

# ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN  
ATOMITEKNILLINEN  
SEURA —

ATOMTEKNISKA  
SÄLLSKAPET  
I FINLAND ry



1/2010

vol. 39

## Tässä numerossa

### *Pääkirjoitus:*

Kiireiset ajat ..... 3

### *Editorial:*

Busy times ..... 4

Uutisia ..... 5

Turvallisuuskriittisten järjestelmien  
verifiointi mallintarkastuksella ..... 6

Muuttuva operointikonsepti  
ja ammattikuva ..... 9

Kun automaatio ahdistaa ..... 12

Ydinfysikaalisesta oivalluksesta  
voiman tuotantoon ..... 15

### *Arkiston helmiä:*

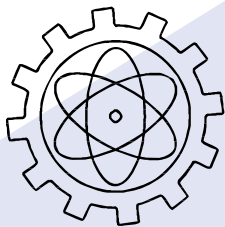
Pääkaupunkiseudun  
energiahuoltovaihtoehtojen  
kansantaloudelliset vaikutukset ..... 18

Ohjeita ATS Ydintekniikan  
artikkelien kirjoittamiseen ..... 22

Väitöskirja ..... 24

Diplomityö ..... 26

Tapahtumakalenteri  
ja seuran uudet jäsenet ..... 27



# ATS

1/2010, vol. 39

## VUODEN 2010 TEEMAT

### 1/2010

Automaatio

### 2/2010

Ruotsi

### 3/2010

Mekaaniset komponentit

### 4/2009

Ekskursio ja syysseminaari,

## ILMOITUSHINNAT

1/1 sivua 700 €

1/2 sivua 500 €

1/4 sivua 300 €

## TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka  
c/o Riku Mattila  
Säteilyturvakeskus  
PL 14  
00881 Helsinki  
Puhelin 09 759 88680  
Telefax 09 759 88382  
toimitus@ats-ydintekniikka.fi

ISSN-0356-0473

Painotalo Miktor Oy



441 194  
Painotuote

## JULKAISIJA / PUBLISHER

Suomen Atomiteknillinen Seura –  
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

## ATS WWW

www.ats-fns.fi

## Toimitus / Editorial Staff

### Päätoimittaja / Chief Editor

DI Riku Mattila  
Säteilyturvakeskus  
paatoimittaja@ats-ydintekniikka.fi

### Toimitussihteeri / Subeditor

Minna Rahkonen  
p.0400 508 088  
fancymedia@saunalahti.fi

### Erikoistoimittajat /

#### Members of the Editorial Staff

TKT Jarmo Ala-Heikkilä  
Aalto Yliopiston  
Teknillinen korkeakoulu  
jarmo.ala-heikkila@tkk.fi

FM Sini Gahmberg  
Teollisuuden Voima Oyj  
sini.gahmberg@tvo.fi

FM Johanna Hansen  
Posiva  
johanna.hansen@posiva.fi

DI Pekka Nuutinen  
Fortum Power and Heat Oy  
pekka.nuutinen@fortum.com

DI Kai Salminen  
Fennovoima Oy  
kai.salminen@fennovoima.fi

DI Eveliina Takasuo  
VTT  
eveliina.takasuo@vtt.fi

### Haastattelutoimittaja / Journalist reporter

DI Klaus Kilpi  
klaus.kilpi@welho.com

## Johtokunta / Board

### Puheenjohtaja / Chairperson

Tkt Eija-Karita Puska  
VTT  
PL 1000, 02044 VTT  
p. +358 20 722 5036  
puheenjohtaja@ats-fns.fi

### Varapuheenjohtaja / Vice-chairperson

DI Veijo Ryhänen  
Teollisuuden Voima Oy  
veijo.ryhanen@tvo.fi

### Sihteeri / Secretary of the Board

Tkt Silja Holopainen  
VTT  
sihteeri@ats-fns.fi

### Rahastonhoitaja / Treasurer

Risto Vahanen  
Aalto Yliopiston  
Teknillinen korkeakoulu  
risto.vahanen@tkk.fi

### Jäsenet / Other Members of the Board

Tkt Jari Tuunanen  
Fortum Power and Heat Oy  
jari.tuunanen@fortum.com

DI Kai Salminen  
Fennovoima Oy  
kai.salminen@fennovoima.fi

Timo Seppälä  
Posiva Oy  
timo.seppala@posiva.fi

## Toimihenkilöt / Officials

### Jäsenrekisteri / Membership Register

Tkt Silja Holopainen  
VTT  
sihteeri@ats-fns.fi

### Kv. asioiden sihteeri / Secretary of International Affairs

Tkt Jari Tuunanen  
Fortum Power and Heat Oy  
jari.tuunanen@fortum.com

### Energiakanava / Energy Channel

Tkt Karin Rantamäki  
VTT  
karin.rantamaki@vtt.fi

### Young Generation

DI Tapani Raunio  
Fortum Power and Heat Oy  
tapani.raunio@fortum.com

### Ekskursios sihteeri / Excursion Secretary

DI Jani Pirinen  
Fortum Power and Heat Oy  
jani.pirinen@fortum.com

Suomen Atomiteknillisen Seuran (perustettu 1966) tarkoituksena on edistää ydintekniikan alan tuntemusta Suomessa, toimia yhdysiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi sekä vaihtaa tietoja ja kokemuksia kansainvälisellä tasolla.

ATS Ydintekniikka on neljä kertaa vuodessa ilmestyvä lehti, jossa esitellään ydintekniikan tapahtumia, hankkeita ja ilmiöitä numeroittain vaihtuvan teeman ympäriltä. Lehti postitetaan seuran jäsenille.

Lehdessä julkaistut artikkelit edustavat kirjoittajien omia mielipiteitä, eikä niiden kaikissa suhteissa tarvitse vastata Suomen Atomiteknillisen Seuran kantaa.



## Kiireiset ajat

**Y**dinvoima-alalla on Suomessa menossa vauhdikkaat ajat. Neljä laitossyksikköä on jo 30 vuotta tuottanut sähköä kansakunnan tarpeisiin, ja kaikilla niillä on käynnissä mittavia modernisointihankkeita. Rakenteilla oleva viides laitossyksikkö etenee laadusta tinkimättä, ja sen asennustyöt ovat kesän mittaan saavuttaneet merkittävän välietapin, kun reaktoripaineastia päästiin nostamaan paikalleen.

**EDUSKUNTA VAHVISTI** ennen kesätaukoon valtioneuvoston kahdelle uudelle laitossyksikölle myöntämät periaatepäätökset, ja uusien yksiköiden valinta- ja suunnitteluhankkeet ovat käynnistyneet. Oman lisähaasteensa tilanteeseen tuo uusien laitoshankkeiden kanssa samaan ajankohtaan sijoittuva ydinturvallisuussäännösten kokonaisuudistus, joka saattaa perustuslain uudistuksesta liikkeelle lähteneen suururakan (juttu numerossa 4/2008) valmiiksi.

