvoimalaitoksen käyttö perusteltua sekä energiaomavaraisuuden että ilmastotavoitteiden kannalta.

Olkiluoto 3:n koekäytön seuraaminen suurennuslasin kanssa on ollut suosittu harastus Suomessa viimeisen vuoden aikana. Keskimääräistä lämpimämmän talven ansios- ta paineet laitoksen käynnistämiseksi eivät ole onneksi nousseet kohtuuttomiksi, vaan laitos- toimittaja ja TVO ovat voineet tehdä tarkas- tuksia ja niiden edellyttämiä huoltoja, joilla pyritään varmistamaan luotettava käyttö pi- temmällä tähtäyksellä. Kun laitoksen suunni- teltu käyttöikä on 60 vuotta – joka käytännös- sä saattaa hyvinkin venyä pitemmäksi – niin

viive tässä vaiheessa tarkoittaa sähkön lisä- tuotantoa 2080-luvulla.

Posiva jätti käytetyn ydinpolttoaineen lop- pusjoiutuslaitoksen käyttö lupahakemuksen reilu vuosi sitten. Päätöstä odotellaan tämän vuoden loppupuolella. Viranomaiskäsittelyn aikana ei ole pyöritetty peukaloita, vaan lop- pusjoiutusunneleita on valmisteltu ja kap- selointilaitoksessa on tehty laiteasennuksia. Loppusjoiutuslaitoksen näkymä on vielä ydin- voimalaitoksiakin pitempi: nykyisten laitosten käytetyn polttoaineen käsittely menee pitkälle 2100-luvun puolelle.

Loviisan jatkoluvasta iloittiin varmasti VTT:llä, koska samalla eteni lupa vastaanottaa tutkimusreaktori FIR 1:n purkujäte. Tarkoitus on loppusjoiuttaa purkujäte omaan nurkkaansa Loviisan voimalaitosjätevarastoon. Komission siunausta vielä odotellaan. VTT:n toisena ilon- aiheena on alkuvuoden päätös satsata mer- kittävästi lisäresursseja kaukolämpöreaktorin tuotteistamiseen yhdessä muiden kotimaisten toimijoiden kanssa EcoSMR Hub -yhteistyö- verkostossa.



Vuodenvaihteessa LUT-yliopisto julkai- si puolestaan aikomuksensa rakentaa tutki- muskäyttöön tarkoitettu MMR-mikroreaktori. LUT:n yhteistyökumppanina hankkees- sa on yhdysvaltalainen Ultra Safe Nuclear Corporation. Tutkimusreaktori on tarkoitus yh- distää Lappeenrannan kaukolämpöverkkoon, mutta kaasujäähdytteisenä mallina sillä voisi myös tuottaa sähköä tai prosessilämpöä.

Kaiken tämän yhteenvetona voi todeta, että ydinenergialla on Suomessa positiivisia ja mel- kosen pitkiä näkymiä!

Jarmo Ala-Heikkilä

Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Pitkiä näkymiä	3
Pääkirjoitus: SAFER2028 – Uusi ydinturvallisuustutkimusohjelma	4
Editorial: SAFER2028 – New Nuclear Safety Research Programme	5
Pakina: Työllä turvallisuutta	42

Tapahtumat

Hankkeiden EcoSMR, dECOMm ja SMRSiMa yhteisseminaarissa tarkasteltiin pienydinreaktoreita	6
Rastit eivät löydy ja maaliin pääsy kestää – mitä oppia ydinvoimalahankkeista?	8
Tiede ja tekniikka	
Ydinvoimalaitosprojektin aikataulu ja lupaprosessi	11
<i>Olli Nevander</i>	
Kuka murhasi ydinvoiman, ja miten?	16
<i>Janne M. Korhonen</i>	

Naapuriksi pienydinvoimala?	24
<i>Matti Kojo, Sarah Tornberg, Mika Kari, Anni Vainio, Tapio Litmanen, Markku Lehtonen</i>	
Pienreaktorien tutkimusta McSAFER EU-hankkeessa LUT-yliopiston MOTEL-laitteistolla	29
<i>Joonas Telkkä, Heikki Suikkanen, Virpi Kouhia</i>	
Kraken iskee Suomeen	35
<i>Ville Valtavirta</i>	
Diplomityö: Riskitietojärjestelmän kehittäminen ydinvoimalaitosten viranomaisvalvonnan tueksi	38
<i>Teemu Soukki</i>	

SAFER2028 – Uusi ydinturvallisuus- tutkimusohjelma

SUOMESSA ON JÄRJESTETTY Valtion Ydinjätehuoltorahaston (VYR) rahoituksella ydinturvallisuuteen liittyviä tutkimusohjelmia 1990-luvulta asti. Tavoitteena on ollut varmistaa viranomaisten saataville riittävä asiantuntemus erilaisissa tilanteissa, kehittää alan osaamista ja tuottaa korkeatasoista tieteellistä tutkimusta. Tänä vuonna kunnia-kas perinne saa jatkoa, kun SAFER2028 (Kansallinen ydinturvallisuustutkimusohjelma 2023–2028) käynnistyy maaliskuussa tehtävien VYR:in rahoituspäätösten myötä.

SAFER2028 yhdistää voimalaitosten turvallisuustutkimuksen ydinjätehuollon tutkimukseen ja toiveena on, että tutkimusalueiden välille löytyy synergiaa. Samalla monet väliin putoavat tutkimusalueet pääsevät vahvemmin mukaan, ja ydinjätetutkimuksen puolella pitkään jatkunut yhteiskunnallinen tutkimus laajenee myös koskemaan voimalaitospuolta, mikä antaa uusia mahdollisuuksia esimerkiksi SMR-reaktoreihin liittyvien hyväksyttävyyksymysten tutkimiseen.

Tutkimusohjelma käynnistyy hetkenä, jolloin maailma ja erityisesti Eurooppa on suuressa muutoksessa. Ydinvoiman hyväksyttävyyden on korkealla ja eri toimijat ovat ilmoittaneet SMR-reaktoreihin liittyvistä avauksista. Alallamme on kuitenkin vastuu pitää kiinni korkeasta ydinturvallisuustasosta myös silloin, kun kehitys on nopeaa. Tässä SAFER2028 on avainroolissa sekä osaamisen kehittämisen että tutkimuksen tulosten osalta – sekä foorumina, joka yhdistää viranomaiset, luvanhalijat ja tutkijat.

Millaista tutkimusta 2020-luvun Suomessa sitten tarvitaan ydinturvallisuuden saralla? Aihetta on yritetty avata SAFER2028:n runkosuunnitelmassa, joka on luettavissa ohjelman kotisivuilla (safer2028.fi). Runkosuunnitelmassa tunnistettiin useita tärkeitä tutkimusaiheita ja niihin liittyviä tavoit-

teita. Syksyllä 2022 järjestetyssä hankehaussa saatiin yhteensä 83 hanke-esitystä näihin aiheisiin liittyvään tutkimukseen, ja niistä 45 kyettiin käynnistämään pyydettyllä tai osittaisella rahoituksella.

SAFER2028:n alla käynnistää toimintansa tänä vuonna myös uusi tohtorikoulutusverkosto (Doctoral Education Network, DENSE), jonka tarkoitus on tukea alan tohtoriopiskelijoiden työtä ja kasvua ydinturvallisuusasiantuntijoiksi. Vastaavaa kokonaisuutta ei ole VYR:in tutkimusohjelmissa aiemmin ollut.

Verkoston kanssa ollaan uuden äärellä ja onkin hyvin mielenkiintoista nähdä, miten DENSE kasvaa tulevina vuosina ottamaan sille suunnitellun roolin. Ydinturvallisuuden tai ydinjätehuollon koulutusta sellaisenaan ei Suomessa yliopistotasolla kovin monessa paikassa tarjota, jolloin on tärkeätä, että monitieteellisen alan eri taustoista tulevat tutkijat saadaan integroitua ydinturvallisuusajatteluun ja tutkimuksen tavoitteet ydinturvallisuusvai- kutuksiin.

Aivan helppoa SAFER2028:n käynnistyminen ei ole ollut. Fennovoiman projektin lopetuksen jälkeen tutkimusohjelman rahoitukseen tuli merkittävä leikkaus suhteessa aiempiin ohjelmiin, erityisesti voimalaitosten turvallisuustutkimuksen osalta. Arviointiprosessin aikana kävi ilmeiseksi, että rahoitusta ei riitä kaikille hyvilekkään hanke-esityksille eikä kaikkia aiemmissa tutkimusohjelmissa hyvinä pidettyjä tutkimusaiheita pystytty rahoittamaan aiemmalla volyyymillä.

Rahoitustilanne on hankala monille tutkimusryhmille: osa ydinturvallisuuden kannalta aivan keskeisestä osaamisesta on kaupallisesti vaikeasti ylläpidettävissä. VYR-rahoituksen huvetessa saatetaan joutua tilanteeseen, jossa korkeatasoisen tutkimuksen tekeminen ja osaamisen kehittäminen käytettävissä olevilla resursseilla on vaikeaa tietyillä aihealueilla.



Ydinturvallisuustutkimuksen ja SAFER2028:n kannalta on kuitenkin myös syytä olla optimistinen tulevaisuuden kannalta. Uusien SMR-projektien ja ydinenergian yhä näkyvämmäksi tulevan yhteiskunnallisen merkityksen voi toivoa johtavan ajan myötä myös uusiin resursseihin tutkimusohjelmalle VYR:in rahoitusmekanismien kautta.

Suvi Karvonen

TkT, SAFER2028 -tutkimusohjelman johtaja
Teknologian tutkimuskeskus VTT
suvi.karvonen@vtt.fi

SAFER2028 – New Nuclear Safety Research Programme

NATIONAL NUCLEAR SAFETY research programmes have been organised in Finland since the 1990s with funding from the National Nuclear Waste Management Fund (VYR). The aim of the research programmes has been to ensure that the authorities have sufficient expertise available to them in different situations, to develop nuclear safety competences and to perform high-quality scientific research. This year, the tradition will be continued with SAFER2028 (National Nuclear Safety and Waste Management Research Programme 2023–2028) starting.

SAFER2028 combines nuclear power plant safety research with nuclear waste management research, and hopefully there will be synergies between the two research areas. Another benefit of the merge of research topics should be that many research areas that previously fell in-between the focus areas will now be more strongly included. The societal research that has long been a part of nuclear waste management research can now also be extended to nuclear energy production, which will provide new opportunities for the examination of acceptability issues related to SMR reactors, for example.

The research programme is launched at a time when the world, and Europe in particular, is undergoing a major energy transformation. The acceptability of nuclear power is high and various operators have announced plans related to SMR reactors. However, we have a responsibility to maintain a high level of nuclear safety even when developments are rapid. Here SAFER2028 plays a key role both in terms of the competence development and research results – as well as a platform that connects authorities, licensees, and researchers.

So, what kind of research is needed in Finland in the 2020s in the field of nu-

clear safety? This topic is described in the SAFER2028 framework plan, which is available on the programme's website (safer2028.fi). The framework plan identified several important research topics and related research objectives, and the first call for proposals was organized last autumn. As an outcome, a total of 83 project proposals for research related to these topics were received, and 45 of those will be funded at requested or partial funding level.

SAFER2028 also has a completely new feature: the Doctoral Education Network (DENSE). Its purpose is to support the work and growth of doctoral students in the field into nuclear safety experts. Since DENSE is a novelty in VYR funded research programmes, it will be very interesting to see how it grows in the coming years to take on the role planned for it.

The role of DENSE is important because education in nuclear safety or nuclear waste management as such is not offered in many places at university level in Finland. Thus, it is important that researchers from different backgrounds in our multidisciplinary field can be integrated into the nuclear safety mindset and be given a clear understanding of the objectives and impact of the research.

The start of SAFER2028 has not been entirely easy. After the Fennovoima project was cancelled, the funding of the research programme was significantly cut in comparison to previous programmes, especially for the part of nuclear power plant safety research. During the evaluation process, it became clear that there was not enough funding for all good project proposals, and not all key research areas from previous research programmes could be funded at the same volumes.

The funding situation is also difficult for many research groups: some of the knowhow

that is essential for nuclear safety can be difficult to maintain on purely commercial terms. As VYR funding decreases, we may find ourselves in a situation where it is difficult to conduct high-quality research and develop competence with the available resources in certain research areas.

However, there is also cause to be optimistic about the future for nuclear safety research and SAFER2028. The planned SMR projects and the increasingly visible importance of nuclear energy in the society can be hoped to also eventually lead to new resources for research through the funding mechanisms of VYR.

Suvi Karvonen

DSc(Tech), SAFER2028 Programme Director
VTT Technical Research Centre of Finland
suvi.karvonen@vtt.fi



Hankkeiden EcoSMR, dECOMm ja SMRSiMa yhteisseminaarissa tarkasteltiin pienydinreaktoreita

Ydinvoima-alan tutkimushankkeiden yhteisseminaarissa esiteltiin uusimpia pienydinvoimaloita koskevia tutkimustuloksia.

Teksti ja kuvat: Olli Soppela



Olli Soppela
Tutkija
VTT Oy
olli.soppela@vtt.fi

P IENREAKTORITUTKIMUSTA on tehty Suomessa vuosien ajan. Suomalaiset energia- ja konsulttiyhtiöt, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) ja Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto (LUT) ovat tehneet yhteisiä tutkimushankkeita eri pienydinvoimalakonsepteihin liittyvistä turvallisuus-, elinkaari- ja kannattavuusselvityksistä. Suomessa on hyödynnetty vahvaa ydinvoima-alan osaamista hyvissä ajoin nyt ajankohtaiseksi muodostuneen pienreaktori-tutkimuksen osalta.

Yhteishankkeilla on kehitetty suomalaisten toimijoiden pienreaktorialan kaupallista osaamista ja alan toimitusketjujen ymmärrystä. Osaamisen kehitys onkin ollut ajankohtaista, sillä viimeisen vuoden aikana poliittinen

Välipalat ja vilkas keskustelu täyttivät seminaari-esitysten tauot.

kiinnostus pienydinvoimaloille Euroopassa ja muualla maailmassa on kasvanut voimakkaasti energiakriisin aiheuttamien vaikutusten johdosta. Yhdysvaltalaiset pienreaktorikehittäjät ovat tällä hetkellä valmistelemaan ensimmäisiä kaupallisia pienreaktorihankkeitaan kotimaassaan sekä Euroopassa.

Ekosysteemien kohtaaminen

EcoSMR- ja dECOMm-ekosysteemi-hankkeissa jäsenorganisaatiot keräsivät yhdessä tutkimustietoa pienydinreaktorikonseptien kypsyysasteeseen, turvallisuuteen, luvitukseen, tuotantoon, käyttöön, sosiaaliseen hyväksyntään ja elinkaarihallintaan liittyen. Ekosysteemi-hankkeet kokosivat vuosien varrella yhteen pienydinvoimaloista sekä ydinvoimaloiden käytöstäpoistosta kiinnostuneita tahoja löytämään uusia pienydinvoimaloiden elinkaarihallintaan liittyviä yhteisiä mahdollisuuksia.

SMRSiMa tarjosi verkostolle lisäksi arvokasta tietoa pienydinvoimaloiden käytetyn polttoaineen ympäristövaikutuksiin ja käsittelyyn liittyen. Kokonaisuudessaan hankkeet pohjustivat kattavasti suomalaisten toimijoiden ymmärrystä pienydinvoimaloiden elinkaarihallintaan liittyvistä vaiheista sekä eri toimijoiden rooleista eri vaiheissa.

Elävää keskustelua

Ydinenergia-alan kotimaiset toimijat kävivät vuorovaikutteista monialaista keskustelua seminaarin läpi. Korona-ajan tapahtumatauko ja sen jälkeinen vähäinen alan tapahtumien määrä on kasvattanut kiinnostusta kollegoiden jälleennäkemiseen vapaan keskustelun merkeissä.

Tiedonvaihto esitysten teemoista oli avointa keskustelun käydessä vilkkaasti kysymyksiin ja vastauksiin keskittyvillä tauoilla esitysten välissä. Seminaarin palautteista käy ilmi osallistujien korkea arvostus vapaamuotoista teollisuuden, viranomaisten ja tutkimusorganisaatioiden välillä käytävää keskustelua kohtaan.

Kansainvälisten osallistujien palautteista nousee myös esille arvostus Suomen ydinenergia-alan poikkeuksellisen hyvää poikialaista dialogia kohtaan. Suomalaisen ydinenergia-alan toimijoiden yhteistyön kansainvälisessä palautteessa poikkeuksellisen hyvä keskinäinen luottamus ja kunnioitus nousivat toistuvasti esiin. Keskustelurajapintojen eteenpäin kehittämistä pidetään alalla yhtenä

Ydinenergialaitosten käytöstäpoistoon liittyvässä seminaariosiossa kuultiin yritysten viimeisimpiä tutkimustuloksia teknologian ja markkinoiden kehityksestä.

tärkeimmistä kehityskohteista ja Suomessa onnistuttu näyttämään hyvää esimerkkiä hyvästä yhteiskunnallisesta yhteishengestä.

EcoSMR-hankkeen aikana VTT ja LUT tekivät tutkimusta pienydinvoimaloiden saatavuuteen, suoja-alueisiin, lisensointiin ja teknoekonomisiin mallinnuksiin liittyen. Tutkimustietoa kerättiin ja jaettiin partneriverkostossa myös sosiaalisen hyväksyttävyyden, käytetyn polttoaineen loppusijoituksen ja kansainvälisen pienreaktorikehityksen osalta.

Hankkeen aikana kehitettiin myös olemassa olevia simulaatio- ja analyysityökaluja pienreaktorien toimintojen mallintamiseen soveltuvammiksi. Hankkeen aikana tehdyllä tutkimuksella edistettiin lisäksi ymmärrystä pienreaktoreiden käyttöturvallisuudesta ja kehitettiin organisaatioiden osaamista uusien teknologioiden turvallisuusarviointin osalta. Hankkeen avoimet tutkimustulokset julkaisitaan hankkeen kotisivuilla sekä VTT:n CRIS-julkaisujärjestelmässä.

Laatujärjestelmät, passiivinen jäähditys, suoja-alueet ja etähallinta

Teknologiat kehittyvät globaalissa ympäristössä nopeaan tahtiin eikä ydinenergia ole poikkeus. Ydinenergiaan liittyvät tutkimus- ja investointihankkeet painottuvat maailmanlaajuisesti yhä enemmän uusiin pienreaktoriteknologioihin, joilla pyritään mahdollistamaan nopeammat rakennusajat sekä turvallisempi käyttö.

Monimutkaisten pienreaktoreiden toimituskokonaisuuksien mahdolliseksi pullonkauloiksi

osoittautuivat tutkimuksen aikana ydinenergialaitosten uusien turvallisuusmekanismien elinkaarikäyttötymisen varmistaminen, laitoskomponenttien kansainvälisten hyväksyttämiskäytäntöjen puute, ydinenergialaitoksilta vaadittujen laajojen suoja-alueiden asettamat rajoitukset ydinenergian sovelluskohteille sekä useista reaktoriyksiköistä koostuvien ydinenergialaitosten etähallintaan soveltuvat hyväksyttävät menetelmät.


Ekosysteemien jäsenet ovat osallistuneet aktiivisesti kansainvälisiin työryhmiin, joissa turvallisuusvaatimusten parhaaksi todettuja toteamiskäytäntöjä pyritään harmonisoimaan eri valtioiden välillä. Myös Suomessa käynnissä olevaan ydinenergiain kokonaisuudistukseen pyritään löytämään soveltuvia käytäntöjä maailmalta.



EcoSMR-Hub jatkaa ekosysteemitöitä

EcoSMR oli alkaessaan ainoa konsortioalueen pienreaktorihanke Suomessa. Nyt useat toimijat ovat aktivoituneet käynnistämään yhteistyötä pienreaktoriosaamisen kehittämiseksi. EcoSMR-hankkeen päätyttyä hankepartnerit käynnistävät EcoSMR-Hubin, jossa pienreaktoreihin liittyvää tiedonjakoa ja verkostoitumista jatketaan kotimaisen ohjausryhmän johdolla.

EcoSMR-Hub palvelee pienreaktoreista kiinnostuneita organisaatioita Suomessa tarjoamalla keskustelualueen teollisuuden, viranomaisten sekä tutkimuslaitosten välillä. Lisäksi EcoSMR-Hub tarjoaa jäsenilleen päivittyvää ajankohtaista tietoa pienreaktoreihin liittyvistä toimitusketjuista, asiakasryhmistä, lainsäädännöstä sekä kansainvälisten käytäntöjen harmonisoinnista. Tietopalvelut pyrkivät kattamaan pienreaktoreiden koko elinkaaren hallintaan liittyvät teemat sisäisiin työryhmiin, joissa muodostetaan itsenäisiä projektikonsortioita käytännön toteutuksiin.

EcoSMR-Hub käynnistyy keväällä 2023 ja toivottaa tervetulleiksi jäseniksi kaikki pienydinvoimaloiden tuotannosta tai käytöstä kiinnostuneet tahot. Lisätietoja on saatavilla verkkosivulta www.ecosmr.fi. 



Paasitorin salit tarjosivat puitteet monialaisen ydinenergia-alan osaajajoukon kokoontumiselle. Tapahtuman kansainvälisen luonteen johdosta seminaarin esityskieli oli englanti.

Rastit eivät löydy ja maaliin pääsy kestää – mitä oppia ydinvoimalahankkeista?

Tällä vuosituhannella Suomessa on ollut vireillä useita uusia ydinvoimalaitoshankkeita. Olkiluoto 3 on pitkän taivalluksen jälkeen vihdoinkin kaupallisen käytön kynnyksellä, mutta muilla hankkeilla matka on päättynyt jo alkumatkan rasteilla. Mitä näistä hankkeista voisi oppia? ATS-jäsentilaisuudessa 17.1. tätä pohdittiin eri näkökulmista.

Teksti: Elina Syrjälahti **Kuvat:** Markus Airila ja Elina Syrjälahti

VUODEN ENSIMMÄINEN jäsentilaisuus järjestettiin 17.1. Aalto-yliopiston tiloissa Otaniemessä. Tilaisuuden aiheena olivat kokemukset 2000-luvun suurista laitos-hankkeista, mutta illan aikana sivuttiin myös aikaisempia, onnistuneesti maaliin päässeitä laitos-hankkeita. Osallistujia oli paikan päällä yli viisikymmentä, ja lähes saman verran seuran jäseniä osallistui etäyhteydellä.

Hanhikivellä harhailua alkumatkasta

Esitykset käsittelivät laitos-hankkeita eri näkökulmista. Illan aloitti Säteilyturvakeskuksen Janne Nevalainen, joka on aloittanut työskentelynsä STUKissa OL3-projektin parissa ja siirtynyt sittemmin Fennovoiman ydinvoimalaitoshankkeen STUKin valvontaprojektin päälliköksi.

Nevalainen korosti osapuolten välillä varhaisessa vaiheessa tapahtuvan keskustelun tärkeyttä. Tämän tueksi soveltuvuusselvitysvaiheessa järjestettiin seminaarejakin. Fennovoiman periaatepäätöshakemuksen aikaan Suomessa oli vireillä kolme uutta laitos-hanketta, ja STUK perehtyi silloin kaiken kaikkiaan seitsemään eri laitostyyppiin.

Fennovoiman alkuperäisessä soveltuvuusselvityksessä laitosvaihtoehtoina oli Toshiba ja Arevan laitostyyppijä, ja Rosatomin AES-2006 nousi laitosvaihtoehdoksi vasta myöhemmin omistussuhteiden muututtua E.ONin

vetäytymisen myötä. Fennovoimalle myönnetyn periaatepäätöksen viiden vuoden voimassaoloajasta hyvin suuri osa ehtikin kuluu muiden laitostyyppien parissa. Säteilyturvakeskus oli kuitenkin perehtynyt myös AES-2006-laitostyyppiin Fortumin periaatepäätöshakemuksen takia, mutta varsinaiset keskustelut venäläisen laitostoimittajan kanssa jäivät melko lyhyiksi Fennovoiman projektin valmisteluvaiheessa.

Fennovoiman suorituksen valvontaa

Nevalaisen mukaan YVL-ohjeen B.1 (Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu) ajatuksena on, että laitoksen perussuunnittelun pitäisi olla valmis rakentamislupaa myönnettäessä, ja alustavan turvallisuusselosteen (PSAR) halutaan olevan Suomen vaatimuksiin sovitettu. Suomalaiset erityisvaatimukset saivat jonkin verran kritiikkiä yleisön palautteissa, koska niiden nähtiin hankaloittavan kansainvälisten projektien suoraviivaista toteuttamista Suomessa. Keskustelussa kansalliset vaatimukset nähtiin ristiriitaisena SMR-laitosten filosofian kannalta, mutta Nevalaisen mukaan SMR-laitosten luvittaminen ja rakentaminen on mahdollista nykyisilläänkin säädöksillä.

STUK sallii rakentamislupahakemuksen täydentämisen, mitä mahdollisuutta Fennovoiman projektissa hyödynnettiin laajasti. Paloittain toimitetun hakemuksen hankaluute-



DI Elina Syrjälahti
ATS:n johtokunnan jäsen
elina.syrjalahti@tvo.fi



Aalto-yliopiston kandidaattikeskuksen (aikaisemmin TKK-päärakennus) yli 300-paikkaisen B-salin tilat mahdollistivat terveysturvalliset puitteet jäsentilaisuudelle (kuva: Markus Airila).

na on kuitenkin hallita, milloin mikäkin suunnittelun osa jäädytetään. Organisaation laatu-järjestelmälle tämä asettaa suuria vaatimuksia.

Venäläisellä laitostoimittajalla oli kyllä muutosten hallintajärjestelmä, mutta teknisen konfiguraation hallinnassa jäädytyspisteineen olisi Nevalaisen mukaan ollut parannettavaa. Projektihallinnan kannalta Fennovoiman hankkeessa yhtenä hankaluutena oli, että Rosatom käyttää tukenaan hyvin paljon erillisiä, eri osa-alueisiin erikoistuneita instituutteja, joiden roolia ei aina ollut määritelty riittävän selkeästi – tai ainakaan roolit eivät välittyneet Suomeen asti.

STUKin toive on, että kokemukset referenssilaitoksesta ja OL3-projektista hyödynnettäisiin tehokkaasti. Hanhikiven tapauksessa näin ei tapahtunut. STUK pääsi seuraamaan suojarakennuksen painekoetta referenssilaitoksena olleeseen Sosnovyi Boriin, mutta muuten yhteydet Leningradin laitokseen jäivät hyvin heikoksi, mitä Nevalainen piti hukattuna mahdollisuutena.

Nevalainen korosti myös avoimen tiedotuksen merkitystä nykyajan laitoshankkeissa. Säteilyturvakeskuksen laatimat kolmannesvuosiraportit ovat saaneet paljon kiitosta tiedotusväli-

neiltä. Varsinaiseen valvontatyön liittyen hyviä kokemuksia saatiin pilottidokumentaatiosta. Hanhikivi-projektissa laitostoimittaja kehitti toimintaansa ja toimitettavien dokumenttien laatua pilottidokumentaatiosta annetun paltteen perusteella.

Fennovoiman laitoshankkeen matka jäi kesken vuosien työn jälkeen, mutta STUK kehitti projektin aikana myös omia työmenetelmiään ja -välineitään. Kehitettyjä työkaluja, kuten tarkastusten ja säädösvaatimusten hallinnan tueksi kehitettyjä tietojärjestelmiä, voidaan jatkossa käyttää niin mahdollisissa uusissa projekteissa kuin käyviin laitosten valvonnassakin.

Ovatko rastit paikallaan?

Illan toisen esityksen piti Olli Nevander, joka on työskennellyt useamman laitoshankkeen parissa eri yhtiöissä, ja työkokemusta on kertynyt myös OECD:sta ja STUKista. Nevander käsiteli esityksessään kolmea tällä vuosituohannella vireillä ollutta laitoshanketta, joihin kaikkiin hän on päässyt työurallaan perehtymään. Laajassa esityksessään käytiin läpi niin eri sopimustyyppien piirteitä kuin luvituksen vaiheitakin, kansainvälistä vertailutietoa unohtamatta.

Yhtenä suurena ongelmana Nevander näki suomalaisen rakentamislupavaiheen yksityiskohtaiset vaatimukset, jotka johtavat helposti iteratiiviseen prosessiin ja sitä kautta aikatau-



STUKin Janne Nevalainen kertomassa Hanhikivi-projektin valvonnasta.



Olli Nevander kuvasi 2000-luvun laitosprojekteja.



Jukka Laaksonen kertomassa historiasta ja nykypäivän hankkeista.

luongelmiin ja jopa epäoptimaaliseen lopputulokseen. Myös luvanhakijoiden toimintatavoissa Nevander näki merkittäviä eroja. Nevanderin esityksestä on erillinen artikkeli tämän lehden sivuilla 11–15.