**ALA REKRYTOI** koko ajan uutta väkeä, ja vanhoilla konkareilla on kädet täynnä töitä sekä käynnissä olevien laitosten ja hankkeiden että uusien osaajien perehdyttämisen parissa. Yksi korkeasuhdanteen sivuvaikutus on, että ylimääräistä aikaa on kaikilla tavallistakin vähemmän käytettävissään.

**ATS YDINTEKNIikka** on joutunut kärsimään tekijöidensä työkiireistä: vuoden 2010 ensimmäinen numero saadaan ulos vasta nyt, puoli vuotta tavoiteaikataulusta jäljessä, ja loppuvuodeksi jää paljon kirittävää. Pyydän lukijoilta pitkämielisyyttä ja artikkelien kirjoittajilta anteeksi, että juttujen julkaisu kesti näin kauan.

**LEHDEN 4/2008** pääkirjoituksessa kirjoitin ATS:n syysekskursion peruunnuttua: "ajatelkaamme positiivisesti – ehkäpä osasyyni niukkaan ilmoittautuneiden määrään on se, että maamme ydintekniikan asiantuntijoilla on nyt kädet täynnä työtä alan tulevaisuuden rakentamisessa".

Samaa positiivista ajattelua on syytä ylläpitää nytkin, ja vaikka lehden aikataulu on viivästynyt suunnittelusta, tärkeintä on, että laadusta ei tingitä.

**JOTTA VASTAAVILTA** viivästyksiltä välttyttäisiin jatkossa, ja lehtemme tekoon saataisiin nykyistä parempaa syvyyspuolustusta, vapaaehtoisista koostuva toimituskunta kaipaa vahvistusta.

Jos lukijakunnasta löytyy henkilöitä, jotka olisivat kiinnostuneita osallistumaan seuramme lehden tekoon joko toimituskunnan jäsenenä tai muuten avustamaan juttujen hankkimisessa, yhteydenotot ovat tervetulleita!



## Busy times

**T**he Finnish nuclear industry is going through very dynamic times. Four plant units have produced electricity for the nation's needs for thirty years each, and large modernization projects are taking place at all of them. The fifth plant unit – currently under construction – is proceeding with no compromises made regarding the quality, and the installation phase has during the summer reached an important milestone, when the reactor pressure vessel was hoisted on its place.

**BEFORE THE** summer break, the Parliament ratified two decisions-in-principle granted by the Government in order to permit construction of two new plant units, and the plant selection and design processes are in progress. An additional challenge is posed by a simultaneous overall reformation of the national nuclear safety regulations (see article in ATS Ydintekniikka 4/2008).

**THE FIELD** is constantly recruiting new people, and the more experienced ones are up to their eyes in work with the plant units in operation and under construction, and with introducing the new experts to the field. One collateral effect of the current boom is that everybody seems to have less time for additional activities. ATS Ydintekniikka has suffered from the hurry of its makers: this issue is published half a year behind the planned schedule, and there is lot of catching up to do during the rest of the year. I ask for forbearance of the readers, and apologize to the authors of the articles for the long delay in getting them published.

**IN THE** editorial of issue 4/2008, after the annual excursion had been cancelled, I wrote: *“Let us think positively: perhaps a reason for the low number of participants to sign up is the fact that the nuclear experts in our country are currently up to their eyes in work building the future of the Finnish nuclear technology”*.

We should still maintain this positive thinking, and even though the publishing schedule has fallen behind, the most important thing is that the quality will not be compromised.

**IN ORDER** to prevent similar delays from occurring in the future, and in order to increase the defence-in-depth in making the journal, the editorial board – consisting of volunteers – calls for reinforcement. If there are people out there, who are willing to assist in making the Society's journal either as a member of the editorial board, or by helping to find interested writers for future issues, contacts are welcome!

This issue contains practical instructions for writing articles to ATS Ydintekniikka, and referring to these instructions, we challenge every reader to consider whether there would be something worthy of a scientific article in his/her own field of expertise.



# UUTISIA

## Reaktoripaineastian kansi nostettu paikoilleen OL 3:ssa

**OLKILUOTO 3:N** reaktorilaitoksen pääkomponenttien sisään haalaus sai jatkoa 30.9.2010, kun reaktorirakennukseen nostettiin reaktoripaineastian kansi, joka painaa 90 tonnia. Ennen kuin kansi lasketaan paikalleen reaktoripaineastian päälle, sitä pidetään säilytystelineessä. Teline on sama, jossa kantta säilytetään vuosihuoltojen aikana.

Kuten itse paineastiakin, on reaktoripaineastian kansi valmistettu taotusta ferriittiteräksestä, minkä lisäksi sisäpuoli on pinnoitettu ruostumattomalla teräksellä korroosion estämiseksi.

Paineastian nosto toteutettiin käyttäen kahta nosturia: laitoksen reaktorirakennuksen omaa sekä yhtä suurta ulkopuolista.

*Lähteet: <http://www.tvo.fi> ja*

*WNN News 21.6.2010 [http://www.world-nuclear-news.org/NN\\_Reactor\\_vessel\\_in\\_place\\_at\\_Olkiluoto\\_3\\_2106101.html](http://www.world-nuclear-news.org/NN_Reactor_vessel_in_place_at_Olkiluoto_3_2106101.html)*

## Erkki Laurila palkinto Pertti Siltaselle ja Elja Kaloiselle

**PERTTI SILTANEN** ja Elja Kaloinen artikkelillaan "Ohjelma HEXBU-3D: Neutronivuon kuvaus VVER-reaktorin sydämesä" valittiin vuoden 2009 Erkki Laurila -kirjoittajapalkinnon saajaksi. Palkinnon saajan vahvisti lehden toimitus ja valinnan vahvisti seuran johtokunta. Artikkelin julkaistiin numerossa 1/2009.

**PALKINNON PERUSTELUIKSI** valinnan tehnyt ATS Ydintekniikan toimitus esitti seuraavaa: "Artikkeli on pitkän linjan ansiokkaiden asiantuntijoiden kuvaus ansiokkaasta suomalaisesta kehitystyöstä, jonka tuloksia hyödynnetään jatkuvasti mm. Loviisan lataussuunnittelussa. Artikkelin taustalla oleva tieteellinen työ perustelee myös palkintoa."

**ERKKI LAURILA** -palkinto on jaettu vuodesta 2001 alkaen ATS Ydintekniikka -lehden parhaalle kirjoitukselle.

## FinNuclear -esitteli toimintaansa ATS:n jäsenistölle

**ATS JÄRJESTI** 21.9. Säätytalolla jäsentilaisuuden, jossa Prizztech Oy:n **Leena Jylhä** esitteli FinNuclear -verkoston toimintaa. Tilaisuuteen osallistui 26 seuran jäsentä.