Onnistuneiden suoritusten kertaamista ja tuoreempaa kokemusta uudesta suunnasta

Viimeisenä ääneen pääsi Jukka Laaksonen, joka käsitteli esityksessään myös Loviisa 1&2 ja Olkiluoto 1&2 yksiköiden rakentamista. Loviisa 1:n rakentamisluvan käsittelyn aikaan

Suomessa ei vielä ollut systemaattisia lupaprosesseja ja valvontamenetelmiä, vaan ne muotoutuivat vasta hankkeen aikana. Laaksonen näki merkittävänä seikkana Loviisan ensimmäisen projektin onnistuneessa toteutuksessa sen, että IVO otti itse erittäin aktiivisen roolin projektissa. IVOsta löytyi osaamista ja merkittävää taustatukea se sai VTT:ltä. Myös keskustelu-yhteys viranomaisen kanssa oli avoin.

Vastaavaa avointa kommunikaatiota oli myös OL1- ja OL2-projekteissa. Laitostoimittaja ASEA Atomille oli kertynyt runsaasti kokemusta ja osaamista ruotsalaisista ydinlaitosprojekteista, ja laitostoimittaja toimi hyvin


vastuullisesti. ASEA Atom oli myös ennestään perehtynyt yhdysvaltalaisiin vaatimuksiin ja pystyi siten laatimaan hyvälaatuiset PSAR- ja FSAR-asiakirjat. TVO sekä STUKin edeltäjä SFL olivat projekteissa aktiivisen oppijan roolissa, mutta täyttivät sen roolin vastuullisesti. Yleisön palautteessa oltiin pääasiassa samaa mieltä Laaksosen esityksen kanssa, mutta toisaalta muistutettiin, että aika oli vanhojen projektien aikaan erilainen ja suora vertailu vanhoihin projekteihin ei ole kovin hedelmällistä.

Laaksosen mukaan Olkiluoto 3:n laitostoimittaja poikkesi toimintatavoiltaan ASEA Atomista, mikä pääsi yllättämään ruotsalaisten hyvään ja luotettavaan toimintatapaan tottuneet suomalaiset. EPR-laitoksen suunnittelun valmius ei ollut sillä tasolla, mitä sopimusvaiheessa luultiin, ja suunnittelun täydentäminen vei laitostoimittajalta paljon odotettua pidemmän ajan.

Hanhikiven projektia Laaksonen käsittelee enemmän laitostoimittajan näkökulmasta. Kritiikkiä saivat osakseen niin Fennovoiman kokemattomuus ydinvoimalaitosprojekteista kuin STUKin vaatimukset suunnitteluprosessille. Laaksonen muistutti, että Rosatomilla on vankkaa näyttöä maaliin päässeistä ydinvoimalahankkeista – paranisiko suoritus suunnitteluprosessiin puuttumalla? Yleisöpalautteessa Laaksosen näkemystä ei täysin jaettu, vaan muistutettiin, että Fennovoimassa oli osavia ja kokeneita kotimaisia avainhenkilöitä koko hankkeen ajan ja nähtiin puutteita myös Rosatomin toiminnassa.

Miten maaliin seuraavalla kerralla?

Esiintyjien lisäksi myös yleisön puolella oli paljon kokemusta niin uudemmissa kuin vanhemmistakin ydinvoimalaprojekteista. Käytettävissä ollut aika ei kuitenkaan mahdollistanut kovin pitkää keskustelua, mutta kommentteja esityksiin oli mahdollista jättää myös kirjallisena. Yleisökommenttien perusteella myös teknisistä haasteista ja luotettavuustekniikan soveltamisesta olisi haluttu kuulla enemmän. Toisaalta taas arveltiin, että omistajan näkökulmasta esitetty arvio hankkeiden riskeistä olisi saattanut poiketa illan aikana esitetystä.

Esitysten perusteella mikään osapuoli ei selvinnyt moitteita vuosituhannen alun hankkeista. Toivottavasti opit osataan hyödyntää, ja mahdollisissa tulevaisuuden hankkeissa niin maali kuin matkan varren rastiinkin löytyvät joutuisammin. 

Ydinvoimalaitosprojektin aikataulu ja lupaprosessi

Olli Nevander
ATS

Artikkeli on tiivistelmä 17.1.2023 ATS-jäsentilaisuudessa pidetystä esityksestä, jossa kirjoittaja esitti kokemuksiinsa perustuvaa analyysia ydinvoimalaitoshankkeiden suunnittelu- ja lupaprosesseista. Artikkelin analyysien pohjana on käytetty sekä aiempia että tämän vuosituhannen aikaisia ydinvoimalaitoshankkeita Suomessa. Esimerkkeinä käytetään kolmea Suomessa tällä vuosituhannella aloitettua ydinvoimalaitoshanketta. Hankkeita valmisteltiin tai ne vietiin päätökseen kolmessa, lähtökohdiltaan ja toimintatavoiltaan erilaisessa suomalaisessa voimayhtiössä. Hankkeissa oli osallisena toimijoita suomalaisista ja ulkomaisista ydinalan konsultointiyhtiöistä. Artikkelin lopussa on tunnistettu ja ehdotettu joitakin toiminnan kaikilla tasoilla toteutettavia parannuksia viranomaissäännöstöstä hankkeiden organisointiin ja toteutukseen.

This article is a summary of the presentation held at the ATS member meeting on January 17, 2023, where the author presented an analysis based on his experiences of the planning and permitting processes of nuclear power plant projects. Nuclear power plant projects in Finland have been used as the basis for the analysis of the article. Three specific nuclear power plant projects started in Finland in this millennium are used as examples. Projects were prepared or completed in three Finnish power companies with different backgrounds and company policies. Finnish and foreign nuclear consulting companies were involved in the projects. At the end of the article, some improvements to be implemented at all levels of the operation, from the regulatory framework to the organization and implementation of projects and procedures, have been identified and proposed.

Tässä tekstissä käsitellään laitoshankkeiden sopimusten ja toteutuksen ongelmia kolmen pääesimerkin kokemuksen pohjalta. Hankkeet ovat asiantuntijan tunnistettavissa, mutta niitä ei tarkoituksellisesti ole nimetty, jotta niiden yleisiä opetuksia on mahdollista käsitellä puolueettomammin. Tarvittaessa viitataan myös muissa Suomessa ja Ruotsissa 2000-luvulla toteutetuissa laajoissa ydinvoimalaitosten uudistushankkeissa saatuihin kokemuksiin.

Esityksessä pyritään arvioimaan suurten ydinlaitosprojektien sopimustyyppien sekä toteutuksen organisaatorakenteen erojen havaittuja ongelmia ja niiden arvioituja vaikutuksia hankkeiden aikatauluun ja kustannuksiin. Esimerkeissä ja niiden analyysissä pyritään tunnistamaan ongelmien lähteitä ja niiden yhteyttä valittuun sopimusrakenteeseen ja projektiorganisaatioon.

Esimerkkihankkeet

Tekstissä ilman projektien nimiä viitatus, ydinvoimalaitoksen rakentamiseen Suomeen tähänneet hankkeet ovat:

Tapaus 1 – vuosien 2003 ja 2023 välillä toteutettu projekti, joka viivästyi merkittävästi rakentamisluvan saamisen jälkeen. Laitosyksikkö käynnistyy vuonna 2023.

Tapaus 2 – vuosien 2015 ja 2022 välillä valmisteltu projekti viivästyi jo rakentamislupahakemusvaiheessa. Projekti lopetettiin omistajan päätöksellä vuonna 2022.

Tapaus 3 – vuosien 2008 ja 2010 välillä toteutettu ydinvoimalaitoshankkeen valmistelu projekti, joka päättyi valmisteluvaiheeseen. Vuonna 2010 valtioneuvosto ei myöntänyt hankkeelle periaatteellista hyväksyntää.

Kahdessa kolmesta esimerkihankkeesta valitun laitostoimittajan kanssa tehtiin kiinteähintainen sopimus suunnittelusta, hankinnasta ja rakentamisesta (EPC-sopimus: Engineering, Procurement, Construction). Ydinalan suurin toimija Suomessa, Fortum, oli osallisena omistajana tai insinööripalvelujen tarjoajana kaikissa näissä suuren ydinvoimalaitoksen Suomeen rakentamiseen tähänneissä hankkeissa.

Yleisiä havaintoja

Ydinlaitoksen tekniikaltaan erillisten osien hankinnan hallinta, esimerkiksi automaatio, hätädieselit ja polttoaineen vaihtokone, sekä laitteiden lupaprosessiin tarvittavan tiedon saanti on usein haastavaa projektin kokonaisuudesta vastaavalle laitostoimittajalle. Vaikeutta lisää se, että viranomaishyväksynnän vaatiman tiedon määrä vaihtelee merkittävästi maan mukaan. Maiden välillä on huomattavia eroja lupaprosessin eri vaiheissa vaaditussa suunnittelun kypsyyssasteessa.

Kaikissa sopimusmalleissa vaikeutena on vaadittavan kokonaisuosaamisen omaavan insinööritoimiston ja henkilöstön löytäminen sekä sopimus- ja toimituspakettien jakaminen, siten että niiden keskinäiset yhteydet on tunnistettu ja niiden vastuut on hallittu. Jos laitetaso

hankintavaatimusten tuottaminen jakautuu usealle toimittajalle, on vaadittavan osaamisen varmistaminen sekä suunnittelun ja vaatimusten yhtenäisyyden saavuttaminen erittäin haastavaa.

Tässä esityksessä perustellaan välttämättömyyttä rajata ja painottaa ydinlaitoksen rakentamisen aikana esitettäviä laitevaatimuksia ja laadunhallintaa turvallisuuden kannalta tärkeimpiin kohteisiin ja laitteisiin. Pitkän käyttöiän aikana tarkastettavat, ennakkohuollettavat ja helposti vaihdettavat laitteet ja rakenteet muodostavat rikkoutuessaan taloudellisen riskin laitoksen omistajalle, mutta eivät turvallisuusriskiä, jota olisi tarpeen laajalti ennakoita.

Määrävälein tarkastettavien laitteiden toimintakyky onnettomuuksissa varmistetaan syvyyssuuntaisen puolustuksen sisältämällä moninkertaisuus-, erilaisuus- ja erotusperiaatteilla. Periaatteiden riittävä toteutus varmennetaan oletettujen onnettomuuksien suunnitteluperusteilla analyyseillä ja riskianalyyseillä. Onnettomuuksien laajojen ympäristövaikutusten välttämiseksi kokonaan tehdään Suomen ydinlaitoksille myös laajoja suunnittelun laajennustapahtumien analyysejä ja vakavan reaktorionnettomuuden analyysejä.

Rakentamisluvan ajoitus

Suomessa on käytössä korostetun kaksivaiheinen viranomaisprosessi, joka jakautuu rakentamislupa- ja käyttöluvavaiheisiin. Nykyisin Suomessa vaadittu alustava turvallisuuseloste siihen liittyvine osineen vastaa laadultaan ja yksityiskohtiltaan monien muiden maiden säännösten vasta käyttöönottovaiheessa vaatimaa lopullisen turvallisuuselosteen vaatimustasoa. Vaadittu järjestelmäkuvausten sisältö ja laitetietojen ja laadunvalvonnan kuvauksen yksityiskohtaisuus edellyttää useilla suunnittelualueilla toimittajan valintaa sekä sitovaa hankintasopimusta järjestelmistä ja laitteista. Tämän hintavaikutus sopimukseen on huomattava.

Vaadittujen kuvausten laatiminen edellyttää myös järjestelmien arkkitehtuurin muuttumattomuutta (suunnittelun jäädytystä) sekä toimittajien tekniikan yhteensovitusta jo aikaisessa vaiheessa. Automaatiota ja elektroniikkaa sisältävien laitteiden osalta aikainen sopiminen ja ti-

laaminen voi johtaa laitteiden tekniseen vanhenemiseen jo ennen niiden käyttöönottoa laitoksella.

Aikanaan 1970-luvun lopun suomalaisissa ydinvoimalaitoshankkeissa käytössä oli sama kaksivaiheinen hyväksymisprosessi. Rakentamisen aikainen prosessi sisälsi kuitenkin jatkuvan ja joustavan järjestelmäineistojen hyväksymiskäsittelyn, joka noudatti koko projektin taseoisia jäädytysvaiheita. Suunnittelun ja hyväksynnän iteratiivisuutta pyrittiin välttämään.

Aikataulu ja suunnitteluaste

Suomen nykyisten viranomaisohjeiden sisältämää ja vaatimaa aikataulua esimerkiksi automaation järjestelmäsuunnittelun osalta ei ole mahdollista toteuttaa kuin olemassa olevaa ja käyvä ydinvoimalaitosta sellaisenaan kopioivassa projektissa. Toisaalta suomalaiset ohjeet sisältävät ydinlaitestandardista poikkeavia lisävaatimuksia, joten toimittajamaan vaatimusten ja yhden standardiperheen mukaan suunniteltu ydinvoimalaitos on suunniteltava uudelleen. Tämä uusintasuunnittelu on tehtävä pitkälle laitetasolle asti ennen rakentamisluvan saamista.

Maakohtaisen lisäsuunnittelun hinnan voi laitostoimittajan mukaan arvioida olevan luokkaa 1 000–2 000 miljoonaa euroa. Suunnittelun onnistuminen kerralla edellyttäisi järjestelmä- ja laitestandardien luetteloiden ja niiden viranomaisohjeiden kuvaamien soveltamistapojen pysyvän lähes muuttumattomina kuvassa 1 esitetyn 3–5 vuoden suunnitteluajaksi sekä sitä seuraavan 4–6 vuoden laitehankinnan ja rakentamisen ajan.

Esimerkkitapauksissa 1 ja 2 aikataulutusta oli toimittajan vastuulla ja Suomen viranomaisohjeet muuttuivat koko projektin ajan. Kummassakin tapauksessa rakentamisen aikataulua ei saatu vuosiin valmiiksi ja uudelleen suunnittelun määrä oli huomattava. Projektien viiveet olivat merkittäviä. Tapauksessa 3 viranomaisohjeiden esittämää aikataulutusta oli varauduttu muuttamaan ja korjaamaan tarjousvaiheen vaatimuslistan ja valitun toimittajan ja laitostyyppin mukaan tehdyn lisensiointisuunnitelman avulla. Ratkaisun hyväksyttävyyttä ja toimivuutta käytännössä jäi testaamatta.

Esityksessä käsiteltiin muun muassa seuraavia havaintoja mainittujen kolmen tapauksen osalta.

Tapaus 1, 2003–2023

Osa laitossopimuksen mainitsemista viranomaisohjeista oli luonnosvaiheessa sopimusta tehdessä ja niiden noudattamisen ratkaisut ja tulkinnan riskit jätettiin laitostoimittajalle. Ratkaisu oli kustannusten ja resurssien kannalta perusteltu, mutta aikataulun kannalta vaikea. Osa ratkaisuista tuotettiin rakentamislupavaiheessa, mutta laitostoimittaja ei noudattanut niissä hyväksytyjä periaatteita. Ohjeiden hyväksyttävyyttä tulkintoja myös muutettiin viranomaisen puolelta rakentamisen aikana.

Omistajan projektijohtolta puuttui käsitys ydinvoimalaitosprojektissa tarvittavista resursseista. Virheellisten konsulttineuvojen ja aiempien projektien kokemusten virheellisen analysoinnin vuoksi omistaja aliarvioi merkittävästi omat resurssitarpeensa. Arvio oli vain 25 % tarvittavasta ja toteutuneesta. Kuvassa 2 on esitetty arvio ydinvoimalaitoshankkeen



Kuva 1. Ydinvoimalaitoshankkeen turvallisuuselosteen hyväksymisen liittyminen suunnittelun ja rakentamisen aikatauluun IAEA:n mukaan [1].

eri vaiheissa tarvittavasta henkilöstön määrästä. Omistaja supisti edelleen resurssejaan lopettamalla kansallista osaamista ja projektiosaamista omaavien konsulttien käytön lähes kokonaan heti rakentamisluvan saamisen jälkeen. Toimittajan asiantuntijaresurssien puutteellisuus tunnistettiin jo rakentamisluvan hakuvaiheessa.

Ensimmäistä kertaa toteutettavan laitostyyppin turvallisuustoimintojen ja automaation toiminnallisen suunnittelun vaatimia resursseja ja aikaa ei ollut otettu oikein huomioon aikatauluissa. Myöskään operaattorien onnettomuustilanteissa tarvitsemien mitausten ja toimintojen suunnittelua ei ollut aikataulutettu oikein.

Nämä aiheuttivat useiden vuosien viiveen projektissa.

Suomen lainsäädännön (Ydinenergilaki 55 §) ainakin epäsuorasti edellyttämä ja hankinnoille tärkeä omistajan tekemä suunnittelun tarkastus rakentamisluvan saamisen jälkeen jäi pois vaiheistuksesta. Omistajan tarkastuksen supistuessa ja jäädessä alue- ja asiakirjakohdaksi Säteilyturvakeskuksen rooli varmentaa järjestelmäsuunnittelun ja esitettyjen laitevaatimusten olevan lupa-asiakirjojen ja hyväksytyin arkkitehtuurisuunnittelun mukaisia muodostui tarpeettoman suureksi.

Omistaja ja toimittaja eivät osanneet tuottaa yksityiskohtaisia lisensoinnin alasuunnitelmia, joissa viranomaisen tarvitsemat asiakirjat ja pakolliset todennusvaiheet laitteen valmistusprosessissa (hold points, witness points) olisi kuvattu toimittajille. Toimittajat ja alihankkijat olivat menettäneet osaamisensa ilman uusia ydinvoimaprojekteja. Laitetoimittajien toimituskykyä suomalaisilla vaatimuksilla ei saatu varmennettua ennen rakentamisluvan saantia. Myöhemmin suuri määrä laitos- ja laitemuutoksia ja laatuvaatimusten muuttuminen hankinnan aikana vaikeutti tuotteiden ja materiaalien jäljitettävyyttä ja viranomaishyväksyntää.

Tunnistamattomat erot hyväksytyissä viranomaisvaatimusten soveluksissa Suomen käyville laitoksilla johtivat väärinkäsityksiin ja sekaan- nuksiin asiakirjojen laadinnassa ja laitetason suunnittelussa ja laitteiden pätevoittamisessä.

Tunnettujen ydintekniikan standardien mukaisia suunnittelumenetelmiä vaadittiin soveltamaan uudella tavalla Suomen ydinvoimalaitoshankkeissa. Viranomaisvaatimusten soveltamista laajennettiin rakentamisen aikana, jonka vuoksi luokiteltujen laitteiden (mm. turvallisuusluokka 3 ja maanjäristysluokka 2A) sekä niille kirjattujen vaatimusten määrä oli korkea. Mahdollisuutta hyväksyä turvallisuusluokiteltuja, koeteltuja komponentteja muun teollisuuden standardeilla ei ollut.

Tapaus 2, 2015–2022

Solmittu laitossopimus sisälsi monia tärkeydeltään arvioimattomia ja keskenään ristiriidassa olevia vaatimuksia. Viranomaisen myös muutti ohjeitaan ja niiden tulkintaa koko suunnittelun ajan, jolloin laitossopimuksen vaatimukset eivät voineet olla kaikilta osin voimassa.

Viranomaisohjeista poikkeaminen laitossuunnittelussa vaadittiin selvittämään ja perustelemaan kaikissa tilanteissa, vaikka osaa uusista viranomaisohjeiden vaatimuksista ei voi soveltaa sellaisenaan missään hankkeessa tai niiden soveltaminen on erittäin kallista.



Kuva 2. Uuden ydinvoimalaitoksen tarvitsema henkilöstö eri vaiheissa. Sininen osa "Priority 1 staffing" vastaa arvioitua pysyvää yksikkökohtaista henkilöstöä laitospaikalle, jossa on jo aiempia laitosyksiköitä. Maakohtaiset olosuhteet ja omistajan toimintamallit vaikuttavat määrään [2]. (FCD = First Concrete Date, ensimmäinen betonivalu).

Suunnitelma lisensointi-asiakirjojen keskinäisistä suhteista ja niiden suunnitelluista aikatauluista ei ollut kestävä ja viranomaiselle rakentamislupavaiheessa toimitettavien asiakirjojen määrä kasvoi aivan liian suureksi.

Omistajan projektijohtamisessa oli puutteita ja projekti oli organisoitu virheellisesti:

Omistajan organisaatio oli rakennettu tarvittavan käyttöorganisaation perusteella, jolloin suuri osa omistajan organisaatiosta ei keskittynyt rakentamisluvan saamiseen. Tämä oli hämmästyttävää, koska vertaamalla julkisista lähteistä saatavaan tietoon Aasian vastaavista ydinvoimalaitoshankkeista on helppo huomata ero. Noissa hankkeissa toimittajan ja omistajan muodostama yhteinen projektin organisaatio suuntaa toimintansa aina meneillään olevan vaiheen mukaan: luvan hakeminen, laitehankinta tai rakentaminen.

Omistaja korosti tarkastuksensa ja toimintansa riippumattomuutta laitostoimittajan ja oman laitoksensa turvallisuusratkaisuista. Tämä ajatus johtaa kansainvälisten säännösten ja Suomen ydinenergilain omistajalta edellyttämän ydinturvallisuutta koskevan ja jakamattoman vastuun, siis muun muassa päätöksenteon ja resurssien hallinnan vastuun, katoamiseen.

Rakentamislupaprosessin kuvaus oli aivan projektin loppuvaiheisiin asti selvästi alle tapauksen 1 rakentamislupavaiheen tason, vaikka viranomaisen vaatimukset olivat huomattavasti kasvaneet. Lupaprosessin kuvausta ei noudatettu kaikissa organisaatioissa. Lisensointiaineistojen rinnalla suunnittelussa käytettiin muita vastaavia aineistoja.

Suunnittelussa oli käytössä useita standardiperheitä, joita ei ollut sovitettu toisiinsa. Omistajalta sekä toimittajalta puuttui asiantuntemusta suomalaisten ohjeiden lisävaatimuksien soveltamisesta valittujen standardien sisältämiin valmiisiin prosesseihin järjestelmä- ja laitetason hyväksynnässä.

Laitehankintojen spesifikaatioiden teko ja viranomaisen todennusvaiheiden ajoitus laitteen valmistusprosessissa pyrittiin siirtämään valittaville laitetuottajille.

Tapaus 3, 2008–2010

Projektin valmistelussa tehty hankkeelle optimaalisten sopimus- ja organisaatiomallien sekä kustannusten ja riskien arviointi tuotti tuloksena täysin erilaiset sopimus- ja organisaatiomallit kuin tapauksissa 1 ja 2 käytetyt. Tapauksessa 3 hanketta valmistellut omistajan projektitiimi ja

käytetyt konsultit olivat kokoneempia kuin tapauksen 1 ja 2 tiimit. Seuraavassa muutamia esimerkkejä omistajan toimintamallien valmistelusta:

Toimittajien riskivarausten ja aikatauluriskin vuoksi viranomais- hyväksynnän ja lupakäsittelyn vyöryttäminen laitostoimittajalle ja laitevalmistajille arvioitiin kannattamattomaksi. Myös alihankkijoiden sopimusmallit olisivat muodostuneet erilaisiksi kuin tapauksissa 1 ja 2.

Valmisteltujen sopimusmallien todettiin edellyttävän omistajan vahvoja suunnitteluresursseja ja tarvittavien lisäresurssien hankkimista.

Table 1: Construction costs of recent FOAK Gen-III/III+I projects

Type	Country	Unit	Construction start	Initial announced construction time	Ex-post construction time	Power (MW _e)	Initial announced budget (USD/kW _e)	Ex-post construction cost (USD/kW _e)
AP 1000	China	Sanmen 1, 2	2009	5	9	2 x 1 000	2 044	3 154
	United States	Vogtle 3, 4	2013	4	8/9*	2 x 1 117	4 300	8 600
APR 1400	Korea	Shin Kori 3, 4	2012	5	8/10	2 x 1 340	1 828	2 410
EPR	Finland	Olkiluoto 3	2005	5	16*	1 x 1 630	2 020	>5 723
	France	Flamanville 3	2007	5	15*	1 x 1 600	1 886	8 620
	China	Taishan 1, 2	2009	4.5	9	2 x 1 660	1 960	3 222
VVER 1200	Russia	Novovoronezh II-1 & 2	2008	4	8/10	2 x 1 114	2 244	**

* Estimate. ** No data available.

Notes: MW_e = megawatt electrical capacity, kW_e = kilowatt electrical capacity.

Source: NEA analysis based on publicly available information.

Kuva 3. Laitoshankkeiden suunnitellut ja toteutuneet aikataulut ja kustannukset [3].

Laitoshankkeiden kustannusten kehitys

Ydinvoimalaitoksen hintaan vaikuttavien tekijöiden analyysin lisäksi esitys sisälsi julkisiin lähteisiin perustuvia tietoja laitos-hankkeiden kustannusten kehityksestä viime vuosina. Kuvassa 3 on esitetty muutamien 2000-luvun laitos-hankkeiden toteutuneita rakentamiskustannuksia ja -aikoja verrattuna alkuperäisiin arvioihin. Olkiluoto 3 saadaan tuotantokäyttöön vuonna 2023 ja Flamanville 3 -yksikön tuotantokäytön on nyt arvioitu alkavan vuonna 2025.

Esityksessä tehtiin myös joitakin ehdotuksia, joiden tarkoituksena on parantaa mahdollisuuksia sarjavalmistamisen ja modulaaristen pienien tai suurten suomalaisten ydinvoimalaitosten kannattavaan rakentamiseen tulevaisuudessa. Seuraavissa kappaleissa on esitetty näitä aiempaan osuuteen perustuvia suosituksia ja ehdotuksia.

Suunnittelun jäädytystasot

Suomessa rakentamislupavaiheeseen nykyisin vaadittu järjestelmäsuunnittelun suunnittelutaso ulottuu jo perinteiseen laitesuunnitteluun ja tämä suunnittelu joudutaan tekemään ilman viranomaisen lopullisesti hyväksymää arkkitehtuuria. Tällöin omistajan/toimittajan taloudellinen riski ja aikatauluriski sekä laitetoimitusten riskit ovat huomattavia. Suunnittelun arkkitehtuuritason hyväksyminen ja kiinnittäminen muuttumattomaksi ja samalle yksityiskohtien tasolle (jäädyttäminen) kaikilla laitostekniikan osa-alueilla ennen lopullista järjestelmäsuunnittelua on välttämätön vaihe. Laitostekniikan osa-alueita ovat muun muassa rakennukset, prosessi-, automaatio- ja sähköjärjestelmät sekä ilmastointi-, palo- ja säteilysuojelujärjestelmät ja turvajärjestelyt.

Yksityiskohtaisen suunnittelun ja sen kustannusten moninkertaistuminen välttämiseksi suunnittelu- ja lupaprosessin viranomais- hyväksyntä on jaettava kolmeen hyväksyntätasoon:

1. suunnittelun arkkitehtoninen taso,
2. järjestelmäsuunnittelutaso ja vaativien laitepaikkojen vaatimukset,
3. laitteiden käytön suunnittelu ja hankintavaatimukset laitteille.

Kaikki vaaditut kansalliset muutokset suunnitteluratkaisuissa ja laadustandardeissa pudottavat merkittävästi suunnitteluastetta ja vaativat pitkän suunnitteluvaiheen ennen rakentamista. Standardeista poikkeava-

vat ja maakohtaiset lisävaatimukset hankinta- ja rakentamisvaiheessa käytännössä estävät korkean ”valmiiksi” saavutetun suunnitteluasteen. Tällä perusteella myös ensimmäistä kertaa toteutettavien laitostyyppien hankkeissa rakentamislupa olisi voitava myöntää noin 50 % suunnittelukypsyydellä ja jäädytystasolla lopullisesta yksityiskohtaisesta tasosta.

Turvallisuusluokitus

Turvallisuusluokituksen tarkoitus on painottaa/suunnata laadun ja turvallisuuden varmennuksen resurssit kokonaisuuden kannalta tärkeimpiin kohteisiin. Laadunhallintajärjestelmät käyttävät turvallisuusluokkia ohjaamaan ja määrittelemään vaatimuksia, tuotettavien asiakirjojen sisältöä ja tarvittavaa laadunvalvontaa ja viranomais- hyväksyntää. Turvallisuusluokitus ohjaa valittavien standardien ja toimintamallien kautta suunnitteluun, hankintaan ja valmistukseen käytettäviä resursseja ja menettelyjä sekä monia muita vaatimusluokituksia ja hyväksytävien suunnittelustandardien laatua. Turvallisuusluokan perusteella valitaan laitteiden/palveluiden toimittaja, joka kykenee täyttämään kaikki kyseisen luokan laitteen tai palvelun laadunhallinnan vaatimukset. Määriteltyä laadunhallinnan tasoa noudattavat kaikki projektin osallistajat. Suomalaisissa hankkeissa valittujen laitteiden turvallisuusluokituksen muutokset ovat aiheuttaneet kustannuksia ja viiveitä.

Alkuperäinen suomalainen 1980-luvun hyväksyntäprosessi, jossa ehdotus suunnittelun arkkitehtuuritason luokitusasiakirjaksi lähetetään viranomais- hyväksyntään rakentamislupavaiheessa, on syytä säilyttää ja selkiyttää. Tämä asiakirja sisältää kaikkien järjestelmien lopullisen luokituksen sekä onnettomuusolosuhteita vaativien laitepaikkojen luettelot. Järjestelmäkohtaisessa suunnittelun hyväksymisvaiheessa määritellään laitepaikkojen turvallisuusluokitus ja niille sijoitettavien laitteiden ja niiden osien turvallisuusluokitus. Ydinvoimalaitoksen käsittäessä noin miljoona erikseen hankittavaa ja turvallisuus- ja vaatimusluokiteltavaa laitetta on tarkka suunnittelun vaiheistus ja luokituksen jäädytys laitehankintaa varten välttämätöntä.