FinNuclear -toiminta aloitettiin osana kansallista Energiateknologian klusteritoimintaa <http://www.oske.net/osaamisklusterit/energiateknologia>. Ohjelman tavoitteena on vahvistaa suomalaisen teollisuuden kilpailukykyä ja liiketoimintaa. Ohjelman toiminnassa ydinenergia on valittu yhdeksi painopistealueeksi.

**FINNUCLEAR -TOIMINTAA** on toteutettu kolmessa vaiheessa, joista toinen on parhaillaan menossa. Ohjelmaa suunniteltaessa tavoitteena on ollut teollisuuden kytkeminen mukaan toimintaa heti alusta alkaen. Toiminnan ensimmäisessä vaiheessa (2007-2008) laadittiin laaja selvitystyö ydinenergia-alan tilanteesta maailmalla ja kotimaassa sekä tehtiin suosituksia toiminnan organisoitumiseksi.

Selvitykseen teossa olivat mukana alan kotimaiset asiantuntijat. Selvitys on saatavissa FinNuclearin Internet -sivuilta osoitteesta <http://www.prizz.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=1&id=300&sid=392>.

Toiminnan toisessa vaiheessa, joka kattaa vuodet 2009 - 2010 ja on siis parhaillaan menossa, on vuorossa ensimmäisen vaiheen suositusten vieminen käytäntöön. Tavoitteena on myös edelleen laajentaa yritysosallistumista. Vaiheessa kolme, jonka toteutusta parhaillaan pohditaan, on tavoitteena vakiinnuttaa klusterin toiminta. Kolmas vaihe on ajateltu toteutettavan vuosina 2011-2013.

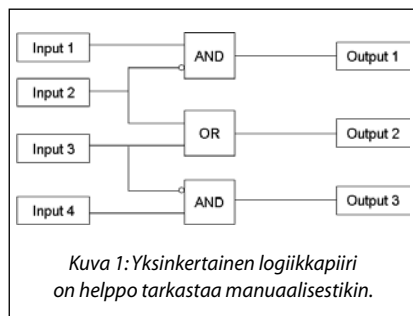
FinNuclear -toiminnan operatiivinen vastuu on PrizzTech Oy:llä, jossa asian parissa työskentelee 3-4 henkeä. FinNuclear -ohjausryhmässä on mukana alan merkittävimpiä kotimaisia toimijoita eli kotimaiset voimayhtiöt Fennovoima, Fortum ja TVO, palveluliiketoimintaa harjoittavat Pöyry, Dekra ja Telatek sekä valmistavan teollisuuden puolelta Hollming, Outokumpu, Kraftanaloge Arge OL3 ja Wärtsilä. Myös Energiateknologian klusteriohjelma, Energiateollisuus, Teknologiateollisuus, TEM ja VTT osallistuvat.

Leena Jylhän esitys on kokonaisuudessaan luettavissa ATS:n nettisivuilta osoitteesta [http://www.ats-fns.fi/archive/esitys\\_jylha\\_2010.pdf](http://www.ats-fns.fi/archive/esitys_jylha_2010.pdf).

*Lähde: Leena Jylhän esitys ATS:n jäsentilaisuudessa säätytalolla 21.9.2010.*

# Turvallisuuskriittisten järjestelmien verifiointi mallintarkastuksella

Useilla teollisuuden aloilla automaatiojärjestelmät on päivitetty digitaalisiksi jo kauan sitten, mutta ydinvoimasektorilla sen sijaan ollaan tunnetusti mallillisia uusien teknologioiden käyttöönotossa. Digitaalisen automaatiojärjestelmän verifiointi ja varmistuminen siitä, että järjestelmä toimii halutulla, turvallisella tavalla kaikissa mahdollisissa tilanteissa on haastava tehtävä.



Kuva 1: Yksinkertainen logiikkapiiri on helppo tarkastaa manuaalisestikin.

Verrattuna vanhoihin analogisiin järjestelmiin, digitaalitekniikka tarjoaa suunnittelijalle laajemman kirjjon erilaisia logiikkakomponentteja, joiden avulla järjestelmän toiminnot suunnitellaan. Kun mahdollisuuksia on paljon, on myös helppo suunnitella monimutkaisia toimintoja, joiden verifiointi voi olla yllättävänkin hankalaa. Monimutkainenkin logiikkatoiminto saattaa vaikuttaa ensisilmäyksellä toimivan oikein, mutta kun tarkastellaan normaalitilanteesta poikkeavia erikoistapauksia, totuus voi olla aivan toinen.

## Tila-avaruus "räjähtää"

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertainen logiikkapiiri, jossa on neljä binääristä sisääntuloa (Input), jotka voivat saada arvon 0 tai 1. Piirin kolmen ulostulon (Output) arvot riippuvat ainoastaan sisääntulojen saamista arvoista. Erilaisia sisääntulojen kombinaatioita on  $2^4$ , mikä tarkoittaa, että piirillä on yhteensä 16 mahdollista tilaa, joissa se voi olla. Tätä kutsutaan tila-avaruudeksi.

Kuvan kaltaisen piirin toimintaa on asiantuntijan helppo tarkastella kynän ja paperin avulla, koska tila-avaruus on pieni. Mutta entäpä hieman monimutkaisemman piirin tarkastelu? Jos binäärisiä sisääntuloja on kahdeksan, kasvaa tila-avaruus arvoon  $2^8=256$ , joka on jo työläs tarkas-

taa kattavasti manuaalisesti tai simuloimalla kaikki vaihtoehdot. 30 sisääntuloa kasvattaa tila-avaruuden yli miljardiin, 60 sisääntuloa tarkoittaa yli  $10^{18}$  tilaa.

Kuvitellaanpa, että 60 sisääntuloa käsittelevän piirin toimintaa voitaisiin simuloida fiktiivisen tehokkaalla simulaattorilla, joka pystyisi käsittelemään miljoona testitapausta sekunnin aikana, eli noin  $3 \cdot 10^{13}$  testitapausta vuoden aikana. Tällöinkin  $10^{18}$  testitapausten tarkastaminen kyseisellä simulaattorilla kestäisi yli 30 000 vuotta!

Edellä kuvatut esimerkit laskenta-ajoista antavat hyvän kuvan ongelman mittakaavasta. Kuvan 1 kaltaiset piirit, joissa ulostulojen arvot riippuvat kullakin ajanhetkellä ainoastaan sisääntulojen arvoista, ovat usein sisäiseltä toiminnaltaan yksinkertaisia verrattuna tyypillisiin automaatiojärjestelmien logiikkapiireihin.