Viranomaisohjeiden laadinta ja hakemuksen käsittely

Ydinvoimalaitoksia koskevien viranomaisohjeiden laadinta erotetaan STUKin toiminnasta. Ohjeiden uudistamiseen perustetaan erilliset asi-

antuntijatyöryhmät, joissa on vain 1–2 STUKin henkilöä kussakin työryhmässä. STUK hyväksyy työryhmien ehdotukset tai esittää niihin perusteltuja muutosehdotuksia, jotka käsitellään erillisessä ylätason työryhmässä. Voimayhtiöiltä pyydetään lausunnot ohjeesta ja STUKin muutosehdotuksista. Tavoitteena on riittävään asiantuntemukseen perustuva ja läpinäkyvä prosessi ohjeiden laatimiseen.

Ydinlaitoksen rakentamislupavaiheen asiakirjojen STUKin tarkastusaika kiinnitetään yhden vuoden tasolle. Rakentamisluvan myöntämisen jälkeen seuraa 1–2 vuoden vaihe, jossa omistaja hankkii laitostoimittajalta ja tärkeimmiltä toimittajilta tarvittavat suunnitteluasiakirjat ja laitespesifikaatiot. Omistaja varmentaa erillisellä kaikki tekniikan osa-alueet kattavalla ja niitä tarkemmin vaiheistavalla tarkastuksella suunnittelun tulosasiakirjojen vastaavuuden hyväksytyihin lupa-asiakirjoihin ja STUKin luvan myöntämisen yhteydessä esittämiin vaatimuksiin. Yhä kaksivaiheisessa lupaprosessissa on välitarkastelupiste, jossa STUK hyväksyy omistajan tarkastusvaiheen tulokset, järjestelmien ja laitteiden spesifikaatiot. Näin kaikki sitoutuvat hankkeen lopulliseen kokonaisaikatauluun ja vaiheistukseen.

Ydinalan standardien soveltaminen ja ensimmäistä kertaa toteutettavat laitokset

Käytettäessä laitoksen suunnittelussa useampaa kuin yhtä ydintekniikan alueen standardiperhettä (KTA, ASME, IEC, IEEE, ...) ja yhdistettäessä EU:n alueen rakentamiseen ja laitetekniikkaan liittyviä standardeja laaditaan laitokselle ensin laaja lisensointisuunnitelma ja alasuunnitelmat, jotka kuvaavat nämä menettelyt. Suunnitelman käsittelyn ja hyväksynnän yhteydessä STUK esittää, miten kansallisten ohjeiden lisävaatimuksia sovelletaan standardien ohella järjestelmä- ja laitetason hyväksynnöissä. Hyväksytyt lisensoinnin alasuunnitelmat ja esitetty standardien soveltaminen sitoo jatkossa kaikkia, myös STUKia itseään.

Monet suunnitelluista SMR-laitostyypeistä sisältävät paljon ensimmäistä kertaa sovellettavaa tekniikkaa ja materiaaleja. Tällaisten jär-

jestelmien perustelujen sisällön sekä hyväksyntään tarvittavien tyyppikokeiden laajuuden ja toteutuksen tieteellistä määrittelyä varten perustetaan kansallinen työryhmä. STUKin rooli tässä työssä rajataan kokeiden tulosten tarkastukseen. Näin viranomaisen riippumaton rooli ei vaarannu, resurssit riittävät ja uusilta ratkaisulta vaadittavien kokeiden sisältö saadaan turvallisuusperustelun edellyttämälle tasolle.

Yleisöpalautetta

ATS:n tilaisuuden jälkeen esitetyissä kommentteissa painotettiin kiinteähintaisen EPC-sopimuksen olleen jopa välttämätön rahoituksen saamiselle esimerkkitapauksina olleiden projektien kohdalla. Kommenteista voi nostaa esiin myös sen, että Suomessa ei ole ydinvoimasuunnitteluun ja -rakentamiseen keskittyviä organisaatioita. Tämän vuoksi suomalaisen osaamisen ja kokemusten hyödyntämistä pitää jatkossa täydentää muualta saatavalla toteutuneiden ydinvoimaprojektien kokemuksilla ja koetelluilla malleilla.

Useat kommentoijat arvioivat kaksivaiheisen viranomaishyväksynnän liiallisen korostamisen olevan yksi syy projektien ongelmiin ja pitivät 1970-luvun järjestelmäsuunnittelun erillistä roolia painottavaa rakentamisprosessia yhä käyttökelpoisena. Esityksissä olisi yhden kommentoijan mielestä pitänyt käsitellä laitostoimittajan toimien, päätösten ja projektin rahoituksen riippuvuutta toimittajamaan kansallisesta ja poliittisesta intressistä. Tämä olisi kommentoijan mielestä rajoitettavissa vain kasvattamalla omistajan roolia hankkeessa ja ottamalla mahdollisuus vakavasti huomioon jo laitostoimittajan valinnassa. Kommenteissa kaivattiin myös arviointia uusien ydinlaitosten sijoituspaikkakuntien valinnan ja hyväksynnän edellyttämistä lisäprosesseista.

Kirjoittaja on toiminut ydinvoimalaitosten turvallisuussuunnittelun ja ulkomaille suunnattujen konsultointiprojektien johdon sekä käytön tuen avaintehtävissä viidellä vuosikymmenellä. Tällä vuosituhanella kirjoittaja on osallistunut mm. Olkiluoto 3, Loviisa 3, Olkiluoto 4 ja Hanhikivi 1 -hankkeisiin.

Viitteet

- [1] Project Management in Nuclear Power Plant Construction: Guidelines and Experience, IAEA, NP-T-2.7, 2012
- [2] Roadmap to Operational Readiness, WANO, R2OR, June 2020
- [3] Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders, OECD-NEA 2020, No. 7530

Kirjoittaja



DI Olli Nevander

Nuclear safety and project managing expert
 olli480@hotmail.com

Kuka murhasi ydinvoiman, ja miten?

Janne M. Korhonen
Kalevi Sorsa -säätiö

Ydinvoiman rakentamisen hiipuminen 1980-luvulla on hyvin tunnettu ilmiö. Ilmiön syistä käydään kuitenkin edelleen kiivasta väittelyä, etenkin sosiaalisessa mediassa. Esitän tässä artikkelissa, että ydinvoiman odotettua heikompi kilpailukyky, ennustettua hitaampi sähkönkulutuksen kasvu ja sähkömarkkinoiden vapauttaminen (deregulaatio) olivat yhdessä tärkeimmät syyt rakentamisen hidastumiseen ja likimain loppumiseen. Ydinvoiman vastustajien vaikutus olisi jäänyt mitä todennäköisimmin vähäiseksi, jos ydinvoima olisi koettu välttämättömäksi esimerkiksi maiden taloudelliselle kilpailukyvyille.

The decline in nuclear power construction in the 1980s is a well-known phenomenon. However, the reasons for this phenomenon are still hotly debated, especially on social media. In this article, I argue that the lower than expected competitiveness of nuclear power, the slower than expected growth in electricity consumption and the deregulation of the electricity market were together the main reasons for the slowdown and virtual end of construction. The influence of the anti-nuclear lobby would most likely have been limited if nuclear power had been perceived as indispensable, for example, for the economic competitiveness of countries.

Ilmastokriisin edetessä ja sähkön hintojen noustua Venäjän kiristysyritysten vuoksi huippulukemiin on kuultu yhä useammin puheenvuoroja, joissa valitellaan ydinvoimarakentamisen hiipumista 1980- ja 1990-luvuilla ja väitetään, että ilmastokriisi olisi jopa voitu estää, jos vain ”vihreät” eivät olisi vastustaneet ydinvoimaa sinnikkäästi. Toisissa tarinoissa ydinvoimarakentamisen kerrotaan hyytyneen sääntelyn tiukentumiseen, hitaisiin lupaprosesseihin, tai jopa Neuvostoliiton ja sittemmin Venäjän myyräntyöhön kaasun kysynnän lisäämiseksi.

Nämä selitykset ovat vetoavia ja leviävät sosiaalisessa mediassa laajalle. Ne ovat myös yksinkertaisia, ja niissä on selkeitä syyllisiä. Mutta miten paljon selityksissä on perää? Kun ydinvoiman suosio niin poliitikkojen kuin kansankin keskuudessa on nyt ennätyslukemissa, ja koska ydinvoimalla voisi edelleen olla paljon annettavaa vähähiilisen, kestäväen energijärjestelmän osasena, vastauksilla on väliä. Historiallisista virheistä voidaan oppia, mutta vain jos johtopäätökset ovat perusteltuja. Kuka siis murhasi ydinvoiman, ja miten?

Tämän lyhyen esityksen tarkoitus ei ole tarjota täydellistä kokonaiskuvaa kaikista syistä, miksi ydinvoimarakentaminen aikanaan hiipui. Kymmenien eri maiden ja yritysten tekemien päätösten taustalle mahtuu monia tekijöitä, joista yksi – mutta vain yksi – oli ydinvoiman lisääntynyt vastustus. Tarkoitukseni on antaa yleiskuva syistä, joiden uskon selittävän suuremman osan ydinvoiman kompasteluista kuin mitkään muut yksittäiset tekijät. Lyhyesti sanottuna, tulen esittämään todisteet, joiden mukaan ydinvoiman murhasi sen hinta suhteessa halpoiniin fossiilisiin polttoaineisiin, ja kuoliniskun antoi sähkömarkkinoiden vapauttaminen.

Monopolistin oli helppo hymyillä

Ydinvoiman piti joskus korvata fossiiliset polttoaineet jopa kokonaan. Vaikka ensimmäiset kaupallisessa käytössä olleet ydinvoimalat ovat peräisin jo 1950-luvulta, ydinvoiman kulta-aika alkoi vuoden 1973 öljykriisistä ja sen aiheuttamasta halusta vähentää riippuvuutta ulkomaisista polttoaineista. Vuoden 2023 alussa kaupallisessa käytössä olleista 423 reaktorista peräti 43 prosenttia (184) on otettu käyttöön vuosien 1976 ja 1986 välisenä kymmenvuotiskautena (Kuva 1). Vaikka osa näistä reaktoreista oli päätetty rakentaa jo ennen öljykriisiä, kriisin vaikutus ydinvoimasuunnitelmien kunnianhimoon ja kiireeseen oli selvä. Nimenomaan öljykriisi selittää niin Ranskan kuin Etelä-Korean kunnianhimoiset ydinenergiaohjelmat, ja Suomessakin kriisi vauhditti ydinvoiman käyttöönottoa.

Uusien reaktoreiden rakentaminen alkoi kuitenkin hidastua jo varsin pian. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ei avattu vuosien 1979 ja 2009 välillä yhtään uutta ydinvoimatyömaata. Rakentamisen hidastumisen syynä pidetään usein Three Mile Islandin onnettomuutta Yhdysvalloissa vuonna 1979 ja Tshernobylin onnettomuutta vuonna 1986, ja näistä onnettomuuksista vauhtia saanut ydinvoiman vastaista ympäristöliikettä. Rakentamisen huippu oli kuitenkin takanapäin jo ennen Tshernobyliä, ja kuten tulemme myöhemmin huomaamaan, myös Three Mile Islandin vaikutus oli loppujen lopuksi vähäinen. Miksi rakentaminen sitten hidastui?

Syiden ymmärtämiseksi on syytä kerrata lyhyesti sähköntuotannon kustannusrakenne ja 1980-luvulle saakka sähkömarkkinoilla vallinnut

Kuva 1. Vuoden 2023 alussa käytössä olevat ydinreaktorit käyttöönottovuoden mukaan ja ydinsähkön tuotanto. Lähteenä IAEA:n PRIS-tietokanta ja Our World in Data/BP.

tilanne. Sähkön tuotannon tekniikat voitiin tuolloin jakaa melko yksinkertaisesti investointikustannuksiltaan melko pieniin ja nopeasti rakennettaviin, mutta kalliita polttoaineita tarvitseviin polttovoimalaituksiin, ja investointikustannuksiltaan suuriin ja hitaasti valmistuviin, mutta polttoainekustannuksiltaan edulliseen vesijä ydinvoimaan. Kun vesivoiman lisärakentamiselle suotuisat joet lopuivat useimmissa teollisuusmaissa viimeistään 1970-luvulla, ydinvoima jäi käytännössä ainoaksi laajemmassa mittakaavassa edes teoriassa rakennettavissa olevaksi fossiilisten energianlähteiden vaihtoehdoksi.

Ydinvoiman kustannusrakenne suosi vahvasti suuria, vakavaraisia, pitkällä tähtäimellä sijoitettavia sähkön tuottajia. Tarvitavat investoinnit olivat huomattavan suuria jo 1960-luvulla, ja tuottoa sijoituksille voitiin odottaa vasta vuosien kuluttua. Valmistuneen voimalan voitiin kuitenkin odottaa tuottavan edullista sähköä hyvinkin 40 vuoden ajan, jolloin suurikin investointi olisi tullut kuoletettua. Jos voimalan tuottamalle sähkölle olisi vain ostajia, myös uuteen, koetlemattomaan tekniikkaan kannatti sijoittaa.

Sijoittamispäätös oli erityisen helppo, jos sähkön tuottajalla oli alueellaan monopoli sähkön myyntiin. Monopoli tai sitä muistuttava tilanne oli normaali lähes kaikissa maissa aina 1980-luvun alkuun saakka. Monopoliolosuhteissa olleen sähköyhtiön riskit olivat pienet. Vaikka uudet hankkeet eivät olisi menneet aivan putkeen, kustannusylitykset oli ainakin teoriassa vaivatonta siirtää kuluttajien sähkölaskuun: heillä kun ei ollut vaihtoehtoja.

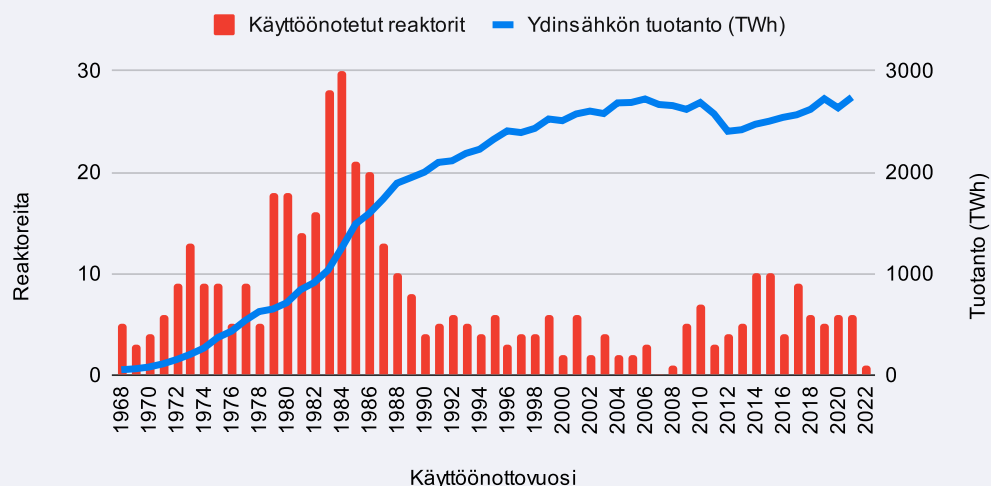
Vaikka monopoleja säänneltiin useimmissa maissa tiukasti, eikä kustannusten siirtäminen kuluttajille ollut käytännössä aina aivan helppoa, ainoan sähkön tuottajan päästäminen konkurssiin ei yleensä ollut vaihtoehto. Kuten tavallista, toimijat, jotka olivat liian suuria kaatumaan, otivat riskejä huolettomammin. Kun ydinvoimarakentaminen alkoi toden teolla 1960-luvun lopussa, sähköyhtiöt ympäri maailmaa laativat innolla suunnitelmia uuteen energianlähteeseen siirtymiseksi. Suomessakin käytiin keskusteluja, pitäisikö 1990-luvun energiahuolto (ei vain sähköhuolto) järjestää rakentamalla muutamia suuria ydinvoimakomplekseja vai useampia pienempiä. Vaihtoehtoja ydinvoimalle ei välttämättä edes vaivauduttu käsittelemään.

Diskonttokorko iskee jälleen

Vuoden 1973 öljykriisi ja sen laukaisema korkea inflaatio ja taantumien aika heittivät kuitenkin kapuloita rattaisiin. Vaikka äkkipäätä voisi kuvitella, että öljyntuottajamaiden boikotista käynnistynyt, nimenomaan fossiilisten polttoaineiden hintaa railakkaasti nostanut energiakriisi olisi antanut ydinvoimalle mitä parhaimman tilaisuuden, todellisuus oli monimutkaisempi. Ydinvoiman houkuttelevuus kasvoi kyllä merkittävästi,

Maailman ydinvoiman ikä ja ydinsähkön tuotanto (2023)

Lähde: IAEA, PRIS-tietokanta; Our World in Data/BP



ja lähes kaikissa teollisuusmaissa tehtiin entistäkin kunnianhimoisia suunnitelmia fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi ydinvoimalla jopa kokonaan.

Öljykriisi kuitenkin laukaisi öljystä riippuvaisissa teollisuusmaissa myös nopean inflaation ja vakavan taantumien. Yhtenä seurauksena oli 1960-luvulla nopeasti kasvaneen sähkönkulutuksen kasvun hidastuminen, joka kääntymisen laskuun. Toisena seurauksena oli korkojen nousu. Suurissa teollisuusmaissa korot olivat olleet 1970-luvun alussa 7–8 prosentin tuntumassa. 1980-luvun alun Yhdysvalloissa lainoilla saatettiin vaatia korkoa jopa 19 prosenttia.

Korkojen nousu on aina myrkyä pääomaintensiivisille hankkeille – kuten ydinvoimalle. Vaikka ydinvoiman rakentaminen olisi sujunut tarkalleen 1960-luvun optimistisimpien lupausten mukaisesti, voimaloiden ja niiden tuottaman sähkön hinta olisi noussut selvästi. Kuva 2 havainnollistaa kustannusten nousua korkokannan (diskonttokoron) funktiona Yhdysvalloissa lähteen [1] perusteella. Harmaat viivat kuvaavat sähkön tuotantokustannuksia (LCOE = levelized cost of electricity) Yhdysvaltojen ydinvoimabuumin alkuvuosina 1966–67 ennustettujen ja toteutuneiden rakentamiskustannusten mukaan; mustat viivat kuvaavat kymmenen vuotta myöhemmin ennustettuja ja toteutuneita kustannuksia.

Jopa vuonna 1966 ennustetuilla hinnoilla diskonttokoron nousu monopolyhtiöiden yleisesti käyttämästä noin 3-5 prosentista jopa 12 prosenttiin olisi kasvattanut kustannuksia selvästi [2, s. 209]. Kuten toisinaan on todettu: diskonttokorko on yksi maailmaan eniten vaikuttavista mutta vähiten yleisesti ymmärretyistä muuttajista.

Kun samaan aikaan osoittautui, että optimistiset arvot hinnasta ja rakennusaikatauluista eivät pitäneet paikkaansa, hinnat moninkertaisuivat. Pääomaintensiivisissä hankkeissa lipsuminen aikataulussa näkyy hyvin nopeasti myös hyppäyksenä hinnassa. Esimerkiksi vuosina 1966–67 aloitettujen voimaloiden rakentamiskustannuksiksi arvioitiin etukäteen keskimäärin 612 dollaria per kilowatti sähkötehoa. Todellinen kustannus oli kuitenkin keskimäärin 1279 dollaria. Vuosina 1976-77 aloitettujen voimaloiden arvioidut 1630 dollarin kustannukset nousivat peräti 4377 dollariin (lukumat vuoden 2006 dollareita) [1]. Taantuma ja öljykriisin aiheuttama epävarmuus tulevasta tekivät pitkän tähtäimen sijoituksista ylipäätään vähemmän houkuttelevia. Kun edes sähkönkulutuksen tulevaisuudesta ei ollut tietoa, suurista hankkeista tuli vaikeammin perusteltavia.

Kuva 2. Korkokannan vaikutus ydinsähkön arviointeihin tuotantokustannuksiin Yhdysvalloissa, vuosina 1966–67 ja 1976–77 aloitettujen voimaloiden arviotujen ja toteutuneiden rakentamiskustannusten mukaan.

Fossiilisista tulikin halpoja, kulutus ei kasvanutkaan

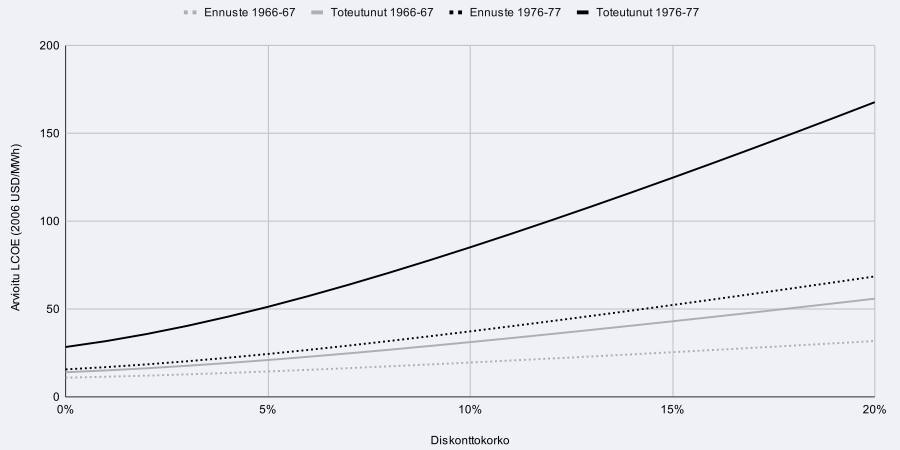
Kustannuslylytykset ja viivästykset varhaisissa projekteissa olisi varmasti voitu sietää uudesta tekniikasta maksettavina väistämättöminä oppirahoina, jos ydinvoimalle ei olisi ollut vaihtoehtoja. Näin ei kuitenkaan ollut. Fossiilivoimaloiden tekniikka kehittyi aiempaa tehokkaammaksi, ja vielä 1970-luvun lopulla vallinneet oletukset fossiilisten polttoaineiden hinnan pysyvistä noususta osoittautuivat vääriksi (Kuva 3) [2]. 1980-luvulla etenkin polttoöljyn ja maakaasun hinnat suorastaan romahtivat, ja myös kivihiilen hinta painui alaspäin, joskin hitaammin.

Kuten Kansainvälisen energiajärjestön raportissa todettiin vuonna 1998, menneen vuosikymmenen aikana globalisaation eteneminen oli parantanut merkittävästi etenkin hiilen saatavuutta, eikä hiilen hinta enää seurailut öljyn hintaa [2]. Vielä 1980-luvun alussa tehdyissä ennusteissa eri energialähteiden tuotantokustannuksista oli oletettu toisin. Niissä oli uskottu hiilen hinnan nousevan nopeasti [2, s. 166].

Kun myös ennusteet sähkönkulutuksen kasvusta paljastuivat suurelta osin yliarvioituiksi, ydinvoimaprojekteille oli entistä vaikeampi löytää kiinnostuneita maksajia. Hyvän kuvan vielä 1970-luvulla yleisten oletusten ja todellisen kehityksen välille auenneesta ammottavasta kuilusta saa vuonna 1976 tehdystä ennusteesta Länsi-Saksan primäärienergian kulutuksesta (Kuva 4) [3]. Ydinvoiman valtavat kasvuennusteet

Ydinsähkön tuotantokustannus (LCOE) Yhdysvaltojen ennustetuilla ja toteutuneilla rakentamiskustannuksilla

Lähde: CBO (2008, s. 7), omat laskelmat. Hinnat vuoden 2006 dollareina.



perustuivat suurelta osin käsitykseen, jonka mukaan 1960-luvun vauhdikas energiankulutuksen kasvu jatkuisi vielä vuosikymmeniä. Todellisuudessa esimerkiksi yhdistyneen Saksan primäärienergiankulutus vuonna 2021 oli pienempi kuin Länsi-Saksan kulutus yksin oli vuonna 1990 – ja jälkimmäinenkin oli paljon alle sen, mitä ennusteissa oletettiin.

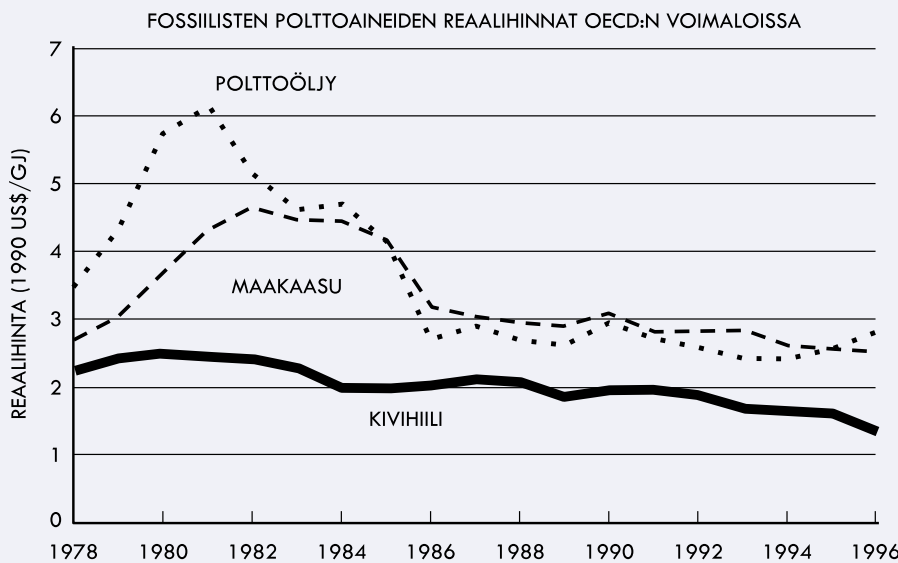
Säätelyn kiristyminen ja ydinvoiman vastustajat vaikuttivat, mutta paljonko?

Tarina on suorastaan hämmästyttävän samanlainen kaikissa ydinvoimaa rakentaneissa maissa. Ydinvoimarakentamisen hidastumisen juurisyy oli lyhyesti ja yksinkertaisesti sanoen hinta, yhdistettynä epävarmuuteen tulevasta. Ydinvoimabuumin alkuvuosina 1960-luvun lopussa

tehdyt arviot ydinvoimaloiden rakentamiskustannuksista ja -ajoista osoittautuivat kerta toisensa jälkeen ylioptimistisiksi, eivätkä vain vähän. Hinnan kaksinkertaistuminen oli tavallista, ja eräät projektit maksoivat jopa kymmenen kertaa suunniteltua enemmän [1, 4].

Säätelyn ja turvallisuusvaatimusten kiristymisellä oli tietenkin oma vaikutuksensa hintoihin. Vaikutus olisi todennäköisesti jäänyt vähäisemmäksi, mikäli ydinvoimaa olisi ryhdytty rakentamaan rauhallisemmin. Useammassa tutkimuksessa on osoitettu, että rakentamisen aloittaminen ennen voimaloiden suunnittelun valmistumista oli yksi merkittävimmistä kustannuslylytyksiin johtaneista tekijöistä [5]. Ydinvoimabuumin alkuvaiheissa reaktoreita saatettiin ryhtyä rakentamaan, kun suunnitelmista oli valmiina vasta 10 prosenttia [6].

Kuva 3. Fossiilisista polttoaineista maksetut reaali hinnat OECD-maiden voimaloissa 1978–1996 [2].



Lähde: IEA/OECD (1998), Figure A5-1, s. 159

Säätelyn kiristyminen oli ainakin Yhdysvalloissa ydinvoiman kustannuslylysten tärkein yksittäinen syy [5, s. 61]. On kuitenkin epäselvää, paljonko säätelystä oli ”turhaa”. Kuten Kuva 2 näyttää, diskonttokoron vaikutus jää edelleen merkittäväksi. Pääosin ennen säätelyn kiristymistä valmistuneiden, 1966–67 aloitettujen voimaloiden sähköntuotannon arvioiduksi kustannukseksi saadaan esimerkiksi 5 prosentin korkotasolla noin 21 dollaria/MWh, kun taas säätelyn kiristymisen jälkeen valmistuneiden, 1976–77 aloitettujen voimaloiden vastaavat kustannukset ovat noin 51 dollaria/MWh. Jälkimmäisten laskennalliset kustannukset korkotason ollessa 10 prosenttia ovat jo 85 dollaria. Todellisuudessa vaaditut korot ovat olleet korkeampiakin. Toisin sanoen korkokannan vaikutus säätelyn kiristymisen jälkeen aloitettujen voimaloiden laskennalliseen tuotantokustannukseen on selvästi suurempi kuin rakentamiskustannusten kasvun vaikutus yhteensä. Vähintäänkin suurin osa säätelyn kiristymisestä oli varmasti hyvin perusteltua.

Ydinvoiman vastustuksen vaikutusta voi arvioida karkeasti mutta hyödyllisesti myös ydinvoiman rahoitukselta vaadittavasta erityisestä riskipreemiosta. Usein esitetyn arvion mukaan poliittinen riski saa ydinvoimaprojekteja rahoittavat vaatimaan rahoituksesta yhteensä 2-3 prosenttiyksikköä muita energia-alan hankkeita suuremman koron [7]. Arvio ei todennäköisesti ole yleispätevä, sillä esimerkiksi Teollisuuden Voima on mitä ilmeisimmin saanut rahoitusta selvästi huokeammin ehdoin. Jos kuitenkin pidämme arviota suuntaa antavana, on selvää, että ydinvoiman vastustuksen vaikutukset ovat muihin tekijöihin verrattuna varsin rajallisia.

Erityisen merkillepantavaa on, että sama tarina toistui niin kapitalistisessa lännessä kuin sosialistisessa idässäkin. Vuonna 1983 julkaistu katsaus ydinvoimaan Neuvostoliitossa totesi, että ydinvoimaloiden rakentamiskustannukset olivat 1,5–2 kertaa suurempia kuin perinteisillä voimaloilla, ja vuonna 1979 – kivihiihen maailmanmarkkinahinnan ollessa huipussaan – ydinsähkön keskimääräinen hinta oli noin viisi prosenttia perinteisin tavoin tuotettua sähköä korkeampi [8]. Rakennusprojektit viivästyivät säännöllisesti myös Neuvostoliitossa, ja on syytä epäillä, että todelliset kustannukset saattoivat olla selvästi virallisten tiedonantojen lukuja suurempia [9].

Tshernobylin tuhoutuneen RBMK-reaktorin ominaisuudet kertovat paljon ydinvoiman kannattavuusongelmista myös Neuvostoliitossa, maassa, jossa julkisesta mielipiteestä ei tarvinnut välittää ja jossa turvallisuusmääräyksiä ei juuri kiristetty ennen vuotta 1986. Neuvostoliiton kunnianhimoisen ydinenergiaohjelman oli alun perin tarkoitus nojata etupäässä VVER-painevesireaktoreihin, mutta suuresta grafiittihidasteisesta RBMK-reaktorista tuli energiaministeriön suosikki ennen kaikkea kustannussyistä [9].

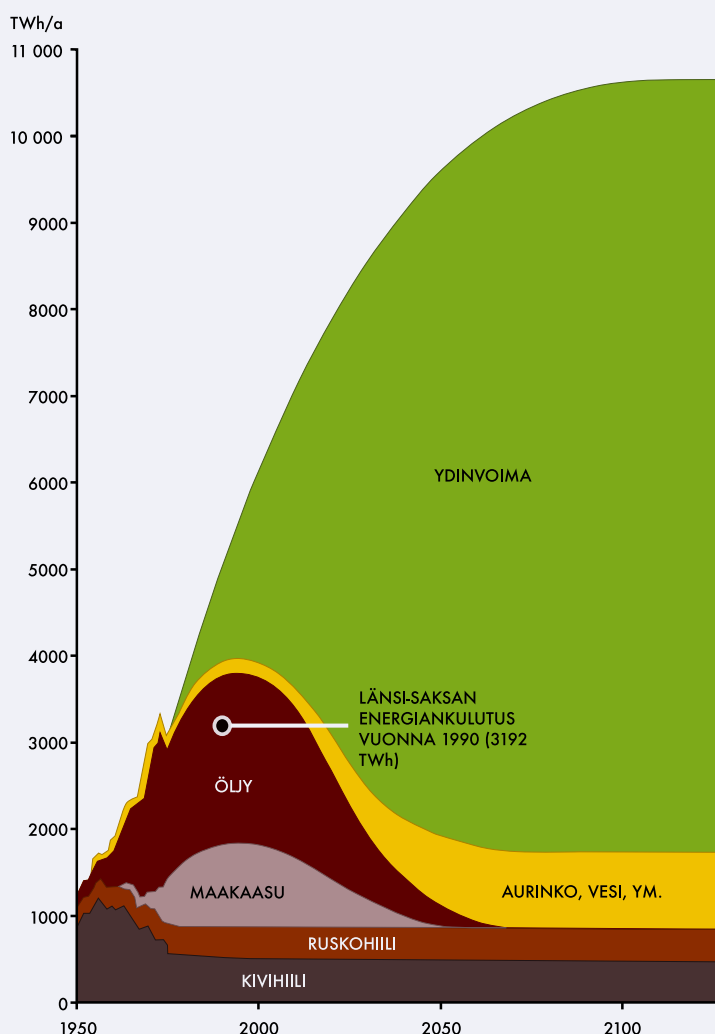
Suuri 1 000 MW(e) reaktori tuotti lähtökohtaisesti puolta pienempää VVER:ää edullisempaa sähköä, sitä ei täytynyt pysäyttää polttoaineen vaihtoa varten, ja se saattoi käyttää kevyemmin väkevöityä, selvästi edullisempaa uraanipolttoainetta. Lisäksi reaktori voitiin koota elementeistä, joiden valmistamiseen ei tarvittu erityisen tarkkoja työstökoneita tai huippusaamista, toisin kuin VVER:n paineenalaisiin

komponentteihin [9]. Suojarakennus jätettiin rakentamatta, koska suuren grafiittihidasteisen reaktorin tarvitsema suojarakennus olisi nostanut sekä rakentamis- että käyttökustannuksia. Ydinturvallisuusmääräysten kiristämistä ehdittiin vasta varovaisesti ehdottaa ennen vuotta 1986 [9].

Sähkömarkkinoiden vapauttaminen oli kuolinisku

Lopullinen kuolinisku ydinvoimalle länsimaissa oli sähkömarkkinoiden 1980-luvulla alkanut ja pääosin 1990-luvulla loppuun saatettu vapauttaminen. Kuten aiemmin totesin, monopolinomaiset sähköyhtiöt olivat voineet tehdä pitkän tähtäimen riskisijoituksia melko huolettomasti. Riskien realisoitumisen kustannukset voitiin aina siirtää kuluttajien maksettavaksi. Sähkömarkkinoiden vapauttamisen yhtenä perusteenä oli juuri tämän käytännön lopettaminen.

IEA:n katsaus sähkön tuotantokustannuksiin vuodelta 1998 käsittelee tuolloin vauhdissa ollutta vapauttamiskehitystä seikkaperäisesti [2]. Raportissa todetaan suorasanaisesti, että vapauttamisen suorana seurauksena ja sähkön kulutuksen kasvaessa vain hitaasti sähköyhtiöiden kannatti rakentaa lähinnä pieniä, rakentamiskustannuksiltaan edullisia ja tuotannoiltaan joustavia voimaloita. Käytännössä tämä tarkoitti ennen



Kuva 4. Ennuste Länsi-Saksan primäärienergiankulutuksen kehityksestä vuodelta 1976, ja Länsi-Saksan korkein toteutunut primäärienergiankulutus, 1990. Muokattu lähteestä [3].

kaikkea kaasuvoimaloita. Suuret, pääomaintensiiviset ja pitkäkestoiset hankkeet olivat tulleet käytännössä mahdottomiksi.

Vanhojen monopoliyhtiöiden ja 3–5 prosentin diskonttokorkojen päivät olivat ohi. Vapautetuilla markkinoilla sähköyhtiöt käyttivät investointipäätöksissään 10–12 prosentin korkokantaa, toisinaan jopa paljon korkeampaakin [2, s. 209]. Ydinvoiman rakentamista oli vaikea perustella edes optimistisilla arvioilla rakentamiskustannuksista. Parhaimmillaankin hintaero jäi niin pieneksi, että haluttomuus sijoittaa suureen projektiin oli helposti ymmärrettävissä. Kymmenen prosentin diskonttokorolla ydinvoima ei ollut halvin uusi tuotantomuoto missään IEA:n tarkastelemissa maassa [2, s. 12]. Ydinvoiman vastustuksen merkitystä ei raportissa edes vaivauduttu mainitsemaan.

IEA:n katsaukseen sisältyi myös Suomesta tarkoitusta varten toimitettu laskelma. Siinä 2000-luvun alussa valmistuvan 1000 MW(e) ydinreaktorin rakentamiskustannuksiksi arvioitiin sangen toiveikkaasti vain 2256 dollaria (1996) per kilowatti sähkötehoa [2, s. 54]. Tuotantokustannusten vertailu kilowattia kohden 885 dollarin hintaiseksi arvioituun hiilivoimalaan ja 622 dollarin kaasuvoimalaan on paljastava (Kuva 5). Useimmissa muissa maissa ydinvoiman kannattavuus arvioitiin vielä heikommaksi.

Vaikka mainitut lukemat ovat 1990-luvulta ja kuvaavat osin arvioita 2000-luvun tilanteesta, ne selittävät mainiosti esimerkiksi sen, miksi ydinvoimaan vahvan myönteisesti ja ympäristöliikkeeseen vahvan kielteisesti suhtautuneen Margaret Thatcherin hallitus halusi rakentaa 1980-luvulla kymmenen ydinvoimalaa, mutta sai rakennettua vain yhden [10]. 1970–1990-luvuilla poliitikot joutuivat käytännössä ja osin huomaamattaan valitsemaan ”vapaiden markkinoiden” ja ydinvoiman välillä. Joissain maissa, kuten Ranskassa, valinta osui ydinvoimaan. Useimmissa maissa valituksi tulivat vapaat markkinat – ja pienet, halvat ja joustavat fossiilisia polttoaineita polttaneet voimat.

Tarkastelen seuraavassa vielä lyhyesti tarkemmin Yhdysvaltojen kokemuksia ja kehitystä havainnollisena esimerkkinä.

Tapaus Yhdysvallat

Yhdysvalloissa sähkönkulutus kasvoi 1960-luvulla keskimäärin lähes seitsemän prosenttia vuosittain, selvästi ennusteita nopeammin [6, s. 66; 11, s. 174]. Vuosikymmenen lopulla lukuisilla sähköyhtiöillä oli jo vaikeuksia tuottaa tarpeeksi sähköä huippukulutuksen kattamiseksi, ja jännitteenalennukset (brownout) olivat kesäisin tavallisia. Huomattavien, nopeasti toteutuvien investointien tarve oli ilmeinen, ja sähköyhtiöt vastasivat haasteeseen ennätysmäisellä rakennusohjelmalla.

Vuoden 1973 lopussa yhdysvaltalaiset sähköyhtiöt ilmoittivat maan sähkövoimaloiden yhteenlasketun tehon olevan 417 000 megawattia, josta yli puolet tuli alle kymmenen vuotta vanhoista voimaloista. Peräti 419 000 megawatin ilmoitettiin olevan suunnittelu- tai rakentamismvaiheessa [11, s. 177]. Vuosina 1973, 1974 ja 1975 uusia voimaloita valmistui yhteensä lähes 120 000 megawatin verran.

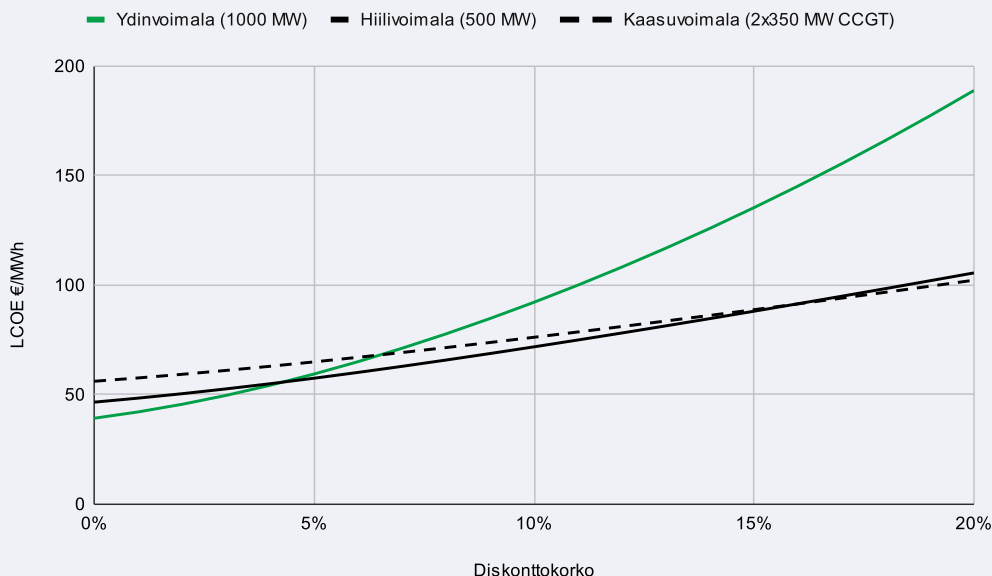
Uusista voimaloista noin kolme neljäsosaa oli vanhoja laitoksia merkittävästi tehokkaampia hiili- ja öljyvoimaloita, yhden neljänneksen ollessa ydinvoimaa. Ydinvoiman osuuden piti kasvaa nopeasti: vuosien 1966–1974 välillä oli tilattu liki 250 reaktoria, ja Yhdysvaltojen atomienergiakomissio ennusti, että vuonna 2000 Yhdysvalloissa olisi käytössä 1 000 ydinreaktoria [12, s. 2]. Näin ei käynyt.

Öljykriisi oli kyllä tehnyt ydinvoimasta houkuttelevampaa. Öljykriisin laukaisema taantuma, inflaatio, ja inflaation mukana pahimmillaan yli 13 prosenttiin nousseet korot kuitenkin murjoivat samaan aikaan sekä sähköyhtiöiden että ydinvoiman kannattavuutta juuri sillä hetkellä, kun vuosikymmenen lopulle ja 1980-luvun alkuun kaavailtuja ydinvoimaloita oltiin suunnittelemassa ja tilaamassa.

Investointeja varten suuria lainoja ottaneet sähköyhtiöt olivat korkojen noustessa muutenkin vaikeuksissa, ja kuluttajat vieläpä vähensivät sähkönkulutustaan. Niinpä myös sähköyhtiöiden kyky hankkia uutta rahoitusta heikkeni. Kulutuksen väheneminen ja taantuma muuttivat sähkötalouden yllätykselliseksi [6, s. 66]. Kun sähköyhtiöt joutuivat säästä-

Arvio sähkön tuotantokustannuksista (LCOE) 2000-luvun alussa valmistuvissa voimaloissa Suomessa, €/MWh

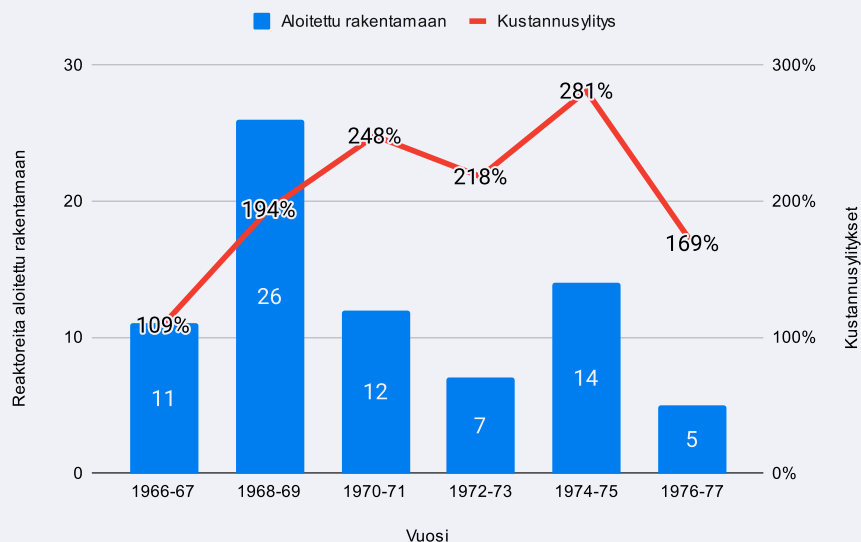
Lähde: IEA/OECD (1998), omat laskelmat. Luvut nykyyeuroissa (2022)



Kuva 5. Arvio sähkön tuotantokustannuksista (LCOE) 2000-luvun alussa valmistuvissa suomalaisissa voimaloissa, nykyyeuroa/MWh. Ydinvoiman arvioitu käyttöaste 90 %, hiili- ja kaasuvoiman 75 %.

Ydinreaktoriprojektien kustannusylitykset aloitusvuoden mukaan Yhdysvalloissa

Lähde: Congressional Budget Office (2008, 17). Keskimääräinen kustannusylitys 207 %



mään ja tulevaisuus oli epävarma, ensimmäisenä leikkuriin joutuivat pitkäkestoiset, pääomakustannuksiltaan suuret ydinvoimahankkeet [11, s. 177]. Yhteensä yli sata reaktoritilasta peruutettiin, mukaan lukien jokainen vuoden 1973 jälkeen tehty tilaus [13, s. 15].

Leikkurilta säästyneitä voimalahankkeita hidastettiin. Hiilivoimaloiden rakentamisaikataulut venytettiin yleisesti 4-5 vuodesta kahdeksaan, ja valmistuneiden ydinvoimaloiden keskimääräiseksi rakennusajaksi tuli peräti 12 vuotta [1, s. 17; 11, s. 177]. Venytykset vaikuttivat merkittävästi pääomaintensiivisen ydinvoiman hintaan. Kustannusylityksiä kasvatti sääntelyn muuttuminen ja suunnitelmien keskeneräisyys [1, s. 17; 12]. Vuosien 1966–1976 välillä aloitettujen ydinvoimaprojektien kustannukset ylittyivät arvioituista keskimäärin 207 prosenttia (Kuva 6). Kuten ylempänä totesin, tärkein yksittäinen syy oli laitosten rakentamisen aloittamisen jälkeen kiristyneessä sääntelyssä [5, s. 61]. Moni

sääntelyjärjestelmän erikoisuus ja vaikka ydinsähkön voitiin usein osoittaa olevan pitkällä tähtäimellä fossiilista tuotantoa edullisempaa, etenkin vaaleilla valitut poliitikot ja kuluttajat kiinnittivät huomiota etupäässä lyhyen tähtäimen hinnankorotuksiin. Kun voimaloiden valmistumista vielä viivytettiin tietoisesti, huolimatta viiveiden ilmiselvistä vaikutuksista voimaloiden hintaan, valvovien viranomaisten ja suuren yleisön epäluuloa ei voinut estää. ”Huolellisuuskuulemisista”, joissa sähköyhtiöiden johto joutui vastaamaan syytöksiin leväperäisestä johtamisesta, tuli 1970-luvulla yleisiä [11, s. 177].

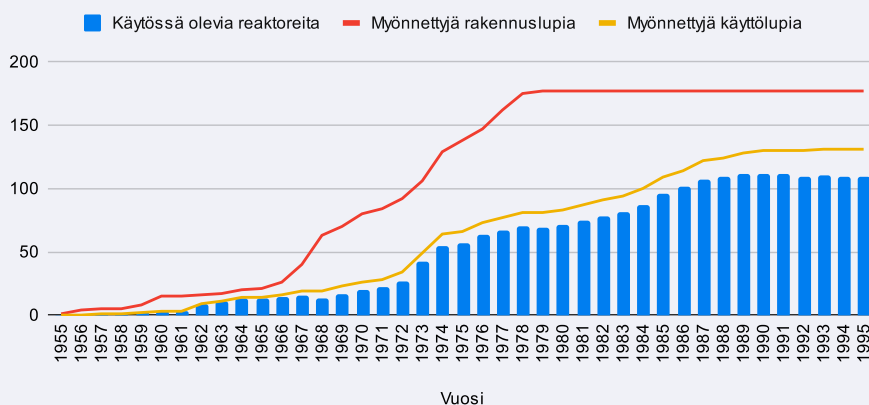
Kuluttajien ja poliitikkojen tuskastuminen konkretisoitui vuonna 1978 säädettyssä sähköyhtiölaissa. Tämä niin sanottu PURPA-laki aloitti sähkömarkkinoiden vapauttamisen Yhdysvalloissa avaamalla sähköverkot yksityisille sähköntuottajille. Tämän jälkeen sähköyhtiöt ja niiden sijoittajat eivät enää voineet siirtää riskien realisoinnin kustannuksia helposti sähkön hintoihin.

Vuonna 1978 aloitettiinkin enää yhden reaktorin rakennustyöt [6]. Se jäi viimeiseksi Yhdysvalloissa aloitetuksi ydinvoimahankkeeksi ennen vuotta 2009. Vuonna 1979 myönnettiin vielä kaksi rakennuslupaa, mutta kumpakaan ei käytetty (Kuva 7) [14]. Ainakin yhden asiantuntija-arvion mukaan nimenomaan vuoden 1978 PURPA-laki pysäytti ydinvoiman rakentamisen Yhdysvalloissa [6, s. 68]. Arvio lienee oikeasuuntainen, sillä vain harvassa maassa on sähkömarkkinoiden vapauttamisen jälkeen rakennettu mainittavia määriä ydinvoimaa.

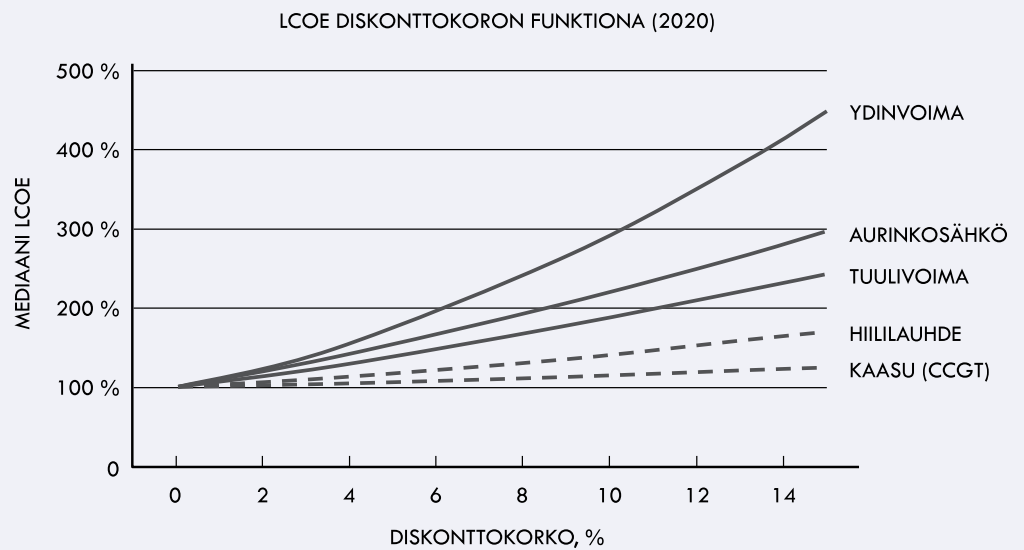
Kuva 7. Ydinreaktoreille myönnetty rakennusluvat, käyttöluvut ja käytössä olleet reaktorit Yhdysvalloissa 1955–1995.

Ydinreaktoreille myönnetty luvat ja käytössä olleet reaktorit Yhdysvalloissa 1955-1995

Lähde: EIA (2012), Table 9.1



Kuva 8. Diskonttokoron kasvun vaikutus eri sähköntuotantomuotojen tuotantokustannuksiin (2020, diskonttokorko 0 = 100 %). Muokattu lähteestä [5].



Lähde: OECD-NEA (2020)

Nouseva ympäristöliike ja Three Mile Islandin voimalassa 1979 sattunut onnettomuus (eräiden pienempien vaaratilanteiden ohella) olivat enemmänkin nauvoja yhdysvaltalaisen ydinvoiman arkkuun. Kumpikin heikensi yleisön luottamusta ydinvoimateollisuuden lupauksiin ja kasvatti ydinvoiman rakentamisen kustannuksia ja riskejä, mutta aiempiin kustannuslylyksiin verrattuna suhteellisen vähän. Three Mile Islandin jälkeen loppuunsaatettujen voimaloiden kustannukset ylittivät 250 prosenttia suunnitelluista, mutta vastaavia ja jopa suurempia ylityksiä oli nähty jo vuosikymmenen alussa aloitetuissa hankkeissa (Kuva 6) [1, s. 17].

Uusien ydinvoimaloiden tilaaminen oli lähestulkoon loppunut jo ennen onnettomuutta ja sen herättämää laajaa keskustelua. Lähteessä [6] esitetään ydinvoiman hyytymisen keskeisiksi syiksi Yhdysvalloissa 1) sähkön kysynnän heikkeneminen, 2) korkeat korot ja rakennuskustannukset, 3) ydinvoimateollisuuden rakenteelliset ongelmat muun muassa suunnittelussa, 4) sähkömarkkinoiden vapauttaminen ja 5) muuttuneet mielikuvat ydinvoimateollisuudesta – mukaan lukien, mutta ei yksinomaan, ydinvoiman vastainen kansanliike.

Yhteenveto: tappaja ei ollut pukeutunut vihreään

Koska ydinvoimaprojektit ajautuivat samanaikaisesti samantyyppisiin kustannus- ja aikatauluongelmiin niin kapitalistisessa lännessä kuin kommunistisessa ja kansalaisliikkeistä vähät välittäneessä idässä, ydinvoiman ongelmien selittäminen kansanliikkeillä tai edes yksinomaan sääntelyn kiristymisellä ontuu pahoin. Vaikka sääntelyn kiristymisellä ja muutoksilla oli ilmiselvästi vaikutusta kustannuksiin, on selvää, että suurin osa lisääntyneestä sääntelystä oli välttämätöntä. Silminnäkijät, kuten Kansainvälisen energijärjestö IEA:n asiantuntijat, raportoivat jo tapahtumien keskeltä syyksi ennen kaikkea odotettua halvemmat fossiiliset polttoaineet ja sähkömarkkinoiden vapauttamisesta aiheutuneen ydinvoiman heikon kilpailukyyn korkeiden diskonttokorkojen ajalla.

Mikään yllä olevasta ei tarkoita, etteikö kansanliikkeillä ja sääntelyllä olisi ollut mitään vaikutusta. Todisteet puhuvat kuitenkin sen puolesta, että ilman ydinvoima-alan sisäsyntyisten ongelmien ja sähkömarkkinoiden vapauttamisen vastustukselle antamia mahdollisuuksia, vaikutukset olisivat jääneet vähäisiksi. Ympäristösääntelyn historia todistaa kerta

toisensa jälkeen, että taloudellisesti keskeisen tärkeitä aloja on vaikea säännellä tehokkaasti, vaikka syytä olisikin.

Jos taloudelliset seikat olisivat puoltaneet vahvasti ydinvoiman rakentamista, on erittäin vaikea uskoa, että etenkin varhainen ympäristöliike olisi sitä mitenkään kyennyt estämään. Jos ydinvoiman rakentaminen olisi koettu esimerkiksi kansantalouden kilpailukyyn kannalta elintärkeäksi, vastustus olisi todennäköisesti jäänyt ponnettomaksi. Ydinvoima saattoi olla joissain tapauksissa hieman vaihtoehtoja kannattavampaa, mutta ero ei ollut tarpeeksi suuri. Monessa maassa ydinvoimasta ei myöskään ehtinyt tulla taloudelle niin tärkeää energianlähdeä, etteikö sitä voitu jokseenkin ongelmitta jopa kieltää kokonaan.

Vielä 2020-luvullakin valtaosa kaikkien teollisuusmaiden kansalaisista on hyvin vastaanottavia taloudellisille argumenteille, ja kaiken taloudellisesti selvästi kannattavan toiminnan rajoittaminen ympäristösyistä on osoittautunut äärimmäisen vaikeaksi. Rajoituksilla on kyetty puuttumaan lähinnä aloihin ja käytäntöihin, joiden rajoittamisen taloudelliset vaikutukset ovat olleet vähäisiä. Lähinnä sellaiset alat, joiden taloudellinen merkitys on marginaalinen ja jotka ovat muutenkin kuolemassa, on saatu toistaiseksi kiellettyä. Suomessa hyvänä esimerkkinä toimii vaikkapa turkistarhaus. Suomi on viimeisiä maita maailmassa, jossa turkistarhausta saa harjoittaa, mutta alan kieltäminen on osoittautunut haastavaksi, vaikka sen kannattavuus on jo olematonta.

Ydinvoima saattaisi hyvin olla tänä päivänä maailman tärkein energianlähde, jos fossiilisten polttoaineiden käyttöä olisi ryhdytty päättäväisesti rajoittamaan jo 1970-luvulla. Tarvittavilla toimenpiteillä, kuten korkeilla päästömaksuilla, on kuitenkin edelleenkin vastustajansa.

Historian opetuksia on syytä kuunnella myös nykypäivänä. Ydinvoimahankkeet ovat edelleen suuria, pääomaintensiivisiä projekteja, joiden kannattavuus riippuu olennaisesti ja vaihtoehtoja enemmän pääoman hinnasta (Kuva 8). Mikäli ydinvoiman halutaan säilyvän realistisena vaihtoehtona uusiutuvan energian tekniikoiden hintojen laskeutumisella, markkinarakenteisiin on puututtava tavalla tai toisella. Käytännössä tarvittaisiin merkittävää valtioiden eli loppujen lopuksi veronmaksajien väliintuloa, tavalla tai toisella. Väliintulo voi tapahtua esimerkiksi tukiaisten, lainatausten, valtionyhtiöiden, tai julkisen ja yksityisen sektorin yhteistyön kautta, mutta siltä on vaikea välttyä.