Niissä on usein sisääntulojen lisäksi takaisinkytkentöjä, sisäisiä muistipiirejä ja viive-elementtejä (kuva 2), jotka käytettyä aika-askeleesta riippuen voivat kasvattaa suhteellisen yksinkertaiselta näyttävän piirin tila-avaruuden miljardeihin ja suuremmaksikin.

Voidaan siis todeta, että tila-avaruus "räjähtää" sisääntulojen määrän kasvaessa ja laajojen järjestelmien manuaalinen tarkastaminen kattavasti on käytännössä mahdotonta.

## Mallintarkastus

Millä tavoin sitten voitaisiin varmistua järjestelmien oikeanlaisesta toiminnasta? Eräs menetelmä on mallintarkastus, jonka soveltamista turvallisuuskriittisten järjestelmien verifiointiin on tutkittu VTT:n ja Aalto-yliopiston SAFIR2010-tutkimusohjelmaan (<http://www.vtt.fi/safir2010>) kuuluvassa projektissa Model-Based Safety Evaluation of Automation Systems (MODSAFE). Projektin tavoitteena on kehittää malleihin perustuvia menetelmiä automaation turvallisuuden arvioimiseksi, soveltaa ja tutkia kehitettyjen menetelmien käyttökelpoisuutta käytännön esimerkkien avulla ja tuoda menetelmien käyttö osaksi alan toimijoiden normaalia työskentelytapaa.

Mallintarkastus on formaali verifiointimenetelmä, jossa tutkitaan, täyttääkö järjestelmästä tehty malli sille asetetut vaatimukset [1].

Mallintarkastuksen vaiheet ovat seuraavat:

- (1) Valitaan järjestelmän osa, jonka käyttäytymistä halutaan tutkia.
- (2) Luodaan järjestelmästä formaali tilakonemalli ja
- (3) määritellään järjestelmän ominaisuudet, joita halutaan tutkia. Tarkastettava ominaisuus voisi esimerkiksi kuvan 1 ta-

pauksessa olla seuraavanlainen: "Kaikissa mahdollisissa tilanteissa vähintään yhden ulostulon (Output1, Output2, Output3) arvon on oltava 1".

(4) Luonnollisella kielellä kuvatut ominaisuudet kirjoitetaan mallintarkastimen ymmärtämään muotoon temporaalilogiikan lauseiksi.

(5) Mallintarkastin ottaa syötteekseen järjestelmän mallin ja tarkasteltavan ominaisuuden ja vertaa mallintarkastusalgoritmeilla toteutuuko tarkasteltava ominaisuus mallin kaikissa käyttäytymisissä.

(6) Mikäli tarkastettava ehto rikkoutuu, mallintarkastin esittää vastaesimerkin, josta käy ilmi muuttujien tilasiirtymät, joiden kautta malli päätyy ei-toivottuun tilaan. Vastaesimerkin avulla voidaan analysoida todellista järjestelmää ja tutkia, onko kyseinen virhetilanne mahdollinen vai pitääkö mallia tarkentaa.

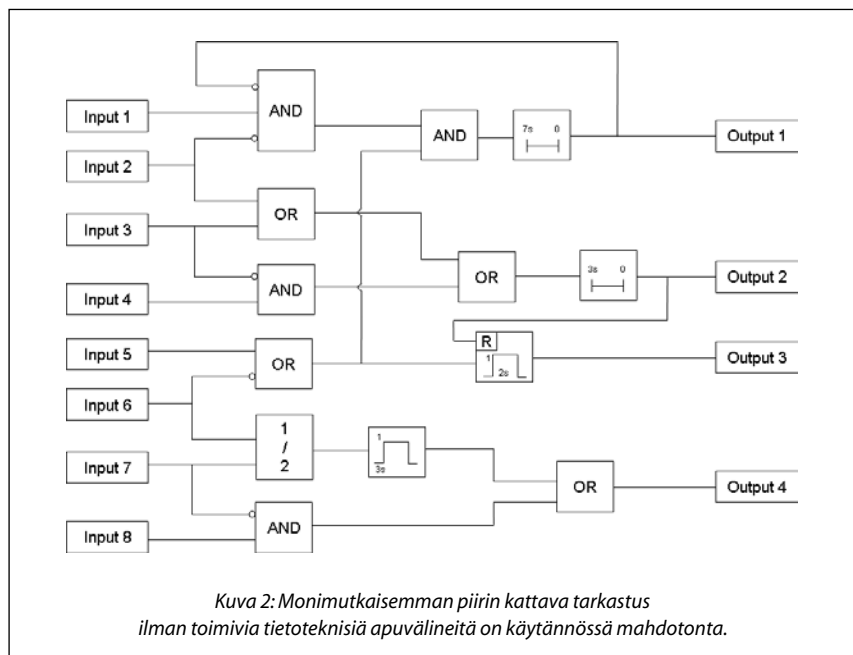
Mallintarkastuksen perusidea esiteltiin jo 80-luvulla. Mallintarkastusalgoritmien merkittävä kehittyminen ja erityisesti uudet symboliset tekniikat isojen tila-avaruuksien käsittelyyn mahdollistivat jo 90-luvulla mallintarkastuksen hyödyntämisen laitteistosuunnittelussa. Nykyään mallintarkastus onkin olennainen osa esimerkik-

si mikroprosessorien suunnitteluprosessia, koska prosessorivalmistajat ovat sisäistäneet sen lainalaisuuden, että on huomattavan paljon edullisempaa ja tehokkaampaa löytää vakavat virheet jo kehityskaaren alkuvaiheessa eikä vasta testauksen yhteydessä tai käyttäjien kokemusten perusteella. Mikroprosessorisuunnittelun lisäksi mallintarkastusta on maailmalla hyödynnetty mm. tietoliikenneprotokollien, lennonohjausjärjestelmien, laitteistoajurien ja turvallisuuskriittisten ohjelmistojen verifiointissa. Automaation arvioinnissa ja erityisesti ydinvoimasovelluksissa mallintarkastusta ei ole aikaisemmin hyödynnetty samassa mittakaavassa kuin MODSAFE-projektissa on nyt tehty.

Mallintarkastus eroaa testauksesta ja simuloinnista mm. siten, että kun testiajoilla tai simuloiden voidaan tutkia tietty rajallinen määrä mallinnetun järjestelmän testitapauksia, niin mallintarkastin tutkii yhdellä kertaa kaikki mahdolliset käyttäytymiset (kuva 3). Mallintarkastuksella pystytään tutkimaan myös järjestelmien aikakäyttäytymistä sekä luomaan tarkastettavia ehtoja käänteisessä muodossa; vertaa esim. "Kaikilla järjestelmän suorituksilla tapahtuu..." ja "Missään järjestelmän suorituksessa ei tapahdu..." Tarkastettavien ehtojen määrittely mallintarkastimelle on melko vapaa ja mahdollistaa monimutkaistenkin ehtojen tarkastamisen. Mallintarkastus sopii erittäin hyvin perinteisen testauksen ja simuloinnin tueksi järjestelmien verifiointiin jo niiden suunnitteluvaiheessa.

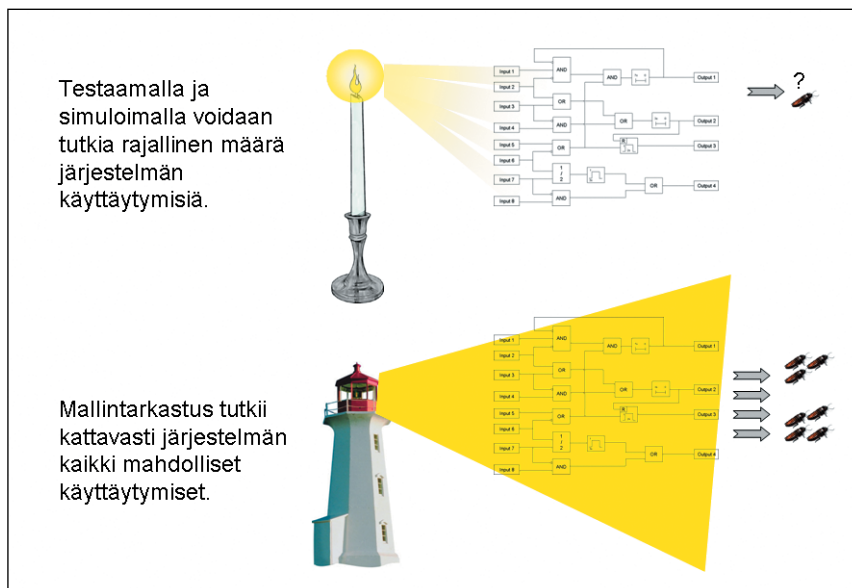
## Kokemukset erinomaisia

Mallintarkastuksen soveltamisesta turvallisuuskriittiseen automaatioon saadut kokemukset ovat olleet erinomaisia MODSAFE-projektissa. Tutkimusryhmä on mallintanut ja analysoinut useita todellisia esimerkkijärjestelmiä, jotka ovat käsitelleet pääosin turvallisuuskriittisiä sovelluksia [esim. 2,3]. Suoraan ydinvoimalaitoksen automaatioon liittyvien järjestelmien lisäksi menetelmää on sovellettu sähköverkon toimintojen tarkastelussa sekä sulautettujen ohjausohjelmistojen analysoinnissa.



Kuva 2: Monimutkaisemman piirin kattava tarkastus ilman toimivia tietoteknisiä apuvälineitä on käytännössä mahdotonta.





Kuva 3:  
Mallintarkastus on tehokas verifointimenetelmä perinteisen testauksen ja simuloinnin tueksi.

MODSAFE-projektin aikana on havaittu, että yksinkertaiseltakin näyttävä järjestelmä voi toimia tietyissä tapauksissa virheellisesti ja manuaalisin tarkastuksin tai pelkästään simuloimalla virheitä voi olla hankala löytää. Erikoisimmat virhetilanteet ovat usein sellaisia, joiden tarkasteluun ei testiä tai simuloimista suunniteltaessa ole osattu kiinnittää riittävästi huomiota. Esimerkiksi kaksi täsmälleen samanaikaisista vastakkaisen komennon antavaa signaalipulsseja tai sisäkkäiset viiveet yhdistettynä operaattorin poikkeukselliseen toimintaan voivat aiheuttaa yllättäviä virheitä, jotka havaitaan mallintarkastuksella tehokkaammin kuin testaamalla tai simuloimalla.

Ei tarvita kuin muutama sisääntulosignaali, pari sisäkkäistä viive-elementtiä ja takaisinkytkentä, kun järjestelmän tila-avaruus voi olla jo luokkaa  $10^{10}$ . Mallintarkastimelta kuluu tämän suuruisen järjestelmän tarkastamiseen tyypillisesti muutamista sekunneista muutamiin minuutteihin ehtoa kohden. Laskenta-aika riippuu pääosin tarkastettavasta ehdosta, mallinnetun järjestelmän rakenteesta sekä laskennan suorittavan tietokoneen tehosta. Koska tarjolla on useita erilaisia mallintarkastinohjelmistoja, sopivan työkalun valinta vaikuttaa myös laskenta-aikaan ja analyysin onnistumiseen. Eri mallintarkastimet soveltuvat erityyppisiin tehtäviin riippuen esimerkiksi sisääntulojen

määrästä ja aikakäyttötymisen monimutkaisuudesta.

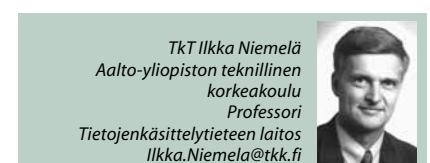
Nykyään mallintarkastuksella pystytään ratkomaan ongelmia, joiden ratkaisemisesta vain unelmoitiin joitakin vuosia sitten. Tila-avaruuden "räjähtäminen" ja laskentatehon loppuminen ovat kuitenkin edelleen suuria haasteita. Tutkimista ja kehittämistä riittää mallintarkastimien sisäisissä algoritmeissa, mallinnusmenetelmien modularisoinnissa, eri mallintarkastimilla saatujen osatulosten yhdistämisessä sekä mallintarkastimen tuottamien vastaamerkkien analysoimisen tehostamisessa.

#### Viitteet

[1] Valkonen, J., Karanta, I., Koskimies, M., Heljanko, K., Niemelä, I., Sheridan, D., Bloomfield, R.E. NPP Safety Automation Systems Analysis – State of the Art. VTT Working Papers 94, VTT, Espoo, 2008, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2008/W94.pdf>

[2] Valkonen, J., Pettersson, V., Björkman, K., Holmberg, J.-E., Koskimies, M., Heljanko, K., Niemelä, I. Model-Based Analysis of an Arc Protection and an Emergency Cooling System. VTT Working Papers 93, VTT, Espoo, 2008, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2008/W93.pdf>

[3] Björkman, K., Frits, J., Valkonen, J., Lahtinen, J., Heljanko, K., Niemelä, I., and Hämäläinen, J.J. Verification of safety logic designs by model checking. In Proceedings of the Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies NPIC&HMIT 2009, Knoxville, Tennessee, April 2009. [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/Bjorkman\\_et\\_al\\_NPIC\\_HMIT\\_2009.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/Bjorkman_et_al_NPIC_HMIT_2009.pdf)