Käsitykset, joiden mukaan jonkinlaisella sääntelyn keventämisellä voitaisiin paikata lyhyen tähtäimen projekteihin kannustavan markkinoiden vapauttamisen vaikutukset, ovat mitä todennäköisemmin toiveajattelua. Samaten toiveajatteluksi voi osoittautua myös käsitys, jonka mukaan uudet ydinvoimalat voisivat olla kannattavia vaihtelevan uusiutuvan tuotannon ”luppoaikoina” vallitsevien korkeampien sähkön hintojen ansiosta. Sekä kulutusjoustopkin että energian varastoinnin tekniikat kehittyvät nopeasti, ja hintapreemio voi jäädä odotettua väliaikaisemmaksi. Esimerkiksi tuotantokapasiteetin olemassaolosta palkitseva kapasiteettimaksu voisi kuitenkin muuttaa tilannetta.

Ydinvoimahankkeissa tulisi entistä enemmän pyrkiä tekemään yhteistyötä eri maiden välillä esimerkiksi standardoitujen reaktorityyppien

sarjavalmistamiseksi. Suomessa olisi syytä pyrkiä yhteistyöhön Ruotsin kanssa, mikäli Ruotsin suunnitelmat uusista ydinvoimaloista etenevät. Ruotsin jakamat anteliaat valtioneuvostot antavat osviittaa keinoista, jotka todennäköisesti olisivat Suomessakin tarpeen ydinvoiman lisärakentamiseksi. Suunnittelultaan keskeneräisten reaktoreiden rakentamista tulisi välttää, sillä riskit kustannusylityksistä ja viivästyksistä ovat historiallisen näytön perusteella huomattavan suuria. Jos menneisyyden onnistumiset halutaan toistaa, myös menneisyyden keinoista on opittava. Muuten tulevaisuus todennäköisesti toistaa vain menneisyyden virheet.

Artikkeli perustuu Koneen säätiön rahoittamassa Plan B -tutkimushankkeessa 2020-2023 tehtyyn tutkimukseen.

Lähteet

- [1] CBO, "Nuclear Power's Role in Generating Electricity", Congressional Budget Office, Washington D.C., May 2008. Saatavissa: <https://www.cbo.gov/sites/default/files/110th-congress-2007-2008/reports/05-02-nuclear.pdf>
- [2] IEA/OECD, "Projected Costs of Generating Electricity: 1998 Update", OECD and IEA, Paris, 1998. Saatavissa: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/768-projected-costs.pdf>
- [3] SPD, "Energie: ein Leitfadens zur Diskussion", SPD, 1977.
- [4] B. L. Cohen, The Nuclear Energy Option. Plenum Press, 1990. Saatavissa: <http://www.phyast.pitt.edu/~blc/book/chapter9.html>
- [5] OECD NEA, "Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders", OECD, August 2020. doi: 10.1787/33ba86e1-en.
- [6] N. Hultman ja J. Koomey, "Three Mile Island: The driver of US nuclear power's decline?", Bull. At. Sci., vsk. 69, nro 3, ss. 63–70, March 2013, doi: 10.1177/0096340213485949.
- [7] P. Day, "Nuclear financing troubles track waning acceptance", Reuters, 23.3.2021. Saatavissa: <https://www.reutersevents.com/nuclear/nuclear-financing-troubles-track-waning-acceptance>
- [8] B. A. Semenov, "Nuclear power in the Soviet Union", IAEA Bull., vsk. 25, nro 2, ss. 47–59, 1983.
- [9] S. Plokhly, Chernobyl: the history of a nuclear catastrophe, First edition. New York: Basic Books, 2018.
- [10] G. Walker, "UK Power Networks: the political discourse of British nuclear power", Ph.D. thesis, University of Essex, Essex, 2014.
- [11] E. Nichols, "U. S. Nuclear Power And The Success Of The American Anti-Nuclear Movement", Berkeley J. Sociol., vsk. 32, ss. 167–192, 1987.
- [12] IAEA, "50 Years of Nuclear Energy", teoksessa General Conference 48 documents, Vienna, 2004. Saatavissa: https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc48inf-4-att3_en.pdf
- [13] J. F. Ahearne, H. A. Feiveson, D. Ingersoll, S. Maloney, S. Squassoni, ja R. Wolfson, "The Future of Nuclear Power in the United States", Federation of American Scientists & Washington and Lee University, 2012. Saatavissa: https://pubs.fas.org/_docs/Nuclear_Energy_Report-lowres.pdf
- [14] EIA, "Annual Energy Review 2012", Energy Information Administration, Washington, DC, September 2012. Saatavissa: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.php?t=ptb0901>

Kirjoittaja



DI, FT Janne M. Korhonen

Kestävän ja oikeudenmukaisen siirtymän asiantuntija
Kalevi Sorsa -säätiö
janne.korhonen@sorsafoundation.fi

Naapuriksi pienydinvoimala?

Matti Kojo^{1,2}, Sarah Tornberg¹, Mika Kari³, Anni Vainio¹, Tapio Litmanen³, Markku Lehtonen⁴

¹ LUT-yliopisto, ² Tampereen yliopisto, ³ Jyväskylän yliopisto, ⁴ Universitat Pompeu Fabra

Pienydinvoimaloiden käyttäminen kaukolämmön tuottamiseen teknistaloudellisesti kannattavasti vaatii voimalan sijoittamista lähelle kaukolämpöverkkoa. Kun pienydinvoimaloita suunnitellaan kaupunkeihin, asukkaiden näkemykset ovat tärkeässä roolissa. Asukaskyselyymme vastanneista, pienydinvoimaan myönteisesti suhtautuvista asukkaista monet eivät hyväksyisi pienydinvoimalaa lähelle kotiaan, eikä edes turvallisuudesta tiedottaminen välttämättä lisää pienydinvoimaloiden hyväksyntää. Tarkastelemme niitä tekijöitä, jotka mahdollisesti vaikuttavat asukkaiden suhtautumiseen pienydinvoimaloiden rakentamiseen omaan kuntaan.

To be techno-economically viable, small nuclear power plants for the production of district heat must be located close to the district heating network. When planning small nuclear power plants to be sited in cities, the views of residents are important. Many of the those who responded to our resident survey and are in favour of small-scale nuclear power would nevertheless not accept a small nuclear power plant near their home. Even the provision of information on safety does not necessarily increase the acceptance of small nuclear power plants. We look at the factors that may influence residents' attitudes towards the construction of small nuclear power plants in their municipality.

Kiinnostus pienydinvoimaloiden käyttöönottoon on herättänyt kysymyksen laitosten mahdollisista sijoituspaikasta. Samalla joudutaan ottamaan kantaa siihen, kuinka lähelle asutusta mahdollisia laitoksia suunnitellaan sijoitettaviksi. Pienydinvoimalan sijoituspaikan kriteereitä ja etäisyyttä asutuksesta miettivät ainakin energiyhtiöt, kaavoittajat ja säteilyturvallisuudesta vastaavat viranomaiset. Laitosvalmistajat markkinoivat pienydinvoimaloita turvallisina ja katsovat, että ne voitaisiin näin ollen sijoittaa lähelle asutusta.

Asukkaat eivät silti ole täysin vakuuttuneita. Mahdollisen laitoksen vaihtoehtoiset sijoituspaikat ja etäisyys asutuksesta kiinnostavatkin epäilemättä monia, joiden naapuriksi pienydinvoimala voisi tulla. Jos pienydinvoimalaa suunnitellaan kaukolämmön tuotantoon, kuten pääkaupunkiseudulla, laitos olisi teknistaloudellisesti järkevää sijoittaa lähelle kaukolämpöverkkoa – käytännössä lähelle olemassa olevaa asutusta. Etäisyys on siten erityisen kiinnostava paikanvalintakriteeri, jos pienydinvoimalaa suunnitellaan kaukolämmön tuotantoon.

Tähän mennessä mielipidetiedusteluissa on kysytty vastaajien yleisistä suhtautumista pienydinvoiman käyttöönottoon Suomessa [1]. Näistä ei kuitenkaan ilmene, kuinka lähelle omaa kotiaan vastaajat hyväksyisivät laitoksen rakentamisen. Voidaan olettaa, että osa sekä pienydinvoiman kannattajista että vastustajista muuttaa suhtautumistaan laitokseen sen perusteella, miten lähelle vastaajan kotia laitos sijoitettaisiin. Pienydinvoiman kannatus ja vastustus ei siten ole niin ehdotonta kuin saattaisi olettaa.

Vuonna 2021 pääkaupunkiseudun asukkaille toteutetussa kyselyssä vastaajilta tiedusteltiin, miten lähelle kotiaan he olisivat valmiita hyväksy-

mään pienydinvoimalaitoksen [2, 3]. Tarkastelemme tässä artikkelissa sitä, miten etäisyys ja vastaajien käsitykset laitoksen turvallisuudesta tarkentavat käsitystä laitoksen hyväksynnästä.

Pienydinvoimalan paikanvalinnan monet haasteet

Suomessa suuret ydinvoimalaitokset on sijoitettu kauas suurimmista asutuskeskuksista, kuten Fennovoiman Hanhikivi 1 -laitosyksikön paikanvalintakin osoitti. Mahdollisissa lämpöreaktorihankkeissa yhtiöt sen sijaan etsivät laitospaikkaa Suomen suurimmista kaupungeista. Laitostoimittajien [4] mukaan pienydinvoimala voitaisiin sijoittaa hyvin lähelle asutusta, jopa asutuksen keskelle. Käytännössä mahdolliseksi sijoituspaikoiksi valikoitunevat maankäytön ohjauksen ja kaavoituksen myötä esimerkiksi teollisuustoimintaan ja energiantuotantoon tarkoitettut alueet [5].

Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) valmistelee suosituksia pienydinvoimaloiden turvaetäisyyksistä. IAEA on muun muassa selvittänyt pienydinvoimaloiden rakentajatahojen omia arvioita tarvittavista turvavyöhykkeistä [6]. Pisimmällä pienydinvoimaloiden turvavyöhykkeiden määrittelyssä lienee Yhdysvallat ja NuScalen pienydinvoimalakonsepti, jonka turvavyöhykkeen määrittelymenetelmän hyväksymistä maan ydinturvallisuudesta vastaavan säätelyviranomaisen (NRC) neuvoo-antava reaktoriturvallisuukskomitea (ACRS) suositteli NRC:lle loka-kuussa 2022 [7].

Suomessa on käynnissä ydinenergiain kokonaisuudistus. Säteily- ja ydinturvallisuutta Suomessa valvova viranomaistaho Säteilyturvakeskus

(STUK) on mukana kokonaisuudistuksessa. Se osallistuu myös kansainväliseen yhteistyöhön, jossa laaditaan pienydinreaktoreille turvallisuusohjeita. STUK on pohtinut syksyllä 2022 kaksiportaista turvavyöhykejärjestelmää. Tässä järjestelmässä alustavaa turvavyöhykkeen laajuutta tarkennettaisiin, kun oltaisiin valittu pienydinvoimalan laitekoneologia, jonka perusteella turvavyöhykkeen koko lopulta määriteltäisiin. Keskustelu aiheesta on käynnissä, eikä ratkaisuja ole vielä tehty. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n koordinoimassa ELSMOR-projektissa on puolestaan kartoitettu koko EU:n kattavia säädöksiä, jotka koskisivat myös pienydinvoimaloiden paikanvalintaa [8].

Asukaskysely

Pienydinvoimaa koskevaan asukaskyselyyn vastasi 1600 suomenkielistä 18–75-vuotiasta asukasta Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla. Aineisto kerättiin Innolink Oy:n kuluttajapaneelille suunnattuna verkopohjaisena kyselynä lokakuussa 2021. Kyselyn virhemarginaali on 2,4 %. Vastaajien sukupuolijakauma noudatti alueen sukupuolijakaumaa. Ikäryhmistä 60–69-vuotiaat olivat hieman yliedustettuina ja yli 70-vuotiaat jonkin verran aliedustettuina. Ylemmät tuloluokat ja korkeasti koulutetut olivat vastaajissa yliedustettuina.

Asukaskyselyssä selvitettiin vastaajien suhtautumista pienydinvoimaloiden käyttöönottoon Suomessa ja omassa asuinkunnassa sekä sitä, miten lähelle kotiaan vastaaja pienydinvoimalan hyväksyisi. Kyselyssä ei tarkennettu pienydinvoimalan mahdollista teknologiaa tai mallia, vaan asukkailta tiedusteltiin heidän yleistä suhtautumistaan pienydinvoimaan ja siihen liittyviin kysymyksiin.

Kyselyn tulokset

Kysyttäessä suhtautumista pienydinvoimalan mahdolliseen käyttöönottoon omassa asuinkunnassa 46 % vastaajista suhtautui myönteisesti, 31 % kielteisesti ja 23 % ei myönteisesti eikä kielteisesti. Lähes kaksi kolmasosaa (63 %) miehistä, mutta vajaa kolmannes (30 %) naisista suhtautui pienydinvoimaloihin myönteisesti (Kuva 1).

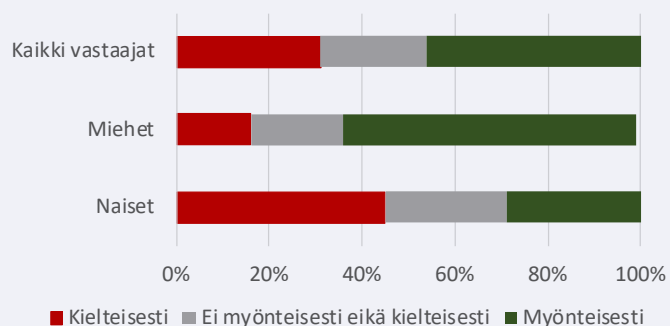
Asukkaiden suhtautumista etäisyyteen vastaajan kodin ja mahdollisen pienydinvoimalan välillä tiedusteltiin kysymyksellä ”Miten lähelle kotianne hyväksyisitte pienydinvoimalan rakentamisen?”. Kaikista vastaajista kuusi prosenttia hyväksyisi pienydinvoimalan kilometrin päähän tai lähemmäs, 20 % 2-5 kilometrin päähän, 12 % 6-9 kilometrin päähän ja 36 % kymmenen kilometrin päähän tai kauemmas kodistaan. Noin neljäsosa (26 %) ei hyväksyisi pienydinvoimalan rakentamista lainkaan (Kuva 2).

Sukupuoli vaikutti ratkaisevasti siihen, kuinka lähelle omaa kotiaan vastaaja hyväksyisi pienydinvoimalan. Kun miehistä yli puolet (53 %) hyväksyisi pienydinvoimalan rakentamisen alle 10 kilometrin päähän kodistaan, naisista tähän olisi valmis alle neljännes (23 %). Viiden kilometrin säteelle pienydinvoimalan hyväksyisi miehistä 38 % ja naisista 14 %. Miehistä yhdeksän prosenttia ja naisista vain kolme prosenttia hyväksyisi pienydinvoimalan alle kilometrin etäisyydelle kodistaan. Naisista 39 % ja miehistä vain 13 % ei ollut valmiita hyväksymään voimaloita lainkaan.

Asukaskyselyssä kartoitettiin vastaajien suhtautumista myös muihin voimalaitoksiin kuin pienydinvoimaloihin. Suuren ydinvoimalan olisi hyväksynyt asuinkuntaansa vain 22 % vastaajista, peräti 61 % suhtautui ajatuksen kielteisesti ja 17 % ei myönteisesti eikä kielteisesti. Suuret ydinvoimalat siis torjutaan, kun taas jopa 87 % vastaajista hyväksyisi aurinkovoimalan ja 68 % tuulivoimalan sijoittamisen asuinkuntaansa (Kuva 3).

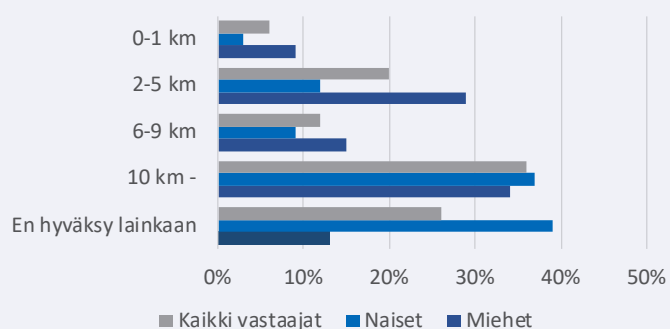
Ristiintaulukoimme myös vastaajien suhtautumisen pienydinvoimalan sijoittamiseen omaan asuinkuntaan ja vastaajien näkemys-

Miten suhtautuisitte pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassanne?



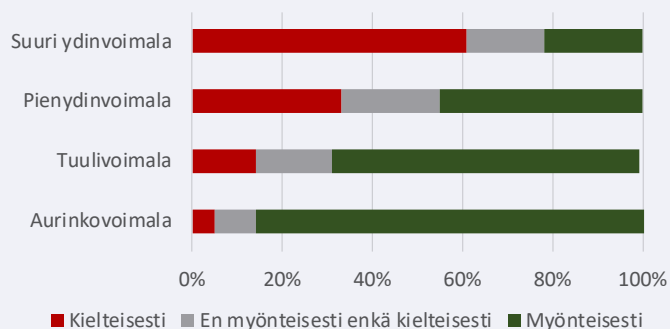
Kuva 1. Miten suhtautuisitte pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassanne?

Miten lähelle kotianne hyväksyisitte pienydinvoimalan sijoittamisen?



Kuva 2. Miten lähelle kotianne hyväksyisitte pienydinvoimalan sijoittamisen?

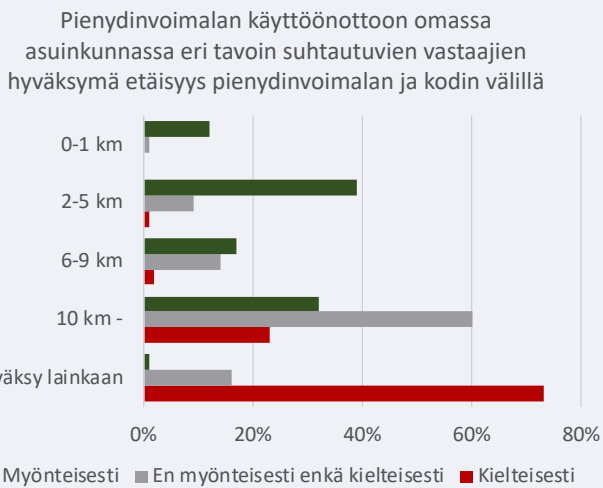
Miten suhtautuisitte seuraavanlaisten voimaloiden sijoittamiseen asuinkunnassanne?



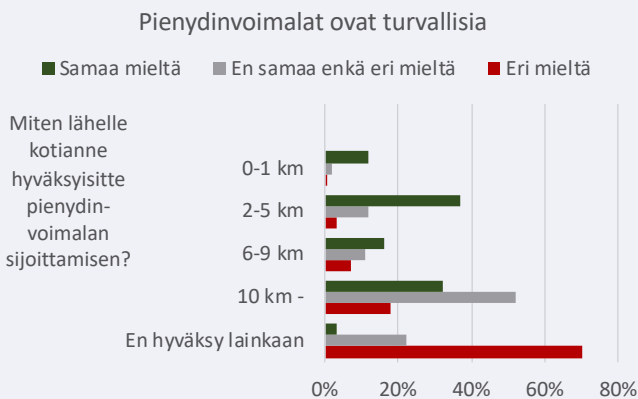
Kuva 3. Miten suhtautuisitte seuraavanlaisten voimaloiden sijoittamiseen asuinkunnassanne?

	0-1 km	2-5 km	6-9 km	10 - km	En hyväksy lainkaan
Myönteisesti	12 %	39 %	17 %	32 %	1 %
En myönteisesti enkä kielteisesti	2 %	9 %	14 %	60 %	16 %
Kielteisesti	0 %	1 %	2 %	23 %	73 %
Kaikki vastaajat	6 %	20 %	12 %	36 %	26 %

Kuva 4. Pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassa eri tavoin suhtautuvien vastaajien hyväksymä etäisyys pienydinvoimalan ja kodin välillä.



Kuva 5. Pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassa eri tavoin suhtautuvien vastaajien hyväksymä etäisyys pienydinvoimalan ja kodin välillä.



Kuva 6. Vastaajien kokemus pienydinvoimaloiden turvallisuudesta ja vastaajien hyväksymä etäisyys kodin ja pienydinvoimalan välillä.

set hyväksyttävästä etäisyydestä kodin ja pienydinvoimalan välillä. Pienydinvoimalan sijoittamiseen kotikuntaansa myönteisesti suhtautuvista 12 % hyväksyisi pienydinvoimalan kilometrin päähän tai sen alle, 68 % alle 10 kilometrin päähän ja 32 % vain, jos voimala sijaitsisi vähintään 10 kilometrin etäisyydellä kodista. Vastaajista, jotka suhtautuvat kielteisesti pienydinvoimalan sijoittamiseen asuinkuntaansa, 73 % ei hyväksyisi pienydinvoimalaa lainkaan. Kuitenkin 23 % näistäkin vastaajista hyväksyisi voimalan, jos se sijaitsisi 10 kilometrin päässä tai kauempana vastaajan kodista. Neutraalisti pienydinvoimalan sijoittamiseen asuinkuntaansa suhtautuvista 60 % haluaisi yli 10 kilometrin etäisyyden kodin ja pienydinvoimalan välille (Kuvat 4 ja 5).

Lisääkö koettu turvallisuus tai oma tietämys hyväksyntää?

Kyselyssä tiedusteltiin niin ikään vastaajien käsitystä pienydinvoimaloiden turvallisuudesta. Vain 12 % pienydinvoimaloita turvallisenä pitävistä hyväksyisi pienydinvoimalan alle kilometrin päähän kodistaan. Kuitenkin 66 % pienydinvoimaloita turvallisenä pitävistä, mutta vain 25 % turvallisuuden neutraalisti suhtautuvista, hyväksyisi pienydinvoimalan alle 10 kilometrin päähän kodistaan (Kuva 6).

Yli puolet (52 %) neutraalisti suhtautuvista hyväksyisi voimalan, jos se olisi vähintään 10 kilometrin päässä omasta kodista. Vähemmän yllättävää on se, että pienydinvoiman turvallisuutta epäilevistä vastaajista suurin osa (70 %) vastusti pienydinvoimalan käyttöä ylipäänsä. Kiinnostavaa on sen sijaan se, että lähes viidennes (18 %) pienydinvoiman turvallisuutta epäilevistä vastaajista hyväksyisi voimalan yli 10 kilometrin päähän kodistaan.

Kyselyssä asukkailta kysyttiin heidän arviotaan omasta tietämyksestään pienydinvoimasta. Vastaajista 42 % arvioi tietävänsä jonkin verran pienydinvoimasta, kun taas 41 % ei arvionsa mukaan tiennyt aiheesta kovinkaan paljon. Mielestään erittäin paljon pienydinvoimasta tietäviä oli 6 % ja itseään aiheesta täysin tietämättömänä pitäviä 11 %.

Vastaajista, jotka arvioivat tietämyksekseen ”en tiedä kovinkaan paljon”, 43 % halusi 10 kilometrin etäisyyden kotinsa ja pienydinvoimalan välille. Samalle etäisyydelle pienydinvoimalan hyväksyisi 45 % niistä, jotka vastasivat, että eivät tiedä lainkaan pienydinvoimaloista. Täysin tietämättöminä itseään pitävistä 39 % ei hyväksyisi pienydinvoimalaa lainkaan, kun taas vastaajilla, jotka arvioivat tietävänsä aiheesta erittäin paljon, vastaava luku oli 19%. Oman arvionsa mukaan erittäin paljon tietävistä 15 % hyväksyisi pienydinvoimalan kilometrin päähän tai lähemmäs kodistaan, ja 64 % hyväksyisi sellaisen alle 10 kilometrin etäisyydelle.

Vastaajat, jotka arvioivat tietämyksensä vähäisiksi, vaikuttivat näin ollen suhtautuvan myönteisesti pienydinvoimalan rakentamiseen, kunhan se olisi tarpeeksi kaukana omasta kodista. Toisaalta nämä vastaajat myös vastustivat ylipäänsä pienydinvoimaloiden käyttöönottoa useammin kuin ne, jotka arvioivat tietävänsä pienydinvoimasta erittäin paljon tai jonkin verran.

Sijainnissa askarruttavat muutkin asiat kuin etäisyys omasta kodista

Vastaajille esitettiin myös avokysymys: ”Jos pienydinvoimaloiden rakentamiselle haetaan lupaa kotikuntaanne, mihin asioihin pitäisi mielestänne kiinnittää eniten huomiota?”. Kysymyksenasettelun kannalta olennaisia vastauksia kertyi 741. Ne olivat pääosin vain yhden tai muutaman sanan mittaisia. Avovastausten perusteella sijainnilla on asukkaille moninaisia merkityksiä, eikä sijainti ole esimerkiksi yksinomaan turvallisuuskysymys.

Pienydinvoimalan rakentamisessa asukkaille merkittäviä tekijöitä ovat voimalan turvallisuus ja haitattomuus asukkaille ja ympäristölle. Voimalaa ei asukkaiden mukaan pidä rakentaa lähelle asutusta, mutta

myös päinvastaisia näkemyksiä esitettiin. Lähelle asutusta rakentamista perusteltiin sillä, että pienydinvoimalla pyritään ratkaisemaan kauko-
lämpöongelma. Voimala ei saisi aiheuttaa häiritsevää meteliä tai hajuja,
eikä se saisi häiritä liikkumista alueella.

Asukastiheytensä ja suuren väkilukunsa vuoksi erityisesti Helsinki
nähtiin hankalana sijoituspaikkana pienydinvoimalalle. Voimalan sijoit-
taminen Helsinkiin koettiin erityisenä turvallisuuskana: ”ydinonnet-
tomuus pääkaupungissa olisi todella paha katastrofi” tai voimala voisi
houkuttaa puoleensa ilkeämielisiä. Sijaintia valittaessa tulee asukka-
iden mukaan ottaa huomioon myös voimalan rakentamisen vaikutukset
lähiympäristöön. Voimalaa ei tulisi rakentaa esimerkiksi sellaiseen paik-
kaan, jolla on erityisiä luontoarvoja. Lisäksi vastaajat halusivat tietää, onko
rakentamissuunnitelmissa otettu huomioon esimerkiksi ilmastomuutok-
sen mukanaan tuomia ympäristövaikutuksia, kuten merenpinnan nousua.

Lopuksi

Vuonna 2021 toteutetussa kyselyssä kysyttiin pääkaupunkiseudun
asukkaiden mielipidettä etäisyydestä vastaajan kodin ja mahdolli-
sen pienydinvoimalaitoksen välillä. Aiemmin kyselyissä on tiedustel-
tu suhtautumista pienydinvoimaloiden käyttöönottoon Suomessa [1].
Mielipide etäisyydestä täsmentää käsitystä hyväksynnästä.¹

Keskeisiä havaintoja on kaksi. Ensinnäkin vastaajat, jotka ilmoittavat
hyväksyvänsä pienydinvoimalaitoksen ja jotka pitävät laitosta turvalli-
sena, eivät kuitenkaan hyväksyisi laitosta kovin lähelle omaa kotiaan.
Vain 12 % pienydinvoimalan käyttöönottoon asuinkunnassaan myönteis-
esti suhtautuvista olisi valmis hyväksymään laitoksen lähemmäs kuin
kilometrin päähän kodistaan. Myönteisesti suhtautuvista niinkin moni
kuin 32 % haluaisi etäisyydeksi vähintään 10 kilometriä. Toiseksi, lähes
neljännes (23 %) pienydinvoimaan kielteisesti suhtautuvista vastaajista
olisi kuitenkin valmis hyväksymään laitoksen kotikuntaansa, jos laitos
sijoitettaisiin riittävän kauas.

Riittävä etäisyys laitoksesta näyttäisi näin ollen vähentävän vastus-
tusta. Pienydinvoimaan kielteisesti suhtautuvista 23 % hyväksyisi voi-

malan, jos se sijaitisi 10 kilometrin päässä tai kauempana, mutta kysyt-
täessä suhtautumista pienydinvoimalan mahdolliseen käyttöönottoon
omassa asuinkunnassa kielteisesti suhtautuvia oli 31 %. Arvelemme
tämän selittyvän sillä, että sen enempää vastustajat kuin kannattajat-
kaan eivät ole mielpiteessään aina täysin ehdottomia. Toisin sanoen
osa pienydinvoimaan kriittisesti suhtautuvista muuttaa mielipidettään,
jos voimala on riittävän kaukana, ja moni kannattajistakin hyväksyisi
voimalan sillä ehdolla, että se sijoitettaisiin riittävän etäisyyden päähän.
Toiveen toteuttamiselle on kuitenkin käytännön esteitä, sillä pääkau-
punkiseudulta ei löydy pienydinvoimalalle sijoituspaikkaa, josta olisi
vähintään 10 kilometriä lähimpään asutukseen [10].

Myös tulos, jonka mukaan valtaosa (88 %) pienydinvoimaa turval-
lisena pitävistä ei halunnut laitosta naapurikseen (alle kilometrin pää-
hän), on huomionarvoinen. Vaikka hyväksyttävää etäisyyttä koskevissa
mielipiteissä on selvä ero niihin vastaajiin, jotka eivät pitäneet pienydin-
voimaa turvallisena, tulos osoittaa, että pienydinvoiman hyväksyntää
on vaikeaa rakentaa turvallisuusargumenttien varaan. Kyselyn avovas-
tauksissa asukkaat halusivat, että huomiota kiinnitetään nimenomaan
pienydinvoiman turvallisuuteen ja riskeihin. Kyselyn tulosten perusteel-
la näyttää kuitenkin siltä, ettei pelkkä myönteinen käsitys turvallisuu-
desta takaa hyväksyntää, jos pienydinvoimalaa suunnitellaan tiheästi
asutulle alueelle.