# Muuttuva operointikonsepti ja ammattikuva

## – mitä muuttuu operaattorityössä käyttöliittymien digitalisoinnin myötä?

*Suomen ydinvoimalaitosten automaatio- ja valvomojärjestelmien muutoksilla on monenlaisia vaikutuksia niin yksilö- kuin organisaatiotasollakin. Organisaatioilta edellytetään oppivuutta ja ketteryyttä, jotta ne kykenevät reagoimaan alkuperäisissä suunnitelmissa tapahtuviin muutoksiin. Automaatiojärjestelmien ja valvomon käyttöliittymien muutokset taas vaikuttavat operaattoritoiminnan käytäntöihin ja sitä kautta myös toiminnan orientaatioperustaan ja ammattikuvaan.*

Suomen toiminnassa olevilla ydinvoimalaitoksilla on menossa laajat automaatio- ja valvomojärjestelmien muutokset. Nämä muutokset ovat haasteellisia monessa suhteessa: kyse on pitkistä, useita vuosia kestävästä hankkeista, joissa edetään useiden välivaiheiden kautta lopulliseen tavoitteeseen. Lisäksi vastaavia uudistuksia on toteutettu maailmalla tähän mennessä varsin vähän, joten tietoa ei ole kovin paljon siitä, miten tällaiset uudistukset olisi suunniteltava ja toteutettava.

On ilmeistä, että nämä muutokset vaikuttavat monin tavoin voimalaitosten operaattoreiden toimintaan ja konkreettisiin käytäntöihin. VTT:n Toiminnan tutkimus ja systeemikäytettävyys -tiimin SAFIR2010-ohjelmaan kuuluvien IDEC- ja O'PRACTICE-hankkeiden tavoitteena on ollut tutkia tätä muutosprosessia eri näkökulmista. Työmme lähtökohtana on ns. HFE-suunnittelu-prosessin malli, joka kuvaa, miten inhimilliset tekijät on otettava suunnittelussa huomioon. Malli sisältää neljä päävaihetta, analyysin, suunnittelun, arvioinnin sekä toteutuksen ja seurannan.

Olemme viime vuosina tutkineet mm. automaatio- ja valvomouudistushankkeiden suunnittelun ja hallinnan käytäntöjä,

käyttöliittymämuutosten vaikutusta operaattoritoimintaan ja työn konkreettisiin käytäntöihin sekä näiden muutosten vaikutusta operaattoreiden toimintatapaan, kokemuksiin ja käsityksiin omasta työstään. Seuraavassa tarkastellaan kunkin tutkimuksen keskeisiä tuloksia lyhyesti erikseen.

### Muutosprosessin hallinta

Olemme haastatelleet Fortumin Loviisan ja TVO:n Olkiluodon voimalaitoksen automaatiouudistushankkeiden vetäjiä, hankkeisiin osallistuneita suunnittelijoita sekä simulaattorikouluttajia. Havaintojemme mukaan toteutuneet hankkeet ja osakokoukset ovat onnistuneet.

Hankkeet ovat olleetkin teknisestä näkökulmasta huolellisesti suunniteltuja. Hyvätkään suunnitelmat eivät aina kuitenkaan auta, sillä muutokset ja suoranaiset yllätykset yleensä ovat väistämättömiä pitkien projektien kuluessa. Tämän takia on välttämätöntä, että suunnitelmat eivät ole liian jäykkiä. Kehityshankkeet ovatkin aina organisaation kannalta oppimisprosessi, joka muuttaa olemassa olevia käytäntöjä ja toimintatapoja.

Näkemyksemme mukaan HFE-suunnitteluprosessimallin osavaiheita ei ole riit-

tävästi huomioitu valvomosuunnittelussa. Olemmekin ehdottaneet, että jatkossa inhimillisiä tekijöitä ja käyttäjäkeskeistä suunnittelua koskevat asiat nostetaan vahvemmin esille, ja tähän liittyen voimayhtiöihin perustetaan erillinen toiminto, jonka tehtävänä on ottaa vastuu näistä aiheista. On myös tärkeää, että valvomo-operaattoreilla on mahdollisuus osallistua valvomosuunnitteluun ja olla mukana sen eri vaiheissa.

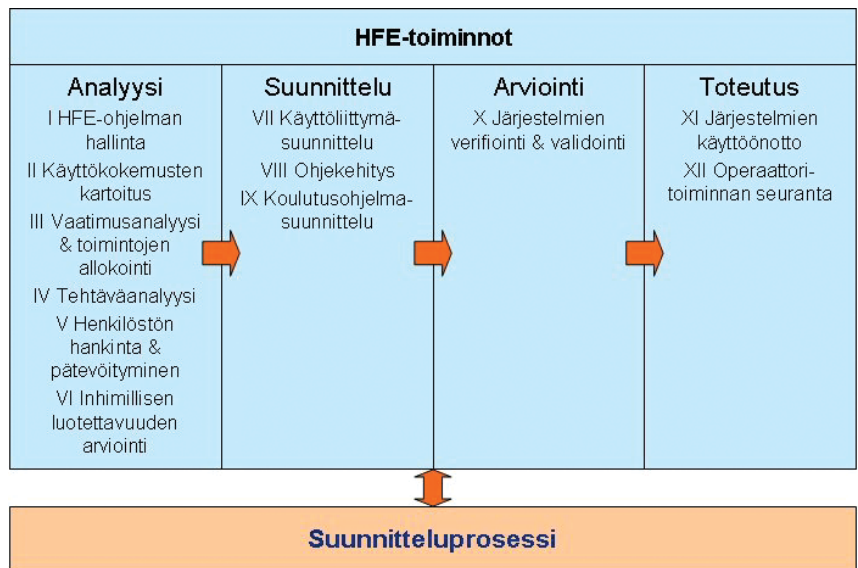
### Muuttuva operointikonsepti

Käsitettä operointi- ja toimintakonsepti on käytetty 1980-luvulta alkaen turvallisuuskriittisten ohjelmistojen suunnittelun yhteydessä. Tavoitteena on ollut ottaa teknisten spesifikaatioiden määrittelyssä käyttökokemukset paremmin huomioon.

Operaatiokonseptia määriteltäessä lähtökohtana on ongelma-alue (esim. automaation digitalisoinnin vaikutukset ihmisen-tekniologia yhteistoimintaan prosessinhallinnassa), johon suunnitteluratkaisua haetaan. Kuvaustapa ei ole luonteeltaan tietotekninen, vaan konsepti kuvataan tuotannon ja käyttäjien työn näkökulmasta ja käsittein (esim. ydinvoimalaitoksen operaattorin työn kriittiset vaatimukset, tehtävät ja informaatiotarpeet erilaisissa käyttötilanteissa).

Operointikonsepti kuvaa muutoksen nykyisestä uuteen tilanteeseen, ja keskeinen osa sitä on tavoitetilan määrittely. Esimerkiksi keskeisen EPRI:n suunnitteluohjeen (EPRI 1008122, 2004: Human Factors Guidance for Control Room and Digital Human-System Interface Design and Modification) mukaan operointikonsepti tarkoittaa tapaa organisoida valvomovuoron työ ja tehtävät uudessa valvomossa normaali- ja häiriötilanteissa.

Huomion kohteena on tällöin mm. vuoron koko ja kokoonpano, päävalvomon toiminnot ja vastuut, toimintojen jako päävalvomon ja automaattisten toimintojen välille, vuoron jäsenten tehtävät ja velvollisuudet eri toimintatilanteissa, vuoron yhteistoiminta ja johtamissuhteet, toiminta tilanteissa joissa informaatio- ja auto-



HFE-toiminnot osana suunnitteluprosessin kokonaisuutta

maatiojärjestelmän toiminnot ovat häiriintyneet sekä valvomovuoron yhteistyö ja kommunikointi valvomon ulkopuolelle kuten kunnossapidon, asiantuntijoiden ja turvallisuushenkilöstön kanssa.

O'PRACTICE-hankkeen operointikonseptia koskevissa tutkimuksissa olemme keskittyneet tilannetietoisuutta ja yleiskuvan välittymistä tukevien ratkaisujen kehittämiseen, yhteistoiminnan ja yhteistyön tukemiseen sekä ohjeiden älykkäisiin käyttötapoihin.

Olemme osallistuneet uusien digitaalisten järjestelmien validointitestien toteuttamiseen, suorittaneet käytettävyystestejä näihin liittyen sekä toteuttaneet ns. referenssiajoja kummankin voimayhtiön koulutussimulaattorilla. Lisäksi olemme haastatelleet operaattoreita, simulaattorikouluttajia ja heidän esimiehiään.

Tutkimusten mukaan järjestelmämuutokset aiheuttavat suuria muutoksia operaattorityön käytännöissä. Ilmeistä on, että ns. hybridivalvomossa, jossa on käytössä sekä analogista että digitaalista tekniikkaa, vuoron toiminta järjestyy eri tavoin kuin pelkästään analogiseen tai digitaaliseen tekniikkaan perustuvassa valvomossa.

Käyttöliittymämuutokset eivät ainoastaan muuta ns. sekundääritehtäviä, jotka liittyvät esimerkiksi tiedon hakuun ja käyt-

töliittymän näyttöjen muokkaamiseen, vaan myös primääritehtävät, jotka liittyvät itse prosessin ohjaamiseen, muuttuvat.

Digitaalisessa valvomossa operaattorien saattaa olla esimerkiksi aikaisempaa vaikeampaa havaita muutoksia ja säilyttää yleiskuva laitoksen toiminnasta sekä koordinoita toimintaansa muiden operaattoreiden kanssa. Tämä tarkoittaa, että järjestelmämuutosten seurauksena myös operointikonsepti merkittäväällä tavalla muuttuu.

### Muuttuva orientaatioperusta

Myös käsitykset työstä ja operaattoreiden ammattikuva saattavat muuttua työn käytäntöjen muuttuessa. Ammattikuvalla tarkoitetaan tässä toimijoiden omaa työtään koskevien käsitysten kokonaisuutta, ja se määrittellään orientaation käsitteen avulla.

Orientaatio on toimijan suhtautumisen työn tai toiminnan kohteeseen, päämääriin ja sen ominaisvaatimuksiin, ja se ohjaa tavoitteen asettelua työn eri tilanteissa. Osana ammattikuvan määrittelyä pyrimme selvittämään operaattoreiden käsityksiä mm. operaattorin perustehtävästä, työn merkityksestä ja prosessikäsityksistä sekä käsityksiä toimintaa ohjaavista tekijöistä.

Operaattorin perustehtävää pohdittaessa on kysyttävä, kuinka laajana operaattorin tehtävä nähdään ja kuinka vaikuttavana oma työ tuotannon kokonaisuudessa nähdään. Kysymme myös käsitystä hyvästä operaattorista (esim. miten hyvä operaattori toimii ja mitä ominaisuuksia hyvä operaattorilla on).

Työn merkitystä kysyttäessä pyrkimyksenä on selvittää, mihin työmotivaatio perustuu ja mikä tekee työstä mielenkiintoisen. Prosessikäsitteestä puhuttaessa halutaan selvittää, mitä operaattorit ymmärtävät yleiskuvalla, miten se muodostetaan ja mikä on toiminnan käynnistymisen lähtökohta. Kysyttäessä käsitystä toiminnan ohjauksesta halutaan tietää, kuinka kattavia erilaiset ohjeet ovat, mikä on ohjeen rooli operaattorityössä, miten ohje auttaa sekä mihin ohjeiden antama ohjaus kohdistuu.

Orientaatioperustan ulottuvuuksia voidaan arvioida sen perusteella, onko henkilön suhde ympäristöön luonteeltaan tulkintaan pyrkivä vai reaktiivinen. Tulkintaan pyrkivälle näkemykselle on ominaista pyrkimys muodostaa yleistäviä uskomuksia ympäristön tapahtumista. Yleistämistä tässä mielessä voi kutsua tulkittamiseksi, selitysten muodostamiseksi ja merkityksen muodostamiseksi.

Tulkittamisen vastakohta on reaktiivisuus, jolle on ominaista ympäristön vaikutuksille alttiina oleminen ja niihin reagoiminen. Näiden välimuotoa voidaan kutsua toteavaksi näkemykseksi (esim. "tiedsin sen koko ajan", "toimin sääntöjen mukaan").

Olemme kehittäneet arviointiasteikon, jossa suhteen laatua arvioidaan eri orientaation osa-alueilla sisällöltään erilaisin, mutta näitä suhtautumistapoja kuvaavien kriteerein, siten että henkilöä voidaan kutsua orientaatioiltaan tulkittavaksi, toteavaksi tai reaktiiviseksi.

Tuloksemme osoittavat, että operaattoreiden haastatteluissa kaikki edellä mainitut suhtautumistavat tulevat esiin, vaikka yksittäiset operaattorit eivät edustakaan puhtaasti mitään näistä ideaalityypeistä.

Vaikeampaa on selvittää, mistä nämä erot johtuvat.

On mahdollista, että vaikka ne osittain heijastaisivatkin persoonallisuuden suhteellisen pysyviä eroja, ne osittain johtuvat myös eroista työn konkreettisissa käytännöissä, jotka taas heijastavat työn fyysisissä ympäristöissä tapahtuneita tai tapahtuvia muutoksia.

Esimerkiksi paneeli- ja pulpetti-informaatioon perustuvassa valvomossa orientaatioperusta voi kehittyä erilaiseksi kuin täysin digitalisoidussa työasemapohjaisessa valvomossa. Kummassakin ympäristössä orientaatio voi kuitenkin edustaa optimaalista sopeutumista ko. kontekstiin.