Pienydinvoiman kannattajatkaan eivät ole kannatuksessaan varauk-
settomia, vaan asettavat hyväksynnälleen reunaehdoja. Kriittisyys pien-
ydinvoimaa kohtaan ei sekään ole aina periaatteellista ja ehdotonta,
vaan riittävä etäisyys mahdolliseen pienydinvoimalaitokseen muuttaa
mielipidettä. Etäisyys pienydinvoimalaan näyttää toimivan eräänlaisena
psykologisena puskurina, mutta myös konkreettisenä asukkaiden
toivomana turvaetäisyytenä.

Kiitokset

Julkaisu on osa Koneen Säätiön (202105388) ja Suomen Akatemian
(351173) rahoittamaa Promises-hanketta.

¹ Pienydinvoimaa koskevat riski- ja turvallisuuskäsitykset ovat sukupuolittuneita. Aiheesta on valmistumassa Niina Kiviluoman sosiologian pro gradu -tutkiel-
ma Jyväskylän yliopistossa. [9]

Viitteet

- [1] Energiategollisuus ry: Suomalaisten energia-asenteet 2022. https://energia.fi/files/7553/Energia-asenteet_2022_FINAL.pdf
- [2] Kojo, Matti, Kiviluoma, Niina, Litmanen, Tapio: Kaukolämpöä pienydinvoimalla? Pääkaupunkiseudun asukkaiden näkemykset osallistumisesta ja päätöksenteosta. *ATS Ydintekniikka 2/2022*. Vol. 51. 2022.
- [3] Kojo, Matti, Kiviluoma, Niina, Litmanen, Tapio, Husu, Hanna-Mari, Mika, Kari, Lehtonen, Markku: Opponents and supporters of SMR. The case of district heating in the Helsinki Metropolitan area. Poster. Open Business Day 2022, 3-4 May 2022, Helsinki. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:juu-202204272433>.
- [4] Lindholm, Petteri: Pienydinvoimat ovat todellisuutta jo muutaman vuoden päästä – selvitimme, millaisiin paikkoihin niitä voitaisiin Suomessa sijoittaa. *Yle*. <https://yle.fi/a/3-12664757>.
- [5] LUT-yliopisto. 2020. Modulaarisia pieniä kaukolämpöreaktoreita (SMR) käytetään Suomessa 2020-luvulla. LUT-yliopisto. <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/modulaarisia-pienia-kaukolamporeaktoreita-smr-kaytetaan-suomessa-2020-luvulla>.
- [6] International Atomic Energy Agency. Lessons learned in regulating small modular reactors. IAEA TECDOC series, ISSN 1011-4289 ; no. 2003. ISBN 978-92-0-124922-7 2022.
- [7] World Nuclear News. 2022. US regulator approves methodology for SMR emergency planning. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-regulator-approves-methodology-for-SMR-emergenc>
- [8] de La Rosa Blul, J.C.: Determination of Emergency Planning Zones and Scaling Acceptance Criteria for Downsized Nuclear Power Plants. <https://cordis.europa.eu/project/id/847553/results> 2021.
- [9] Kiviluoma, Niina. 2023. Sukupuolittuneet riski- ja turvallisuuskäsitykset pienydinvoimaan suhtautumisen rakentajina. Pro gradu -tutkielman käsikirjoitus. Jyväskylän yliopisto, Yhteiskuntatieteiden ja filosofian laitos.
- [10] Sahlberg, Ville. 2023. Ydinkaukolämpö ja sijoittaminen. Helen Oy. Esitys ydinturvallisuusseminaarissa 20.1.2023.

Kirjoittajat



YTT Matti Kojo
Tutkijaopettaja
LUT-yliopisto
matti.kojo@lut.fi



YTK Sarah Tornberg
Tutkimusapulainen
LUT-yliopisto
sarah.j.tornberg@student.jyu.fi



YTT Mika Kari
Tutkijatohtori
Jyväskylän yliopisto
mika.kari@jyu.fi



YTK Anni Vainio
Tutkimusapulainen
LUT-yliopisto
anni.vainio@lut.fi



Professori Tapio Litmanen
Jyväskylän yliopisto
tapio.a.litmanen@jyu.fi



Dr Markku Lehtonen
Tutkija
Universitat Pompeu Fabra
markku.lehtonen@upf.edu

Pienreaktorien tutkimusta McSAFER EU-hankkeessa LUT-yliopiston MOTEL-laitteistolla

Joonas Telkkä, Heikki Suikkanen, Virpi Kouhia
LUT-yliopisto

LUT-yliopiston MOTEL-koelaitteisto mallintaa tyypillistä pientä modulaarista painevesireaktoria, jossa pääkierrovirtaus toimii passiivisesti luonnonkierrolla. MOTEL-laitteistossa on geneerinen reaktorisydänhila ja uudentyyppinen kierreputkihöyrystin. Euratom-rahoitteisessa McSAFER-projektissa laitteistolla on tutkittu kierreputkihöyrystimen toimintaa sekä sydänalueen virtauksia. Tehtyjen kokeiden tuloksena on tuotettu arvokasta validointidataa systeemi-, CFD- ja alikanavakoodeille. LUTissa on myös kehitetty Apros-systeemikoodimallia MOTEL-laitteistosta.

The MOTEL test facility of LUT University represents a prototypical integral pressurized water small modular reactor operating with natural circulation. MOTEL has a generic core rod bundle design and a helical coil steam generator. The facility has been used in the Euratom-funded McSAFER project to study the behavior of the helical coil steam generator and core crossflows. As a result of the performed experiments, valuable validation data has been produced for system, CFD and subchannel codes. In addition, LUT has developed an Apros system code model of the MOTEL facility.

Suomessa [1, 2] ja maailmalla [3] kehitetään nyt aktiivisesti pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR, small modular reactor). SMR on varsin väljä termi ja sen alla markkinoidaan jäähdyteainevalinnoiltaan ja muilta perusratkaisuiltaan erityyppisiä reaktoreita aina 300 sähkömegawatin kokoluokkaan asti. Vaikka pääosa lähitulevaisuudessa toteutuviksi kaavailuista laitoksista perustuu tuttuun kevytvesitekniikkaan, on reaktoreissa useita totutusta poikkeavia suunnitteluratkaisuja ja komponentteja. Laitosten turvallisuus on osoitettava turvallisuusanalyysillä, joihin käytettävät laskentakoodit ja mallit on validoitava laitokselle ja sen järjestelmille oleelliset ilmiöt huomioivista kokeista mitatulla datalla.

McSAFER on syksyllä 2020 käynnistynyt Euratomien rahoittama tutkimushanke, jonka tavoitteena on kehittää kevytvesijäähdytteisten SMR:ien turvallisuusanalyysijä sekä kokeellisen että laskennallisen tutkimuksen kautta. Hankkeessa on mukana 13 organisaatiota, Suomesta LUT ja VTT, ja sitä koordinoi saksalainen Karlsruhen tutkimuslaitos (Karlsruhe Institute of Technology, KIT) [4].

LUT koordinoi hankkeessa termohydraulisiin kokeisiin ja koodien validointiin keskittyvää työpakettia, jossa tehdään kokeita kolmella suurella koelaitteistolla ja hyödynnetään näillä tuotettua mittaustietoa systeemi-, alikanava-, ja CFD-koodien (virtauslaskentakoodien) validointiin. LUTissa kokeita tehdään MOTEL-laitteistolla, josta myös rakennetaan simulointimallia Apros-koodille.

MOTEL-laitteiston perustietoja

LUT-yliopiston MOTEL (MODular TEst Loop) -koelaitteisto mallintaa tyypillistä luonnonkierrolla toimivaa SMR-painevesireaktoria. Laitteistossa on painesäiliö, jonka sisällä toimii primäärijärjestelmänä pieni painevesireaktorin malli. MOTEL-laitteistokokonaisuus itsessään on suunniteltu modulaariseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että laitteisto koostuu vaihdettavista komponenteista eli moduuleista. Kyseinen ratkaisu mahdollistaa laitteiston muuttamisen tarvittaessa mallintamaan erilaisia reaktorikonsepteja. MOTELiin voidaan tarvittaessa myös lisätä komponentteja tai kiertopiirejä.

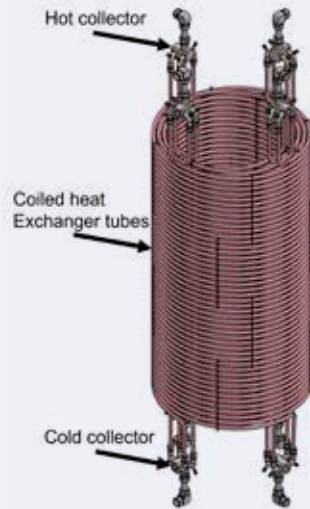
Perinteisestä suunnitteluperiaatteesta poiketen MOTELilla ei ole suora referenssilaitosta, mutta laitteiston rakenne muistuttaa NuScale-tyyppistä SMR:ää, jossa on uudentyyppinen kierreputkihöyrystin [5]. NuScalen reaktori on yksi maailman pisimmälle edenneistä SMR-konsepteista ja se on hiljattain saanut Yhdysvalloissa tyyppihyväksynnän. MOTEL-laitteiston rakenne on esitetty kuvassa 1. Kuvassa voi erottaa painesäiliön muodostavat neljä moduulia: sydänosa, välikappale, höyrystin sekä paineistin. Moduulien sisälle on sijoitettu koko primääripiiri sekä höyrystimen lämmönsiirto-putkisto sekundääripiiriin osalta. Tarkempia teknisiä tietoja laitteistosta on esitetty taulukossa 1.

Monien SMR-konseptien tapaan MOTELin primäärikierto toimii täysin passiivisesti luonnonkierrolla, eli primääripuolella ei ole jäähdytettä



Kuva 1. MOTEL-laitteisto koostuu laippaliitoksilla yhteen kytketyistä moduuleista, joita nykyisessä kokoonpanossa ovat (alhaalta ylöspäin) sydänosa, välikappale, höyrystin ja paineistin. (Vasemmalla)

Kuva 2. MOTEL-laitteiston kierreputkihöyrystin. (Alla)



kierrättäviä pumppuja. Jäähdyte lämpenee sydämessä painesäiliön alaosassa. Lämmennyt vesi virtaa sydänosan yläpuolella riser-putkea pitkin ylöspäin. Paineistimen alapuolella virtaus kääntyy alaspäin rengasmaiseen downcomer-kanavaan, jossa lämpöä siirtyy downcomer-kanavan yläosassa sijaitsevan höyrystimen sekundääripuolelle. Höyrystinputkiston ohittanut jäähtynyt primäärivesi virtaa alaspäin ja laitteiston alaosan kautta takaisin sydämeen, ja kierto alkaa alusta.

MOTEL-laitteisto otettiin käyttöön LUTin Ydintekniikan laboratoriossa vuoden 2020 lopulla. Rahoitus MOTELin suunnitteluun ja rakentamiseen saatiin Suomen Akatemialta sekä valtion ydinjätehuoltorahastolta SAFIR-tutkimusohjelman kautta. Vuonna 2021 laitteistolle tehtiin karakterisoivat kokeet, joissa määritettiin laitteiston paine- ja lämpöhäviöt sekä laitteiston luonnonkiertokäyttäytyminen eri tehotasoilla. Karakterisoivien kokeiden tulokset sekä MOTELin tarkempi rakenne ja suunnitteluperiaatteet on esitetty lähteessä [6].

MOTELin kierreputkihöyrystin

NuScale-reaktorin tapaan MOTELin höyrystin on kierreputkihöyrystin, jollaisen toimintaa ei ole aiemmin tutkittu Suomessa. Höyrystimen käyttäytymisen tutkiminen onkin yksi MOTELin pääasiallisista tutkimuskohteista.

Höyrystin koostuu yhteensä 16 höyrystinputkesta, jotka on jaettu neljään neljän putken ryhmään. Syöttövesi pumpataan höyrystimeen neljän eri kylmäkolektorin kautta. Höyrystinputkien kierrakenteessa puolet putkista kiertävät myötäpäivään ja puolet vastapäivään. Putket kiertävät neljässä eri sisäkkäisessä tasossa, eli höyrystinputkia on neljää erilaista putkipituutta.

Taulukko 1. MOTEL-laitteiston teknisiä tietoja.

Kokonaiskorkeus [m]	7,4
Painesäiliön ulkohalkaisija [mm]	711
Maksimi primääri-/sekundääripaine [bar]	40
Maksimi primääri-/sekundääriämpötila [°C]	250
Höyrystinputkien lukumäärä	16
Sydämen maksimi lämmitysteho [kW]	990
Sauvojen lukumäärä sydämessä, joista	293
lämmityssauvoja	132
mittaussauvoja	16
Sauvojen halkaisija, lämmitys ja mittaus / muut [mm]	19,05 / 18
Sydämen lämmitysosien pituus [mm]	1830

Taulukko 2. MOTEL-laitteiston höyrystimen teknisiä tietoja.

Höyrystinputkien /putkinippujen lukumäärä	16 / 4
Höyrystinputkien ulkohalkaisija / seinämäpaksuus [mm]	15 / 1,0
Höyrystinputkien pituudet [m]	20,0 / 21,7 / 23,4 / 25,1
Kierretasojen halkaisijat [mm]	515 / 560 / 605 / 650
Lämmönsiirtopinta-ala yhteensä [m ²]	17,0

Toisin kuin perinteisesti painevesilaitosten höyrystimissä, kierreputkihöyrystimissä kiehuminen tapahtuu höyrystinputkien sisäpuolella. Syntynyt höyry johdetaan laitteiston ulkopuolelle neljän kuumakolektorin kautta. Höyrystimen rakenne on esitetty kuvassa 2. Höyrystimen tarkempia mittoja ja teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 2.

MOTELin sydän

Termohydraulisisissa integraalikoelaitteistoissa tehoa tuottava sydänosa on perinteisesti suunniteltu korkeaksi ja näin ollen kapeaksi korkeuskalauksen 1:1 säilyttämiseksi. MOTELin sydän suunniteltiin tarkoituksella perinteistä leveämmäksi ja sen vuoksi matalammaksi, jotta sydänalueen teho- ja virtauskäyttäytymistä pystytään tutkimaan myös radiaalisuunnassa.

Reaktorisydänhila on geneerinen. Sydän ei siis mallinna suoraan mitään olemassa olevaa reaktorisydäntä. Lämmityssauvat (132 kpl) on järjestetty sydämessä neliöhilaan. Radiaalisuunnassa sydän on jaettu kuvan 3 mukaisesti kahteentoista lämmitysalueeseen. Jokaisen alueen tehoa voidaan säätää kokeiden aikana erikseen. Kuvassa 3 keltaisella merkityt sauvat ovat mittaussauvoja. Lisäksi sydämessä on 145 kpl täytesauvoja, joiden avulla sydämen hilarakenne on saatu mahdollisimman prototyypiseksi. Aksiaalisesti MOTELin sydämen tehojakauma on viisiportainen mallintaen kosinimuotoista aksiaalista tehojakaumaa.

MOTELin instrumentointi

Termohydraulisia kokeita tehtäessä tuloksia saadaan mittaamalla tärkeitä suureita. Tuotetun koedatan perusteella analysoidaan laitteiston

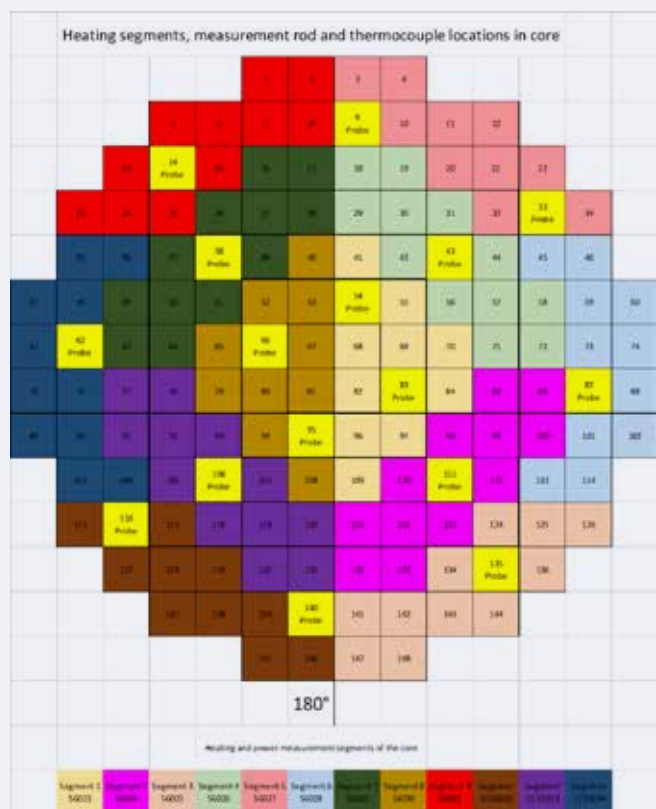
käyttäytymistä ja ilmiöitä. MOTEL on laajasti instrumentoitu koelaitteisto. Lämpötilaa mittaavia termoelementtejä laitteistossa on yhteensä yli 340 kappaletta. Esimerkiksi jokaisessa yksittäisessä höyrystinputkessa on sekundääripuolella viisi lämpötilamittausta eri korkeuksilla. Primääripuolen lämpötiloja mitataan höyrystinalueelta eri korkeuksilla. Sydämessä jokaisessa 16 mittaussauvassa on viisi lämpötilamittausta eri korkeuksilla. Lisäksi jokaisessa lämmitysauvassa on lämpötilamittaus yhdessä viidestä vaihtoehoisesta korkeustasosta.

Lämpötilamittausten lisäksi tärkeitä mitattavia parametrejä ovat teho, paine, paine-ero ja massavirta. Kokeiden aikana painetta mitataan sekä primääripuolella paineistimesta että sekundääripuolella höyrylinjasta. Paine-eromittauksia on sijoitettu primääripuolelle kuuteen eri paikkaan, ja sekundääripuolelle on sijoitettu vastaavasti mittaus kollektorien välille. Massavirtaa mitataan primääripuolen downcomer-kanavan alaosassa kahdella ultraäänivirtausmittarilla. Sekundääripuolella mitataan syöttövesivirtauksen määrää.

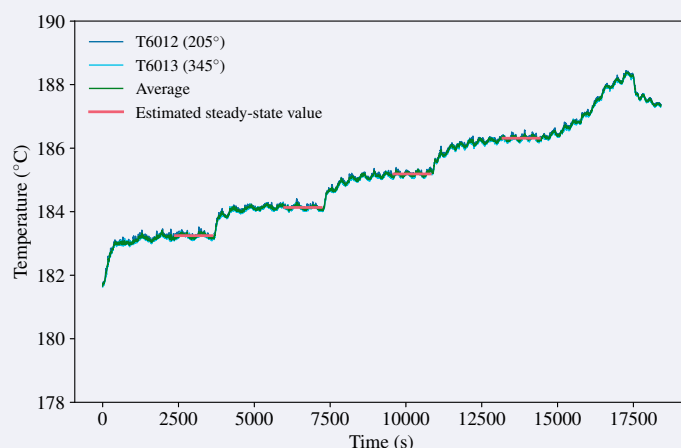
Höyrystimen käyttäytymistä tutkivat kokeet

Kokeellinen tutkimus MOTEL-laitteistolla jatkui vuosina 2021–2022 McSAFER-projektissa, jossa laitteistolla tutkittiin kierreputkihöyrystimen toimintaa sekä sydänalueen virtauskäyttäytymistä.

Ensimmäisessä koesarjassa tutkittiin MOTELin kierreputkihöyrystimen toimintaa eri sydämen tehotasoilla. Laitteistoa ajettiin korkeilla tehotasoilla (250 kW, 500 kW, 750 kW ja 1 MW, joka on MOTELin sydämen suurin mahdollinen lämmitysteho) sekä matalammilla tehotasoilla



Kuva 3. MOTEL-laitteiston sydämen radiaalisuuntaiset lämmitysalueet. Kuvassa eri värit vastaavat lämmitysalueita. Yksi neliö vastaa yhtä lämmitysauvaa, ja mittaussauvat on merkitty keltaisella.

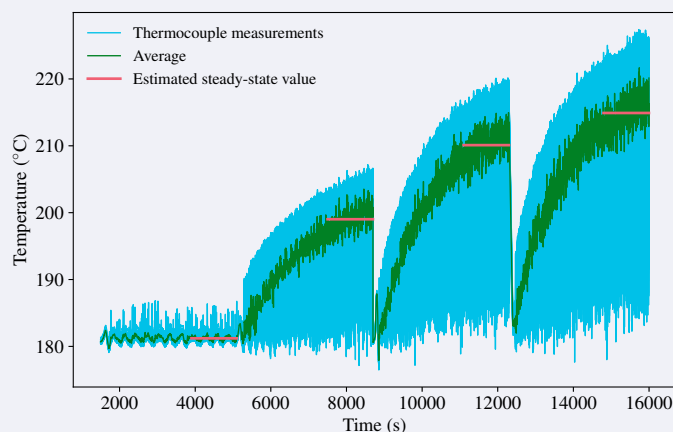


Kuva 4. Höyrystimen primääripuolen yläosan lämpötilat tehotasoilla 75 kW–150 kW.

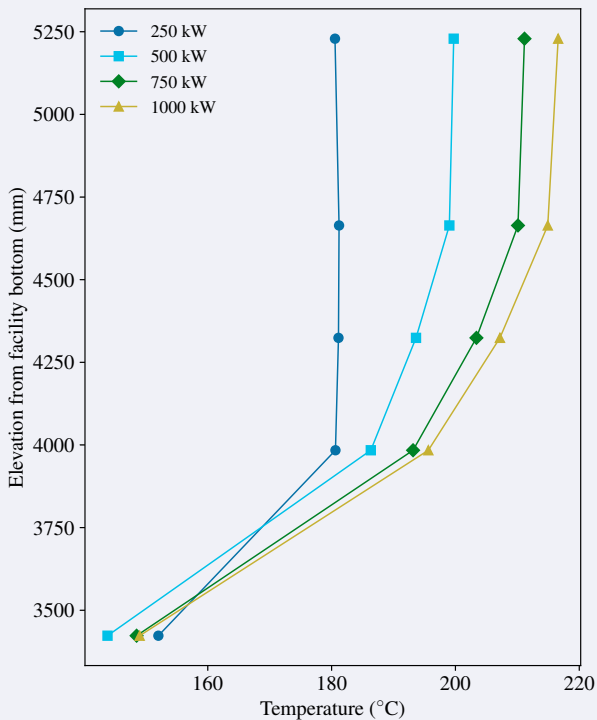
(75 kW, 100 kW, 125 kW ja 150 kW). Kokeissa laitteiston primääri- ja sekundääripaineet pidettiin vakioina: primääripiirin paine pidettiin 35 baarissa ja sekundääripaine 10 baarissa.

Höyrystinkokeissa tutkittiin erityisesti höyrystimen lämpötilakäyttäytymistä niin primääri- kuin sekundääripuolellakin; höyrystinputkien lämpötilajakaumat mitattiin. Höyrystimen lämpötilakäyttäytyminen oli tasaista matalilla tehotasoilla, aina 250 kW:n tehoon asti. Höyryn tulista ei havaittu matalilla sydäntehtotasoilla yksittäisiä höyrystinputkia lukuun ottamatta. Saturaatiolämpötila saavutettiin jo höyrystimen putkien alaosassa kaikilla matalammilla tehotasoilla. Höyrystimen primääripuolen yläosan lämpötilat tehotasoilla 75 kW, 100 kW, 125 kW ja 150 kW on esitetty kuvassa 4. Kuva 4 sisältää kahden lämpötilamittauksen datat, niiden keskiarvon sekä arvioitun stationääritilan arvon kullakin tehotasoilla.

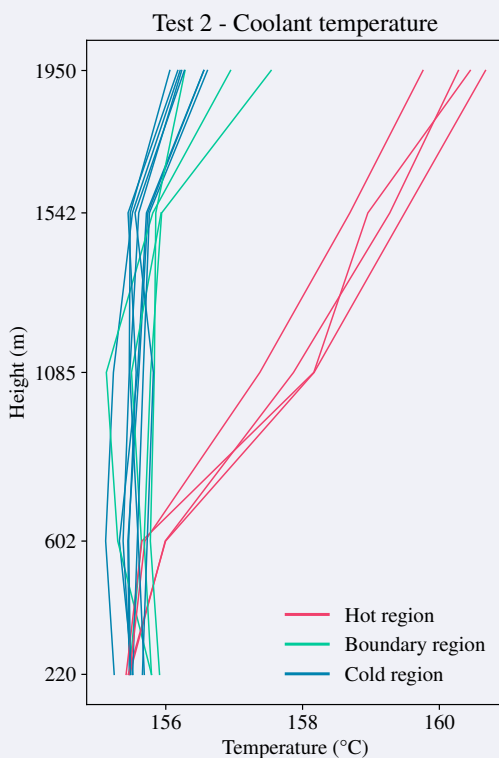
Korkeammilla tehotasoilla laitteiston käyttäytyminen muuttui epästabiiliksi, jolloin lämpötiloissa esiintyi selkeää heilahtelua, kuten kuva 5 osoittaa. Kuva 5 sisältää sekundääripuolen lämpötiladatat tietyllä höyrystimen korkeudella (16 kappaletta mittauksia, yksi mittaus/höyrystinputki), mittausten keskiarvon sekä arvioitun stationääritilan arvon



Kuva 5. Höyrystimen sekundääripuolen lämpötilat tietyllä korkeudella tehotasoilla 250 kW–1 MW.



Kuva 6. Höyrystimen sekundääripuolen aksiaalinen lämpötilajakauma tehotasoilla 250 kW–1 MW.



Kuva 7. Sydämen aksiaalinen tehojakauma eri mittausalueilla (100 % teho keskellä, 0 % muilla alueilla). "Hot region" -mittaukset ovat lämmitetyssä alueessa, "Cold region" -mittaukset lämmitämättömässä alueessa ja "Boundary region" -mittaukset näiden rajalla.

kullakin tehotasolla. Korkeammilla tehoilla varsinaista stationääritilaa ei saavutettu kokeen aikana, vaan lämpötiloilla oli nouseva trendi sekä primääri- että sekundääripuolella.

Yli 250 kW:n tehotasoilla höyrystin myös tulisti höyryä merkittävästi. Kuvassa 6 on esitetty höyrystimen sekundääripuolen aksiaalinen lämpötilajakauma korkeammilla tehotasoilla. Kuvassa esitetään lämpötilamittausten keskiarvot kultakin korkeudelta eri tehotasoilla ja siitä nähdään, että saturaatiolämpötila (10 baarin paineessa 180 °C) ylitetään selkeästi yli 250 kW:n tehotasoilla.

Sydänalueen virtauksia tutkivat kokeet

Toisessa McSAFER-projektin koesarjassa tutkittiin sydänalueen virtauksen sekoittumista ajamalla laitteistoa erilaisilla sydämen radiaalisilla tehojakaumilla. Nämä kokeet tehtiin etenkin alkanavakoodien validointia varten. Kokeiden tavoitteena oli saada aikaan mahdollisimman isoja lämpötilaeroja sydämen radiaalisuunnassa. Ennen kutakin epätasaisista tehojakaumista laitteistoa ajettiin ensin tasaisella tehojakaumalla referenssiolosuhteiden määrittämistä varten.

Ensimmäisissä sydänaluekokeissa laitteistoa ajettiin siten, että sydän oli jaettu radiaalisuunnassa kahteen osaan, joissa kummassakin pidettiin yllä toisistaan eroavat tehotasot. Käytetyt tehot olivat 31 %/16 %, 37 %/10 % ja 48 %/0 % maksimitehosta. Lisäksi tehtiin yksi koe, jossa kahdessa sydämen lämmitysalueessa pidettiin yllä 92 % maksimitehosta ja muissa alueissa nolletehoa.

Seuraavissa kokeissa sydän jaettiin rengasmaisiin tehoalueisiin, joiden tehoa vaihdeltiin. Käytetyt tehojakaumat olivat: 100 % teho keskellä ja 0 % muualla, 100 % keskellä ja 10 % muualla sekä viimeisessä kokeessa 52 % keskellä, 31 % sisärenkaassa ja 10 % ulkorenkaassa.

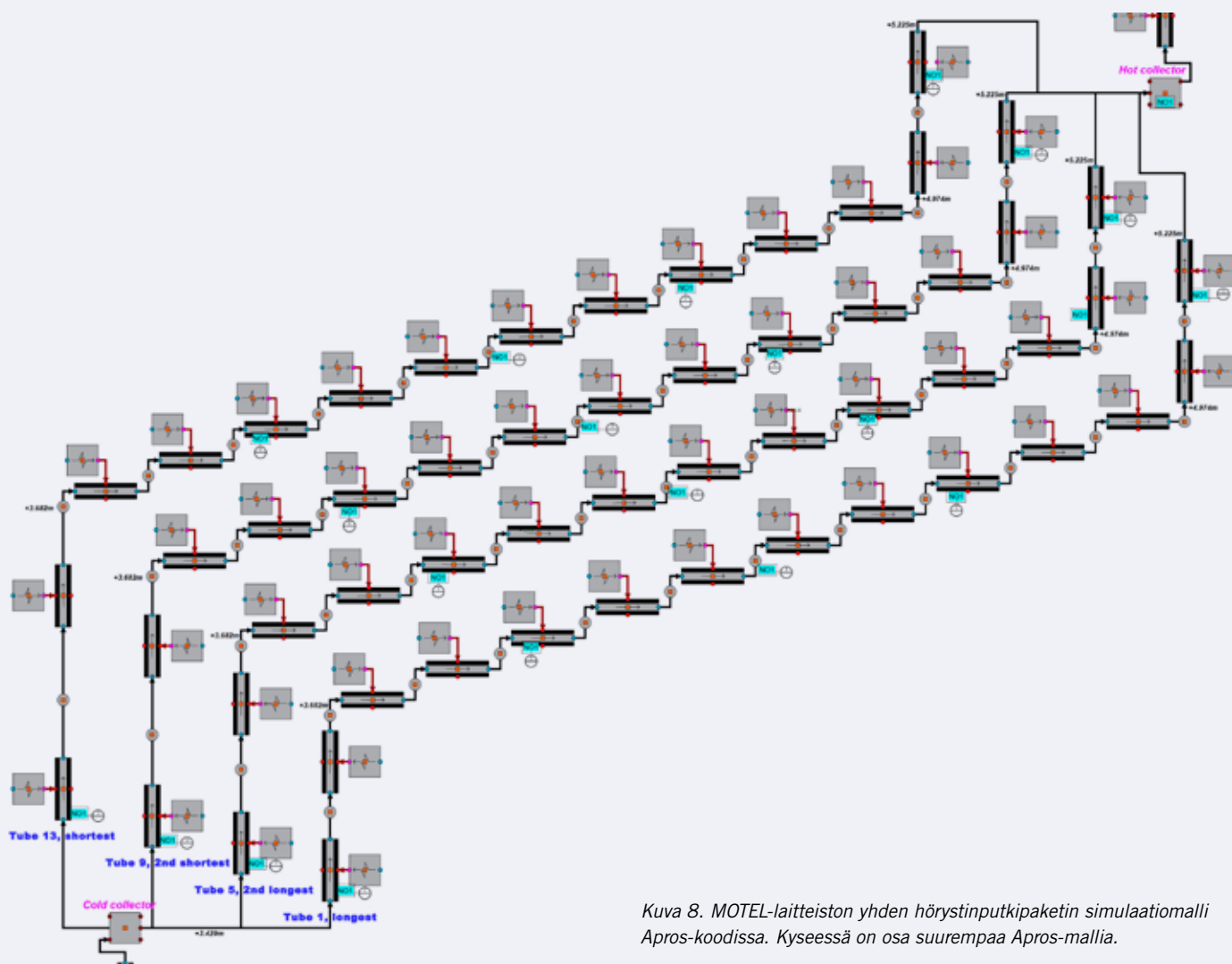
Selvästi havaittavia radiaalisia lämpötilaeroja saavutettiin käytännössä vain suurimmilla käytetyillä tehogradientteilla. Kuvassa 7 on esitetty jäädytteen aksiaaliset lämpötilajakaumat eri mittausauvoissa kokeessa, jossa ainoastaan sydämen keskiosan vastussauvoja lämmitetään 100 % teholla. Kuvasta nähdään, että radiaalisuunnassa on saavutettu maksimissaan muutaman asteen lämpötilaero. Tämän suurempia sydänalueen radiaalisia lämpötilaeroja ei McSAFER-kokeissa saavutettu.

Koodien validointi

McSAFER-hankkeessa kokeita tehdään LUTin lisäksi myös KIT:ssä ja KTH:lla (Kungliga Tekniska Högskolan). Yhdessä laitteistot tuottavat SMR:lle räätälöityä dataa, jota hankkeessa hyödynnetään validoimaan systeemikoodeja kuten Apros ja TRACE, alkanavakoodeja kuten SUBCHANFLOW ja VIPRE, ja CFD-koodeja kuten OpenFOAM ja CFX. MOTEL-kokeiden dataa hyödynnetään höyrystinkokeiden tapauksessa systeemi- ja CFD-koodien ja sydänkokeiden tapauksessa alkanava- ja CFD-koodien validointiin.

LUTissa tehtävä MOTEL-laitteistoon liittyvä validointityö keskittyy Apros-systeemikoodiin, jolle pyritään rakentamaan koko laitteistoa kuvaava ja sen käyttäytymistä luotettavasti jäljentävä malli. LUTin kannalta osatehtävän tärkeimpänä käytännöllisenä päämääränä on saada asiallisesti toimiva laitteistomalli, jota voidaan jatkossa käyttää työkaluna laitteiston tulosten analysoinnin ja koesuunnittelun apuna.

MOTEL-simulaatiomallin kehitys Apros-ohjelmassa alkoi paineastian mallinnuksesta. Paineastiassa oleva primääripiiri on mallinnettu kohtuullisen tarkasti huomioiden laitteiston geometria, mittauspaikat ja yhteys sekundääripuoleen. Sydänosamallissa paineastian alaosassa tehoa tuottava osio koostuu yksittäisestä lämmitävästä vastussauvavalmista. Huomioimalla lämmitysalueiden todellinen lukumäärä saadaan



Kuva 8. MOTEL-laitteiston yhden höyrystinputkipaketin simulaatiomalli Apros-koodissa. Kyseessä on osa suurempaa Apros-mallia.

tällä yksinkertaisella lähestymistavalla kuvattua tehontuotto kokonaisuudessaan. Itse sydänosassa yksityiskohtaisia ja vaihtelevia virtauksia ja virtaustapahtumia ei tietenkään tällaisella systeemikoodimallilla pystytä havainnoimaan.

MOTEL-simulointimallissa paineastiaosioon yhdistettiin aluksi sekundääripiiriin yksinkertainen ”keskiarvoistettu höyrystinputkimalli” kuvaamaan koko höyrystinputkipakettia. Simulointimallin höyrystinputkiston sisäisten virtausolosuhteiden ja lämmönsiirron toiminnan parantamiseksi putkistosta rakennettiin tarkempi simulaatiomalli, jossa on huomioituna höyrystinputkiston jokainen lämmönvaihtoputki erikseen (kuva 8).

Höyrystinmallin avulla voidaan testata esimerkiksi lämmönsiirtokorrelaatioiden soveltuvuutta kierrehöyrystimen lämmönvaihtoprosessissa. Mallinnustyön oleellinen osuus eli mallin toimintakyvyn vertailu edellä mainittuja McSAFER-projektin karakterisoivia kokeita ja varsinaisten höyrystinkokeiden tasapainotiloja vasten on parhaillaan työn alla.

Jatkonäkymät

Koetointi MOTEL-laitteistolla tulee jatkumaan tulevana vuosina LUTin laboratoriossa. SAFER2028-tutkimusohjelman puitteissa jatketaan höyrystimen käyttäytymisen tutkimista. Fokuksena tässä tutkimuksessa tulee olemaan höyrystimen käyttäytymisen stabiilisuusrajojen kartoitus.

Tulevaisuudessa MOTELia voidaan hyödyntää mahdollisuuksien mukaan erilaisissa SMR-reaktoreihin liittyvissä tutkimuksissa. Laitteiston modulaarirakenne mahdollistaa esimerkiksi erilaisten höyrystinkonsepttien tai reaktorisydänten tutkimisen. MOTELiin voidaan myös tarvittaessa lisätä komponentteja kuten erillisiä kiertopiirejä.

Yhteensä viisi eri organisaatiota hyödyntää MOTEL-kokeita laskentakoodien validointiin McSAFER-hankkeessa. Vuoden 2023 alussa eri laskentamallit alkavat olemaan valmiita ja niillä on laskettu ensimmäisiä tuloksia. Kokonaisuudessaan MOTEL-kokeisiin liittyvien koodivalidoitinten odotetaan valmistuvan vuoden 2023 loppuun mennessä.

Viitteet

- [1] T. Truong, H. Suikkanen, J. Hyvärinen, "Reactor core conceptual design for a scalable heating experimental reactor, LUTHER", *Journal of Nuclear Engineering*, 2, 207-214, 2021.
- [2] J. Leppänen, S. Hillberg, V. Hovi, R. Komu, J. Kurki, U. Lauranto, A. Oinonen, J. Peltonen, A. Rintala, V. Tulkki, R. Tuominen, V. Valtavirta, "A Finnish District Heating Reactor: General overview", In *Proceedings of the ICONE-28, Virtual Conference*, 4–6 August 2021.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)", IAEA: Vienna, Austria, 2022.
- [4] V. Sanchez-Espinoza, S. Gabriel, H. Suikkanen, J. Telkkä, V. Valtavirta, M. Bencik, S. Kliem, C. Queral, A. Farda, F. Abéguilé, P. Smith, P. Van Uffelen, L. Ammirabile, M. Seidl, C. Schneidesch, D. Grishchenko, H. Lestani, "The H2020 McSAFER Project: Main Goals, Technical Work Program, and Status". *Energies*, 14, 6348, 2021.
- [5] D.T. Ingersoll, Z.J. Houghton, R. Bromm, C. Desportes, "NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water", *Desalination*, 340, 84-93, 2014.
- [6] J. Hyvärinen, J. Telkkä, K. Tielinen, "MOTEL-SMR integral PWR system test facility – design and first test results", *Proceedings of the 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Brussels, Belgium, March 6-11, 2022.

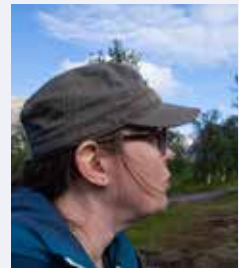
Kirjoittajat



DI Joonas Telkkä
Projektitutkija
LUT-yliopisto
joonas.telkka@lut.fi



TKT Heikki Suikkanen
Tutkijaopettaja
LUT-yliopisto
heikki.suikkanen@lut.fi



DI Virpi Kouhia
Projektitutkija
LUT-yliopisto
virpi.kouhia@lut.fi

Kraken iskee Suomeen

Ville Valtavirta
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

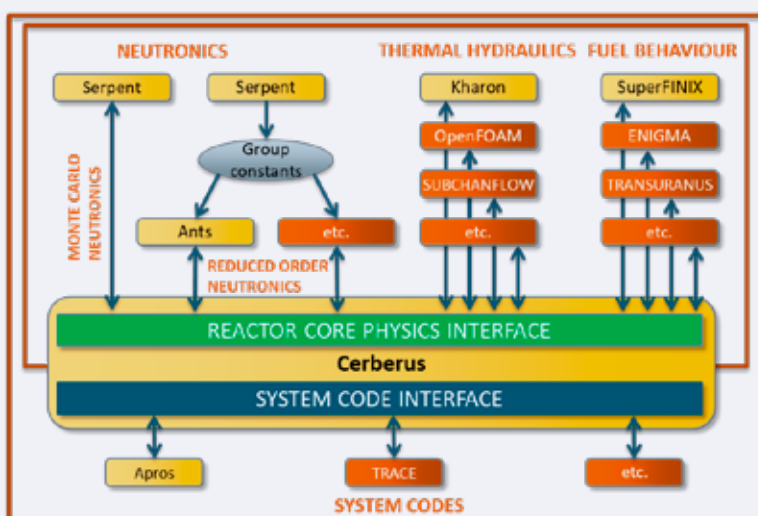
Kraken-laskentajärjestelmää on kehitetty nyt suomalaisen reaktorimallinnuksen avuksi viisi vuotta. Siinä ajassa on valmistunut moderni laskentakoodien yhdistelmä, jota voidaan todennetusti käyttää kevytvesireaktorien käyttöjaksojen ja transienttien mallinnukseen. Krakenin on tarkoitus palvella erityisesti suomalaisten käyvien laitosten varmentavissa turvallisuusanalyysissä, mutta kehityksessä on huomioitu myös tulevat reaktorityypit.

Kraken, a modern Finnish reactor analysis framework, has been developed for safety analyses of Finnish reactors. In five years, the framework has grown from an idea on paper into a system demonstrably capable of light water reactor fuel cycle and transient analyses. In addition to traditional large light water reactors, small modular reactors and advanced reactor types such as high temperature gas cooled reactors are considered in Kraken development.

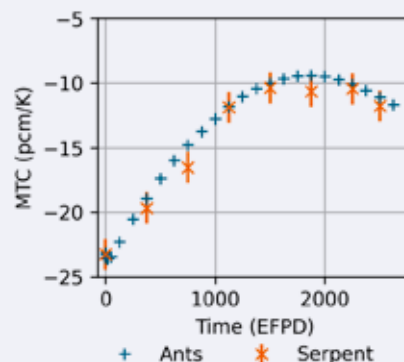
Kraken-laskentajärjestelmän [1] henkiset juuret ovat VTT:n pitkäaikaisessa reaktorimallinnustyökalujen kehityksessä, jonka alku on 1970-luvulla. Tuolloin Loviisaan hankittujen VVER-laitosten mallintamiseen tarvittiin luotettavia työkaluja. Näkyvät juuret sen sijaan lähtevät vuoden 2017 tienoilta, jolloin lähitulevaisuudessa eläköityviä ratkaisijoita – HEXBU3D, HEXTRAN ja TRAB3D – korvaamaan todettiin tarvittavan uusi reaktorisydämen mallintamiseen tähtäävä laskentajärjestelmä. Käyvässä reaktorisydämessä kytkeytyvät toisiinsa neutroniikka, poltto-

ainemallinnus ja termohydrauliikka niin tiiviisti, ettei yhtä voi ratkaista ilman kahta muuta.

Nopeaa neutroniikkaratkaisua varten aloitettiin kehittämään modernia Ants-nodaaliohjelmaa jonka syöttödata lasketaan Serpent Monte Carlo -ratkaisijalla. Polttoaineen mallinnukseen oli VTT:llä kehitetty vuodesta 2013 alkaen FINIX-moduulia ja termohydrauliikkaan päätettiin alkuopettelua varten kirjoittaa yksinkertainen aikariippumaton Kharon-ratkaisija. Lähtökohtana oli siis kokoelma erillisiä mutta moderneja ratkaisijoita. Tavoitteena oli rakentaa lyhyessä ajassa järjestelmä, jota voi käyttää reaktoriturvallisuuden mallintamiseen sekä normaalikäytössä että onnettomuustilanteissa. Tässä onnistuttiin.



Kuva 1. Havainnekuva Kraken-laskentajärjestelmästä. Eri fysiikka-alueiden ratkaisijat kytetään toisiinsa keskeisen Cerberus-komponentin kautta. Keltaiset laatikot kuvaavat VTT:llä kehitettäviä ratkaisijoita, kun taas oranssit viittaavat ulkopuolisiin työkaluihin. VTT on OpenFOAM-projektin kontribuuttori.



Kuva 2. Jäähdytteen lämpötilan reaktiivisuuskerroin 37 nipun pienreaktorissa eri vaiheissa käyttöjaksoa. Tuloksia on käytetty Antsin pienreaktorimallinnuskykyjen varmentamiseen Serpent-referenssiratkaisua vasten [2].

Hyvät ystävät

Yhtenä pohjavaatimuksena käytännön analyyseille oli toimiva yhteispeli eri fysiikkaratkaisijoiden välillä. Neutroniikkakoodin tuottama fissioteho piti kyetä viemään lämmönlähteeksi polttoainemoduuliin ja termohydrauliikkaratkaisijaan, jäähdytteen olosuhteiden perusteella laskettava suojakuoren lämmönsiirtokerroin taas tarvittiin polttoaineen lämpöratkaisun reunaehdoksi. Neutroniikkakoodikin tarvitsi tiedot sekä polttoaineen että jäähdytteen lämpötilasta ja jäähdytteen tiheydestä kyetäkseen huomioimaan niiden vaikutuksen neutronivuorovaikutuksiin ja siten tehojakaumaan. Palama- ja transienttilaskuissa eri ratkaisijoiden piti lisäksi kyetä marssimaan ajassa eteenpäin jokseenkin yhteisenä rintamana.

Eri ratkaisijalonkeroiden hallintaan ja niiden väliseen viestinvälitykseen kehitettiin komponentti nimeltä Cerberus. Kuva 1 havainnollistaa Kraken-laskentajärjestelmän toimintaa: Cerberus on jokaisen erillisen ratkaisijamoduulin paras ystävä ja toimii diplomaattina sovitellen eri ratkaisutapoja toisiinsa. Koska jokainen yksittäinen ratkaisija keskustelee vain Cerberuksen kanssa, pystytään esimerkiksi neutroniikkaratkaisija vaihtamaan hienommasta karkeampaan tai toisin päin ilman että muut ratkaisijat huomaavat.

Modulaarisuudesta on suurta hyötyä sekä laskentaketjuja rakennettaessa että yksittäisiä ratkaisijoita varmennettaessa. Antsin kyvykyys mallintaa pienreaktorisydämiä onkin varmennettu tarkkoja Serpent-laskuja vastaan sekä stationääri- että käyttöjaksomallinnuksessa. Koska termohydrauliikka ja polttoaineratkaisu sekä niihin liittyvä tiedonsiirto pystytään pitämään täsmälleen samana Antsin ja Serpentin kanssa, tiedetään tuloksissa mahdollisesti näkyvien erojen johtuvan pelkästään neutroniikkaratkaisijasta.

Kuva 2 esittää erälle pienreaktorisydämelle käyttöjaksomallinnuksen yhteydessä laskettua jäähdytteen lämpötilan reaktiivisuuserrointa. Kerroin on laskettu eri kohdissa käyttöjaksoa täydellä teholla käyttäen neutroniikkaratkaisijana Serpentia tai Antsia. Termohydrauliikka on ratkaistu Kharonilla ja polttoaineen käyttäytyminen SuperFINIXillä.

Täällä oleville, poissa oleville ja vastakin talohon tuleville

Kraken korvaa VTT:n vanhat, HEXBU3D, HEXTRAN ja TRAB3D -pohjaiset laskentaketjut tämänhetkisten suomalaislaitosten varmentavissa turvallisuusanalyyseissä. Kyvykyyttä pitää siis löytyä sekä nelion että kuusikulmion muotoiseen hilageometriaan perinteisille kevytvesireaktoreille. Krakenin kehityksessä on kuitenkin haluttu huomioida myös tuloillaan olevat reaktoriyyppit kuten pienreaktorit ja korkean lämpötilan kaasujäähdytteiset reaktorit. Nodaalineutroniikkaohjelma Ants on alusta alkaen kehitetty yleisemmäksi neutroniikkatyökaluksi kuin juuri tietyille suomalaisille reaktoreille kehitetyt vanhat nodaalikoodit.

Neutroniikkaratkaisu Antsissa pohjautuu yleisempään moniryhmäneutroniikkaan perinteisen kaksiryhmämallin sijaan ja yleistyy sen vuoksi myös reaktoreihin, joiden ominaisuudet poikkeavat kevytvesireaktoreista. Jäähdytteen virtausta on mallinnettu kevytvesiovelluksiin tarkoitettun Kharonin lisäksi muun muassa OpenFOAMilla ja Aprosilla, joihin voidaan lisätä muita jäähdytteitä koskevia malleja.

Pienreaktorimallinnusta Kraken on päässyt kokeilemaan toden teolla mallintaessaan NuScale-konseptin

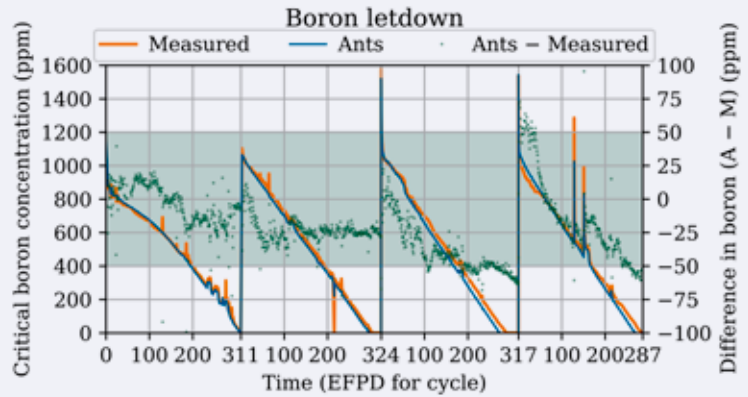
onnettomuustilanteita eurooppalaisessa McSAFER -projektissa sekä käytännön sydänsuunnittelussa ja analyyseissä VTT:n LDR-50-reaktoriprojektissa.

Reaktorin yleisen käyttäytymisen mallintamisen lisäksi Kraken-kehityksessä on keskitytty rajatumpiin sovelluksiin kuten sauvakoh- taisten turvallisuusrajojen täyttymisen arviointiin [3] sekä käytetyn polttoaineen koostumuksen ennustamiseen Antsilla [4].

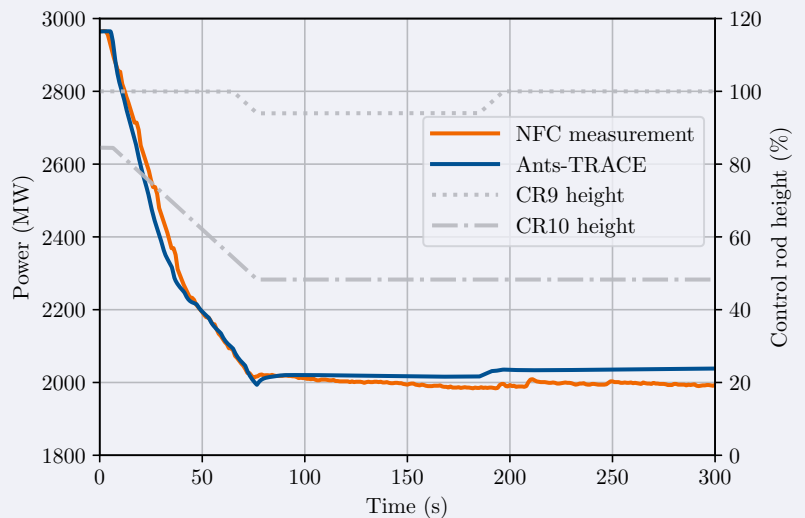
Eikös tätä voisi verrata Khmel'nitskyyyn?

Krakenin kelpoistus päätettiin aloittaa ajankohtaiseksi koetuista isoista VVER-laitoksista, joiden mallintaminen rakentaisi Hanhikivi 1 -reaktoriin liittyvää laskentakyvykyyttä ja -osaamista. Kansainväliset julkiset mitattua laitosdataa sisältävät kelpoistustapaukset keskittyvät VVER-1000-laitoksiin. Krakenilla näistä päätettiin mallintaa kaksi.

Ukrainalaisella Khmel'nitskyn voimalaitoksella otettiin vuonna 2005 kaupalliseen käyttöön uusi VVER-1000-yksikkö (Khmel'nitsky 2), jonka neljästä ensimmäisestä käyttöjaksosta on tuotettu käyttöjako-



Kuva 3. Krakenin (Ants) ennustama kriittinen booripitoisuus Khmel'nitsky 2 -reaktorissa ensimmäisten neljän käyttöjakson aikana verrattuna mitattuihin pitoisuuksiin. Krakenin ennustetarkkuus on hyvä [5].



Kuva 4. Kalinin 3 -reaktorin kokonaisteho ja säätösauvaryhmien liikkeet pääkiertopumpun pysäytyskokeen aikana. Krakenin ennustus (Ants-TRACE) verrattuna mitattuun tehoon. Ennustetarkkuus on mainio [6].

mallinnusta kelpoistava X2-benchmark. Myös venäläisellä Kalininin voimalaitoksella otettiin samoihin aikoihin käyttöön uusi VVER-1000-yksikkö (Kalinin 3), jonka käyttöönottokeissa tehtyyn yhden pääkiertopumpun pysäytykseen perustuu OECD/NEA:n VVER-1000-jäähdytetransienttimallinnusta kelpoistava Kalinin-3-benchmark.

X2-käyttökäytöt mallinnettiin Krakenilla ja laskujen tuloksia verrattiin mitattuun laitosdataan sekä reaktorille rekonstruoituihin tehojakaumiin. Reaktorin kriittinen booripitoisuus neljän käyttökäytön aikana on esitetty Kuvassa 3. Ants-pohjainen laskentaketju ennustaa kriittisen booripitoisuuden hyvin, eivätkä polttoainevaihdot tai vaihteleva teohistoria tuota Krakenille ongelmia.

Kriittisen booripitoisuuden lisäksi X2-datalla kelpoistettiin Krakenin kykyä laskea nipputehokaukia käyttökäytöjen eri vaiheissa sekä käyttökäytöjen alun nollatehokäytöiden mallinnusta. Krakenin ennustetarkkuutta verrattiin muiden vastaavien laskentajärjestelmien kykyyn mallintaa X2-benchmarkia, miltä pohjalta Krakenin tarkkuuden todettiin olevan kansainvälisellä tasolla.

Kalinin 3 -pumpunpysäytyskoetta mallinnettaessa Antsin annettiin ratkaista reaktorin tehokäytöä systeemikoodi TRACEn vastatessa laitostason mallinnuksesta, sydämen termohydrauliikasta ja polttoaineen lämpötilaratkaisusta. Krakenin ennusteita verrattiin jälleen mittadataan reaktorin tehon (Kuva 4) sekä pääkiertoluuppeihin liittyvien mittausten osalta. Ennustetarkkuus todettiin mainioksi.

Vaikka ainakaan VVER-tyyppistä Hanhikivi 1 -reaktoria ei tullakaan Krakenilla jatkossa mallintamaan, Suomesta löytyy yksi painevesireaktori, joka VVER-1000-reaktorin tapaan käyttää sormisäätösauvoja

ja sydämelle teräksistä sivuheijastinta. Nippugeometrian vaihtaminen kuusikulmaisesta neliskanttiseen ei tuota Krakenille ongelmia, joten toivottavasti Kraken pääsee pian näyttämään kyntensä (imukuppin-sa?) Olkiluoto 3:n käyttöönottokeiden ja ensimmäisten käyttökäytöjen mallinnuksessa.

Näillä maailmanmarkkinoilla

Tehtävää, opittavaa ja opetettavaa reaktorimallinnuksen ja sen työkalujen parissa riittää vielä vuosikymmeniksi. Yhtenä haasteena on pitää Krakenin kehitys ja käyttö elinvoimaisena, kun alun suuri kehityspyrahdyks vaihtuu pitkän matkan juoksuksi. Krakenin jakelua laajemmalle käyttäjäjoukolle on suunniteltu alusta pitäen ja valmisteltu vuodesta 2022 lähtien. Tavoitteena on ulkoistaa jakelu ei-kaupalliseen käyttöön suurille kansainvälisille toimijoille, OECD/NEA:n datapankille ja pohjois-amerikkalaiselle RSICC:lle.

Ennen lapsen lähettämistä maailmalle sopii siistiä ulkoinen olemus ja harjoitella kansainvälisiä käytöstapoja. Jaeltavien ohjelmien irtonaiset langanpäät päätellään ja mukaan kirjoitetaan aloittelijaystävälliset ohjeet, jottei mahdollinen tuleva käyttäjä Krakenin kohdatessaan kavahda kauemmas vaan suostuu syleilyyn.

Kehitystyössä keskitytään seuraavaksi esimerkiksi VVER-440-reaktorien säätösauvamalleihin sekä kiehutusreaktorien termohydrauliikan ja säätösauvahistorian mielenkiintoisiin kysymyksiin. Krakenin kelpoistus kohdistetusti suomalaisten laitosten turvallisuusanalyysiin on urakka, jonka parissa tehdään myös töitä lähivuosina.

Viitteet

- [1] J. Leppänen et al., "Current Status and On-Going Development of VTT's Kraken Core Physics Computational Framework", *Energies* 15 (2022).
- [2] V. Valtavirta, R. Tuominen, "A simple reactor core simulator based on VTT's Kraken framework", *proceedings of ANS M&C 2021, Raleigh, North Carolina (virtually), October 3–7, 2021*.
- [3] R. Tuominen, V. Valtavirta, "BEAVRS pin-by-pin calculations with Ants-SUBCHANFLOW-SuperFINIX code system", *Annals of Nuclear Energy* 180 (2023).
- [4] T. Kähkönen, "Calculating spent nuclear fuel composition for secondary nuclear safety analyses using nodal diffusion neutronics", Department of Applied Physics, School of Science, Aalto University, submitted for grading (2023).
- [5] V. Valtavirta, A. Rintala, "Validating Kraken for VVER-1000 fuel cycle simulations using the X2 benchmark", submitted to *Annals of Nuclear Energy* (2023).
- [6] U. Lauranto et al., "Validation of the Ants-TRACE code system with VVER-1000 coolant transient benchmarks", submitted to *Annals of Nuclear Energy* (2022).

Kirjoittaja



TkT Ville Valtavirta

Erikoistutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

ville.valtavirta@vtt.fi

Diplomityö: Riskitietojärjestelmän kehittäminen ydinvoimalaitosten viranomaisvalvonnan tueksi

Teemu Soukki
Säteilyturvakeskus

Diplomityössä tutustuttiin, kuinka todennäköisyysperustaista riskianalyysia (PRA, Probabilistic Risk Assessment) voidaan hyödyntää ydinvoimalaitosten viranomaisvalvonnassa. Lisäksi työssä kehitettiin järjestelmä, jota Säteilyturvakeskus (STUK) voi hyödyntää sisäisen riskitietoisuuden kehittämiseksi sekä viranomaistarkastusten kohdentamiseksi. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksena toteutetun laadullisen tutkimuksen PRA:n hyödyntämisestä riskiviestintään sekä kuvauksen STUKille kehitetyn riskitietojärjestelmän toteutuksesta. Kirjallisuuskatsauksessa tutustuttiin useaan ydinvoima-alan organisaatioon, joissa vastaavia järjestelmiä on jo käytössä.

In this thesis, it was assessed how Probabilistic Risk Assessment (PRA) can be used to support the regulatory control of nuclear power plants. In addition, a system was developed that the Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) can use to develop internal risk awareness and target regulatory inspections. The work includes a literature review on the use of PRA for risk communication, as well as a description of the implementation of the risk information system developed for STUK. As part of the literature review several organizations in the nuclear power industry, where similar systems are already in use, were assessed.

Ydinvoima on ollut perinteisesti hyvin kiistelty aihe. Sen vastustajat vetoavat tyypillisesti siihen liitettäviin riskeihin. Ydinvoima on kuitenkin tutkimusten mukaan varsin turvallista ja jopa säästää ihmishenkiä korvatessaan fossiilista energiantuotantoa [1]. Ydinvoiman voidaan siis sanoa kärsivän imago-ongelmasta, joka on ainakin osittain vääristyneen riskikäsityksen seurausta. Onnistunut riskiviestintä varmistaa, että ydinvoimasta käytävä yhteiskunnallinen ja poliittinen keskustelu perustuu tosiasioihin.

PRA ja riskiviestintä

Riskiviestintä voi olla organisaation sisäistä tai ulkoista viestintää. Kummallakin on ydinvoiman tapauksessa tärkeä tehtävä. Viranomaisen sekä alan toimijoiden ulkoinen viestintä vaikuttaa kansalaisten suhtautumiseen ydinvoimaan. Organisaation sisäisellä riskiviestinnällä taas pyritään lisäämään ymmärrystä ydinenergian käyttöön liittyvistä riskeistä sekä edistämään turvallisuuden hallintaa.

Organisaation sisäinen viestintä voi vaihdella sisällöltään. Organisaation sisällä on erilaisia vastuita, joten dataan ja informaatioon liittyvät intressit voivat olla hyvin erilaiset. Datan ja informaation esitystapaa voidaan muokata sopivaksi joko laajalle yleisölle, kuten koko henkilöstölle tai kohdistetusti tietyille henkilöstöryhmille [2].

Todennäköisyysperusteinen riskianalyysi eli PRA on muun muassa ydinvoiman valvonnassa käytetty analyttinen menetelmä. Menetelmässä tarkastellaan turvallisuudelle tärkeiden laitteiden, järjestelmien toimintojen ja ihmisen toimintojen luotettavuutta tilastollisin ja todennäköisyyspohjaisiin menetelmin. PRA:n avulla tunnistetaan laitoksen tärkeimmät riskitekijät ja sitä voidaan käyttää apuna ydinvoimalaitoksen suunnittelussa sekä kehittämisessä. PRA:n hyödyntäminen koulutuksessa parantaa laitoksen henkilökunnan asiantuntemusta laitoksesta.

PRA jaetaan kolmeen onnettomuuden etenemistä seuraavaan tasoon, joista Suomessa vaaditaan kaksi ensimmäistä. Ensimmäisellä tasolla tarkastellaan reaktorisydämen vaurioitumiseen johtavat tapahtumaketjut ja niiden todennäköisyydet. Toisella tasolla tarkastellaan onnettomuustilanteessa karkaavien radioaktiivisten päästöjen todennäköisyyttä, suuruutta ja ajankohtaa. Kolmannella tasolla tarkastellaan radioaktiivisten päästöjen aiheuttamaa riskiä ihmiselle, ympäristölle ja omaisuudelle.

PRA:n tuloksia, tietoja ja kuvaajia voidaan käyttää hyväksi muun muassa esityksissä, kokouksissa tai koulutuksissa. Riskitietoa voi ja kannattaakin jakaa useista lähteistä, esimerkiksi organisaation sisäisissä tiedotteissa tai lehtisissä. PRA-informaation jäsentäminen viestintään voi kuitenkin olla haastavaa ja sen riittämätön ymmärrys saattaa johtaa väärinkäsityksiin [2, 3].

Kuva 1. Näkymä diplomityössä kehitetyn riskitietojärjestelmän etusivulta.

Riskitiedon hyödyntäminen

Oikein kommunikoituina PRA-informaatio auttaa kehittämään sekä turvallisuuskulttuuria että riskitietoisuutta, mikä puolestaan vaikuttaa positiivisesti laitoksen turvallisuuteen ja käyttöasteeseen. Sen vuoksi tietojen jakamisen tulisi olla mahdollisimman sujuvaa ja siihen käytettävät menetelmät mahdollisimman helposti tulkittavissa. PRA-dokumentaatio on kuitenkin kokonaisuudessaan liian laaja ja käyttää liian paljon alalle spesifiä terminologiaa, jotta sitä voisi hyödyntää ilman laajaa koulutusta riskianalysista.

Useissa maailmalla toimivissa ydinvoima-alan organisaatioissa on kehitetty toisistaan riippumattomia PRA:ta hyödyntäviä riskiviestintään tähtäviä ohjelmia. Riskitietoa hyödyntäviä sovelluksia löydettiin ainakin:

- Internal Risk Data Tool (NRC, Yhdysvallat)
- Barometer 2022 (IRSN, Ranska)
- The Risk Handbook (CNSC, Kanada)
- Risk Information Handbook (NRA, Japani)
- SIAPS (CSN, Espanja)
- Fire PRA Wiki (EPRI, Yhdysvallat).

Järjestelmistä on huomattavissa, että erityisesti tulosten esittäminen graafisessa muodossa ja yksinkertaistetut kuvaukset alkutapahtumista

ovat yleisesti käytössä olevia keinoja viestiä ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta todennäköisyysperusteisesta näkökulmasta, kun viestinnän kohteena on ydinvoima-alan asiantuntija ilman erityistä PRA-taustaa. Projekteissa ongelmiksi tunnistettiin muun muassa järjestelmän ylläpidon vaikeudet, tietoturvaohuudet sekä luvanhaltijoiden epäyhtenäinen lähestymistapa PRA-dokumentaatioon.

PRAIS – Käytännön toteutus

PRAIS (PRA Information System) on riskitietojärjestelmä, joka on kehitetty STUKille osana diplomityötä. Järjestelmä kehitettiin parantamaan STUKin tarkastajien riskitietoisuutta hyödyntäen PRA:n tuloksia. PRAIS sisältää PRA:n keskeiset tulokset graafisessa muodossa, yksinkertaisen kuvauksen oleellisimmista alkutapahtumista, päätulosten kehityksen viimeiseltä kymmeneltä vuodelta, laitospohjaisen kuvauksen turvallisuustoiminnoista sekä yleisen kuvauksen PRA:n sisällöstä ja käyttö-tarkoituksista.

Sovellus johdattaa käyttäjän oppimaan perusteet PRA:sta ja hyödyntämään sitä työssään ja päätöksenteossa. Järjestelmän tarkoitus on ainoastaan tiedonjakaminen, joten sen sisällä ei ole mahdollisuutta suorittaa laskentaa. Laskentaa varten STUKilta löytyy vaihtoehtoisia sovelluksia kuten FinPSA ja RiskSpectrum.

Järjestelmä toimii Siemensin Polarion-ympäristössä ja se luodaan pääasiassa voimalaitostoimijoiden toimittamien PRA-aineistojen pohjalta. Polarion valikoitui alustaksi, sillä se on ollut STUKin käytössä jo entuudestaan, eikä siten vaadi ylimääräistä koulutusta. Järjestelmä on kehitetty olemaan mahdollisimman yhdenmukainen edellisten Polarion-projektien kanssa, jotta käyttäjä voi keskittyä olennaiseen. Polarion tarjoaa sivujen muokkaamiseen useita valmiita työkaluja, mutta tarpeen vaatiessa se mahdollistaa myös omien työkalujen kehityksen. Näkymä järjestelmän etusivulta on esitetty kuvassa 1.

Suurimman haasteen projektissa muodosti luvanhaltijoiden toimittama dokumentaatio ja data, joka ei ole keskenään yhtenäisessä muodossa. Ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet) on annettu vaatimukset siitä, mitä PRA:n tulee sisältää, mutta ei tarkkaa formaattia, jonka mukaan tulokset tulisi esittää. Järjestelmän päivittäminen

kuitenkin vaatii datan löytyvän vakioidusta taulukkorakenteesta, kun tiedot siirretään Polarioniin. Tiedot, joita ei ole pääsääntöisesti tarve päivittää vuosittain, kuten alkutapahtumakuvaudet, tapahtumapuut sekä onnistumiskriteerit, siirretään PRA-dokumentaatiosta Polarioniin manuaalisesti.

Yksi työn kannalta tärkeimmistä tavoitteista oli päivittämisen pitäminen yksinkertaisena ja siinä pääsääntöisesti onnistuttiin. Päivittämistä varten laadittiin käyttäjänopas, joka tarjoaa tarvittavat tiedot FinPSA-sovelluksesta sekä PRA-dokumentaation rakenteesta. Polarionin puolelta vaadittava päivitystyö on erittäin vähäistä ja suurin osa päivittämisen työkuormasta tapahtuu Excelissä ja FinPSA-sovelluksessa.

Opinnäytetyö on hyväksytty 20.3.2023 Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulussa.

Viitteet

- [1] P. A. Kharecha ja J. E. Hansen, "Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power", *Environmental Science & Technology*, pp. 4889-4895, 15 March 2013.
- [2] G. Apostolakis, A. Mosleh ja T. Zama, "Risk-Informed Decision Making: A Survey of United States Experience", University of California, Los Angeles, 2017.
- [3] A. Isolankila, M.-L. Järvinen, R. Keskinen, I. Niemelä, M. Ojanen, R. Rantala, J. Sandberg, P. Tiippana, K. Valtonen, R. Virolainen ja K. Åstrand, "Ydinturvallisuuden varmistaminen", *Ydinturvallisuus*, Helsinki, Säteilyturvakeskus, 2004, pp. 90-142.

Kirjoittaja



DI Teemu Soukki
Säteilyturvakeskus
teemu.soukki@stuk.fi



ATS

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

JÄSENHAKEMUS - MEDLEMSANSÖKNING

Täydellinen nimi _____
Fullständig namn _____

Kotipaikkakunta _____
Hemort _____

Sähköpostiosoite _____
E-mail _____

Jakeluosoite _____
Postadress _____

Postinumero ja -toimipaikka _____
Postnummer och adressort _____

Syntymävuosi _____ Puhelinnumero _____
Födelseår _____ Telefonnummer _____

Opinnot ja suoritettut tutkinnot - Studier och avlagda examina

Nykyinen toimipaikka ja tehtävä tai virkanimike - Nuvarande tjänst och uppdrag eller yrkesbenämning

Aikaisempi toiminta - Tidigare verksamhet

Hyväksyn, että nimeni ja toimipaikkani julkaistaan ATS:n kotisivulla.
Henkilötietojen käsittelyä koskevan henkilötietolain 24§:n tarkoittama informaatio on saatavilla seuran sihteeriltä.

Paikka, aika ja allekirjoitus _____
Ort, datum och underskrift _____

Suosittelijat (nimikirjoitus ja selvennys) _____
Förordarna (namnteckning och förtydligande) _____

Hyväksytty Johtokunnassa _____
Godkänt av Direktionen _____

Kutsu lähetetty _____
Kallelse sänd _____

Työllä turvallisuutta

”O LI ENNEN HELPPOA! Riitti kun osasi ja ymmärsi Neuvostoliittoa. Sillä pärjäsi.” Kuka tällaista oikein on voinut mennä sanomaan? Vaiko sittenkään kukaan? Sanat toki voisivat olla presidentti Juho Kusti Paasikiveltä. Hänhän läksytti Suomen kansaa tunnustamaan ja tunnustamaan realiteetit: ”Tosiasiainn tunnistaminen on kaiken viisauden alku.” Vaan ei Paasikivi nyt tuollaista. Ei ainakaan hänen päiväkirjansa. Ja ne hän eivät valehtelee, musteella enimmiltä osin kirjoitetut jo pelkästään uskottavuussyistä. Sitä paitsi moinen viisaus olisi Paasikiveltäkin vaatinut vähintään useiden kymmenien vuosien jälkiviisautta ja hän sentään eli 86-vuotiaaksi. Tänäpäinhän Paasikivi olisi 152-vuotias, jos eläisi.

Sen sijaan Paasikiven jälkeläinen kolmannessa polvessa, evl ei vielä evp Joakim Kusti Paasikivi, Ruotsin ja Suomen kansalainen, tänä päivänä jotain tuollaista suvun salat syvällisesti tuntevana voisi kai sanoakin. Ruotsiksi tosin, koska ei suomea puhu, sitä paitsi ehkä sopivassa määrin ”ruotsittuneenakin”, olemuksessaan sulavaa ”ruotsalais-palmemaista” osaamista ja itsevarmuutta. Helppohan sitä on huudella, kun on Suomi välissä ja Nato selkänöjana. Ruotsin ja madame Kollontayn pappi Paasikivi hyvin tunti jo suurlähettiläsajoiltaan Tukholmassa ja paremminhan hän itsekin ruotsia osasi kuin suomea, se hänen puheestaan kuului läpi. Nuo itsenäisen Suomen varhishistorian suomenruotsalaiset hahmot ovat itse asiassa olleet hyvinkin uskottavia julistaessaan päätospäissään vakuuttavan hitaasti suomeksi. Mannerheim oli samanlainen. Ja rahvas uskoi ja totteli.

MUTTA ENTÄPÄ JOS AIKALAISET presidentti Paasikivi ja pääministeri Kekkonen olisivat jollain presidentinlinnan kahdenkeskisellä illallisella sen pitkälle venähtäneessä kahvi- ja konjakivaiheessa oivaltaneet, kuinka edetä Suomen turvallisuusstrategiaassa? Kyse on fiktion perustuvasta ”entä jos”-historiasta, jota historia-tieteessä myös kontrafaktuaalisesti historiankirjoitukseksi mainitaan. Salaliittoteoriatkin sekaan mahtuvat, kukapa toiset tarinat toisistaan erottaa? Mikäpä avuksi fiktiopulmassani kuin toisen apu. Soitin taiteilijaystäväälle, kerroin pulmastani ja kyselin häneltä, keksisikö hän, kuinka voisi siirtyä aikamatkalla Suomen sotien jälkeisestä ajasta nykyaikaan. Ja hänpä piirsi ”yhteistyö- ja taistelijaparin” katsomoon ylös pilvenreunalle.

Siitä olikin sitten hyvä jatkaa materiaalin keruussa pakinaani. Äskeisen ystävänpäivän

lounaalla Kallion kulmilla alustin ja testasin fiktiivistä ”entä jos”-historiatarinaani itseäni viisaampien seurassa. Meitä oli kahdeksan hengen pöydällinen jo eläköityneitä kansakunnan kynttilöitä, ei vielä loppuun palaneita, joukossa evp-kenraalikin. Pöytäpaneeli ryhtyi pohtimaan ja analysoimaan teoriaani.

Verrattiin vuoden 1948 YYA-sopimuksen neuvotteluprosessin aikaa ja nykyistä Natoon pyrkimisen aikaa. Paneeli näki menneen aikakauden nykyistä vaarallisemmaksi vaiheeksi itsenäisen Suomen turvallisuudelle ja vapaudelle. Mielenkiintoista: menneisyys oli vaarallista mutta koettiin silloinkin turvalliseksi. Nykyisyys EU:n jäsenmaana on turvallista, mutta myös suurta epävarmuutta ja laajaa, vaikeasti määriteltävää turvattomuutta koetaan. Erityisesti paneeli kiitteli Suomen ”herra- ja rouvaonnea”.

Yllättävän saman suuntainen kollektiivinen mielipide oli, että suomalaista ja länsimaista ymmärrystä ja osaamista venäläisestä sielunmaisemasta ja historiakäsityksestä pidettiin epätasapainoisen vinoutuneena. Tarvittaisiin paljon lisää laadukkaan syvällistä Venäjän sisältä tulevaa ajan tasalla olevaa realitietoa. Mutta eipä lounaskeskustelusta tässä enää enempää.

Itsekseni tosin olin hieman yllättynyt paneelin varsin suoraviivaisista mielipiteistä; ilman muuta mielenkiintoisia ja näkökulmia avartavia kuitenkin nämä yhteisölliset lounaat herkullisia blinejä maistellessa ja menneitä muistelllessa, joten lämpimästi suosittelen. Putinin sodan lopputuleman ennustamiseen paneeli ei kuitenkaan analyseissään ryhtynyt, ellei sitten sellaisesta nyökkäilyksi voi nähdä sitä, että vain jatkuessaan ja jatkuessaan sota lopulta päättyy siihen, että Ukrainalta sotilaat loppuvat mutta Venäjältä ei. Niin sitten blinit muikunmäädillä (K-kaupan hinta 235 €/kg!) tuli syötyä ja väki poistui tulevaisuuteen ajatuksella, että tavataan taas.

PAKINOIDESSANI VIIMEKSI ATS Ydintekniikan numerossa 3/2022 jo visioin, kuinka Suomessa tarvitaan opettelemista ja oppimista ja uuden harjoittelemista ja harjoittamista ulko- ja turvallisuus-, energia- ja ilmastopolitiikassa. Eikä tietysti riitäkään: samaa tarvitaan myös teollisuus-, ympäristö-, metsä-, maatalous-, liikenne-, kauppa-, koulutus-, urheilu-, sosiaali-, terveydenhoito-, uskonto- ja identiteettipolitiikassa ja melkeinpä minkä tahansa alan ja aihepiirin politiikassa, lyhykäisestään vain politiikassa.



Näin on, kun eletään outoja ja uudenlaisia aikoja. Muistan menneiltä lähivuosilta, kuinka Suomen lukuisat eri Mikat (Salmela, Rämetsä, Aaltola, Lintilä, Niikko, Hentunen, ...) ja vielä useammat ei-Mikat ovat ohjeistaneet ja ohjastaneet meitä suomalaisia menneestä tulevaan aikaan vakuuttelemalla, että kyllä tästä koronasta yhdessä selvittään ja ei tämä Nato-juttu nyt niin kovin iso juttu ole verrattuna EU:hun menoon. Niinpä. Sellaistahan kaikki on siirtymävaiheessa, rauhoittelua uuden edessä, myös epä tietoisuutta ja neuvottomuutta, uskoa tulevaan valamista.

Se vain, että ”kompakti pohjoinen pelikenttä” on nopeasti ja suorastaan lamaanuttavan yllättäen laajentunut ”globaaliksi maailmanlaajuiseksi pelikentäksi”, jossa pelaajia ja intressitahoja on ruuhkaksi asti, eikä pelistäkään saati sen säännöistä ole sen enempää tietoa. Ihan sitä haikueudella muistelee neljän maalin peliä kansakoulun pihalla kerran, kuinka se oli silloin jännää ja vaikeaa.

POLITIIKKOJEN LITANIA edellä kertoo suomen kielen varsin harvinaisuuslaadusta ja haasteellisesta ominaisuudesta, nimittäin yhdysnanon kieliopista ja kirjoitussäännöistä. Grönlannin eskimoiden kielelle se pitkissä sanoissa kylläkin häviää ja varmaan parempikin niin. Monesti jokin monimutkainen asia kirjoitetaan yhdysnanon kokonaisuutena. Sanoja vain kirjoitetaan peräjälkeen yhteen, teknisessä mielessä rajattomasti, mutta käytännössä pahimmoillaan kuusi-seitsemän sanaa, pari-kolme-neljäkymmentä kirjainta.

Suomen tunnetuin mamu-maahanmuuttaja Roman Schatz, hämmästyttävän täydellisen



puhdasta suomen kieltä taitava, vastasi kerran haastattelijan kysymykseen: mikä oli Suomeen tullessa alussa vaikeinta suomen kielessä? ”Rakastunut kun oli, kieli kuulosti soljuvan kauniilta kuin puroveden pulputus, mutta eipä siinä tiennyt, missä yksi sana loppui ja toinen alkoi”. Kaunein suomen kielen sana Schatzin mielestä on ”syyttämättäjäntämispäätös” – ehkä siksi että hänellä sellainen on oikeudelta saatuna?

Olen viime aikojen uutisoinnissa paitsi turtunut, turtunut kuin myös turhautunut uskoyhään sanojen käyttöön. Poliitikan lisäksi on milloin sotaa, kriisiä, ym. Siihen vaan sopiva määräesubiintiivi eteen ja uutisaihe on siinä. On kauppasotaa, kulttuurisotaa, kulutussotaa, on ilmastokriisiä, energiakriisiä, sähkökriisiä, maahanmuuttokriisiä, jne. Samalla kuin perussanan merkitys tylsistyy samaksi harmaaksi mössöksi, muut ilmaisukykyisemmät ja erityismerkittävät perussanat vähenevät ja lopulta ehkä katoavat kielestä. Harmi!

Jos ei muuta niin murre sanoja kehiin, niissä on ilmaisuvoimaa! Roman Schatzia tämäkin: oli opittava kaksi kieltä, suomen kirjakieli ja stadin murre: moottoripyörätakki tai prätkärotsi. Mutta määräesubiintiivikin kärsivät tai saattavat pahimmillaan kärsiä, kun kauppa, kulttuuri ja kulutus ikään kuin nekin ovat sodassa tai mielletään olevan sodassa ja joskus vielä keskenään.

Näitä suomen kielen outouksia toisinaan, kun ääneti itsekseni mietin Ylen Areenan podcastin ESMOO (En sano mitään mutta outoa on) lailla, nuoriso se noilla lyhenteillä tyyppiä EVVK itseään kun kiireissään ilmaisee. Ja tie-de myös ja teollisuus, eipä silti. Onhan meillä

ydinenergia-alalla esimerkilyhenteinä hienot lyhenteet ALARA ja SAHARA: meille selkeät, muille hepreaa.

MUTTA SITTEN TODELLA RIEMASTUIN, kun kerran sattumalta päädyin kovin heterogeeniseen seuraan eri ikäistä väkeä eri ammattialojen miehiä ja naisia. Oli tieteen ja taiteen väkeä, kovasti osaavia ammattilaisia. Tälläkin kerralla kyse oli lounastauosta kuuden hengen porukalla. Muut enemmänkin kuuntelivat ja harvakseltaan keskeyttivät kommentoimaan, kun hän ja minä vuoropuhelimme, minä perheellinen insinööri mies ja hän sinkkulääkäris-nainen, eläkeläisiä kumpainenkin.

Puhuttiin työstä. Ja kovasti radikaalisti eri näkökulmista ja työn määritelmistä. Mutta pelkistetysti: hän näki työn olevan vain palkkatyötä, minä en pelkästään. Tai toisin päin: vain palkkatyö on työtä, muu työ ei ole työtä. Olihan meillä pöytäseurueella keskustelu välillä kovinkin hauskaa ja välillä hyvin vakavaa. Ja tiukkaa teki, että siinä me kaksi ehdimme ylipäätään saada lautasen tyhjäksi. Ja sitä enemmäksi parhaaksi lounastauko onneksi päättyi ja tilaisuus jatkui salissa.

Keskustelukumppanini keskustelun avaus oli eläkeläiseltä eläkeläiselle luonnollinen ja harmiton kysymys: ”Vieläkö olet töissä?” Kun vastasin, etten enää, hän siihen, että hän vielä on, käy silloin tällöin junalla Lahdessa pitämässä vastaanottoa. Ja siihen perään pamautti, että vain palkkatyö on työtä.

Ehkäpä yllättävät keskustelun aiheet juuri synnyttävät parhaat kehukset spontaanin rai-lakkaalle mielipiteenvaihdolle? Minä päätin provosoitua pitämään minuutin luennon erilaisista mieleeni tulleista palkka- ja palkattomista töistä tyyliin: on yhteistyötä, työttömyystyötä, työllistämistyötä, työtyötä, yötyötä, päivätyötä, vuoro-työtä, kirjoitustyötä, sävellystyötä, laulamistyötä, keikkatyötä, harrastustyötä, vapaaehtoistyötä, palvelutyötä, hoivatyötä, hoitotyötä, perehdyt-tämistyötä, opetustyötä, (varhais)kasvatustyö-tä, lähetystyötä, puhdetyötä, pakkotyötä, ajat-telutyötä, kotityötä, siivoustyötä, taustatyötä, pohjustustyötä, selvitystyötä, sovitteletyötä, suunnittelutyötä, viimeistelytyötä, surutyötä, korjaustyötä, pelastustyötä, raivaustyötä, hä-vitystyötä, rauhantyötä, matkatyötä, jne., jne.

En tietenkään kaikkea tuota siinä mieleeni saanut, mutta ison osan. Tähän pakinaan lista-sin jo kattavamman luettelon, jotta on ”muisti-paperi” takataskussa muovipussissa kulkevan hengityssuojaimen kaverina. Kumpakin niis-tä voi vastakin tarvita, ei sitä koskaan tiedä. Iltapäivän päätöskahveilla vielä hetken käsit-telimme lounastauon teemaa. Kiteytin asian insinööriin logiikkallani sellaiseksi, että jos vain palkallinen työ on työtä, silloin määrittelyn koh-

teeksi tuleekin työn sijaan palkka. Eli kysymys kuuluukin silloin: mitä on palkka? Ja senhän määrittely on kovin vaikeaa sekkin. Ylipäätään termien määrittely on vaikeaa. Erosimme so-vussa ja yhteisymmärryksessä.

LOPUKSI PAKINAN OTSIKKOON: ”Työllä tur-vallisuutta”. Kaikkiaan loppuu aikanaan ja tä-mäkin pakina parhaimmillaan niin, että sen sanoma voisi tuoda iloa, lohtua, ratkaisuja, neu-voja, ideoita ja vastauksia sille itsestään selvyylle, että työ tuottaa turvallisuutta. Selvään on, että ei turvallisuutta ainakaan työtä tuoteta, vaan vaivaa sen eteen on nähtävä, on se sitten palkallista tai vapaaehtoistyötä. Vallitsevassa maailmantilanteessa moni on hämillään ja huol-lissaan, kokee voimattomuutta, neuvottomuutta ja turvattomuutta. Ei ehkä saa aikaiseksi, ”käy puoliteholla”.

Isossa kuvassa yksilö ei asioille juuri-kaan voi, ei varsinkaan rivikansalainen. Sitten Turkissa ja Syyriassa jyrisee, heti kaikkialla he-rää auttamisen halu ja tarve ja apua virtaa ka-tastrofialueelle. Samoin on Ukrainaa autettu jatkuvasti ja massiivisesti. Eikä vain ammatti-laisten toimesta. Ilman vapaaehtoisapua ei am-mattilaisapukaan toimisi kunnolla ja riittävästi, sillä eihän sellaista ammattilaisten armeijaa ole olemassa, joka vain odottaa toimeettomana, että jossakin tapahtuisi onnettomuus, jonka uhreja riennettäisiin auttamaan. Toimiva prosessi pe-rustuu ammattilaisten ja vapaaehtois- ja harras-tajatyöntötoiminnan yhteensovittamiseen.

Kollektiivisestä vapaaehtois- ja auttamis-työstä on pitkä matka yksilön toiminnan tasolle, ajatellaan, mutta niinköhän sittenkään? Yksilön näkökulmasta oman toiminnan voi kanavoida ja kohdistaa hyvinkin täsmätoiminnaksi. Sellaisen kun kohdistaa avuksi ja tueksi niille, jotka resurs-sien puutteessa kipuilevan hyvinvointivaltion ra-kenteissa jäävät riittämättömälle tuelle tai avulle, jokainen voi rientää tätä tukemaan tai auttamaan omien resurssien puitteissa ja salliessa. Työ te-kijäänsä kiittää, tuottaa ympärilleen turvallisuut-ta, kasvavaa hyvinvointia ja itselle iloa, terveyttä ja mielenrauhaa. Hyvinvointivaltio ripustautuu aivan liikaa ja tarpeettoman mielikuviutuksetto-masti vain julkisen tahon tuottamiin resurssihin. Vaikeina ja turvattomina aikoina puhutaan koti-varan tarpeellisuudesta ja merkityksestä.

Mitäpä jos kotivaran käsitettä laajennettais-siin sisältämään myös omien resurssien puit-teissa tapahtuvan läheiselle ja lähimmäiselle annettavan tuen ja avun. Niin ennenkin tehtiin, oli ”vanhassa vara parempi”. Runoilija sen osu-vasti kiteytti: ”Työs olkoon se suurta tai pientä vaan, kun vaan se työtä on oikeaa ja kun sitä palkan et tähden tee! Työ riemulla palkitsee.”

Turvallisuusfilosofi

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi



KANNATUSJÄSENET

FinNuclear ry

Pohjolan Voima Oyj

Teollisuuden Voima Oyj

**Fortum Power
and Heat Oy**

Posiva Oy

TVO Nuclear Services Oy

Platom Oy

Sweco Finland Oy

Westinghouse

**Pohjoismainen
Ydinvaruutuspooli**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**