## Tutkimuksen hyödyt

Mitä hyötyä muutosprosessin hallintaa, operaattorikonseptin kehittämistä ja orientaatioperustan muutoksia koskevista tutkimuksista on? Näkemyksemme mukaan tällä tutkimuksella on merkitystä, kun laitokset ja viranomaiset pyrkivät kehittämään oheisessa kuvassa esitettyä HFE-suunnitteluprosessia ja sen eri osa-alueita koskevaa toimintaa.

Oma tutkimuksemme pyrkii jatkossa kehittämään HFE-suunnittelun kokonaishallinnan kotimaisia käytäntöjä, laatimaan valvomokäyttöliittymien ja ohjeistuksen käyttäjäkeskeistä suunnittelua ja operaattorikoulutuksen kehittämistä palvelevia suosituksia ja ohjeita sekä arvioimaan niitä yhteistyössä voimayhtiöiden ja viranomaisen edustajien kanssa.

Lisäksi tavoitteena on kehittää voimailaitoksen toiminnalliseen mallinnukseen ja operaattoreiden perustehtävän analysointiin perustuvaa systeemistä vaatimustenmäärittelymenetelmää, jolla olisi käyttöä ihmisen ja automaation tehtävänjaon, automaation ja operaattorityön suunnittelussa sekä valvomon käyttöliittymäsuunnittelussa.

*PsT Jari Laarni  
VTT  
erikoistutkija  
Toiminnan tutkimus  
ja systeemikäytettävyys  
jari.laarni@vtt.fi*



*FT Leena Norros  
VTT  
tutkimusprofessori  
Toiminnan tutkimus  
ja systeemikäytettävyys  
leena.norros@vtt.fi*



*PsT Marja Liinasuo  
VTT  
tutkija  
Toiminnan tutkimus  
ja systeemikäytettävyys  
marja.liinasuo@vtt.fi*



*DI Paula Savioja  
VTT  
tutkija  
Toiminnan tutkimus  
ja systeemikäytettävyys  
paula.savioja@vtt.fi*



# Kun automaatio AHDISTAA

*Digitaalisen automaation kelpoistaminen ydinvoimalaitoskäyttöön on aiheuttanut viime aikoina monelle alalla olevalle päänvaivaa. Teesini on se, että ongelmat eivät automaationkaan osalta johdu itse teknologiasta, vaan inhimillisen toiminnan puutteellisuudesta. Tässä artikkelissa etsin tunnetuille automaation kipupisteille taustalla piileviä mekanismeja, joita olen ryhmitellyt karkeasti kolmeen ryhmään yksilön toiminnan, organisaatioiden toimintakulttuurin ja liiketoimintaympäristön mukaisesti.*

Väitän että eräs perussy syy koettuun ongelmallisuuteen on puutteellinen tietotaito. Nykyaikaisen, digitaalisen automaatioteknologian kipupisteet keskittyvät monissa tapauksissa verkottuneen ohjelmistopohjaisen teknologian käyttöön. Ohjelmistopohjainen tekniikka on rationaalinen insinööritiede siinä missä muutkin suunnittelualueet, eikä sen ymmärtäminen vaadi mustaa magiaa. Tekniikanalalle ominaiset luonteenpiirteet on kuitenkin ymmärrettävä sekä turvallisuuskriittisiä kokonaisuuksia toteutettaessa että kelpoistettaessa.

Ohjelmistopohjainen teknologia on perusluonteeltaan monimutkaista. Monipuolinen toiminnallisuus, toiminnallisuuden eri tasot ja korkea, nk. sisäisen kytkennän aste aiheuttavat sen, että yleiskuvan hallinta ohjelmistopohjaisessa teknologiassa on perinteistä teknologiaa hankalampaa. Toinen merkittävä ero on vikaantumismekanismien luonne. Siinä missä laitteistopohjaisen toteutuksen vikaantuminen painottuu satunnaisiin yksittäisvikoihin, ohjelmistovikat ovat suunnitteluvirheitä ja luonteeltaan systemaattisia. Lisäksi ohjelmistopohjainen

teknologia esittelee uuden virtuaalidimension; Ydinvoimalalle tuttuun materiaalin ja energian siirtoon perustuvien vuorovaikutus- ja vikaantumismekanismien tarkastelu ei enää riitä, mikäli toiminnallisuuden turvallisuutta kontrolloi ohjelmisto, jolla itsessään ei ole olemusta materiaalina eikä energiana. Vikaantuminen voi edetä myös virtuaalidimensiossa, ja tämän takia vikaantumiskäyttäytymisen tarkastelussa on kiinnitettävä merkittävästi enemmän huomiota vikojen leviämiseen ja yhteisvikaan. Riippumattomuuden merkitys toiminnallisena käsitteenä korostuu, mikä on huomattu kantapään kautta myös Olkiluoto 3:n automaatio-ongelmissa.

Luontaisen monimutkaisuuden takia ohjelmistopohjaista toteutusta on käytännössä mahdoton testata täydellisesti. Käytännön ongelmaksi muodostuu pikemminkin testitapausten valintaprosessi: miten testiavaruus ositellaan ja valitaan mahdollisimman paljon todellista käyttöprofiilia edustavat testitapaukset. Käyttöprofiilien merkitys korostuu myös käyttökokemuksen soveltamisessa. Pelkällä laitteen käyttö-tuntimäärällä ei ole käytännössä evidenssi-

arvoa, vaan tieto käyttötavoista ja näiden vastaavuudesta ajateltua käyttökohdetta vastaan on oltava olemassa, mikäli käyttöaikoja halutaan käyttää hyödyksi kelpoisuudessa.

Suoraan dynaamista evidenssiä - eli testituloksia ja käyttökokemuksia - on siis hankalaa hankkia kattavasti monimutkaisuu- den aiheuttamien realiteettien takia. Suunnittelun staattinen tarkastelu jälkikäteen on sekin haasteellista. On ymmärrettävä, että tämän johdosta ohjelmistopohjaisen teknologian kelpoistamisessa joudutaan väistämättä turvautumaan epäsuoraan evidenssiin, varmistamalla se että ohjelmistopohjainen tuote on suunniteltu ja toteutettu riittävän korkealla laatutasolla. Viranomaistoiminnassa tämä tarkoittaa painopisteen korjaamista itse tuotteen tarkastelusta tuotteen suunnittelu- ja valmistusprosessien tarkasteluun.

Perusasioiden tuntemattomuus aiheuttaa hupaisia ja joskus surullisiakin keskusteluja. Digitaalinen automaatiolaitte ei ole mekaaninen konstruktiio, jonka turvallisuusmerkitystä voidaan arvioida laitteen koon ja metrinmitan avulla, vaan olennais- ta on automaatiolaitteen toiminnallisuus ja se kuinka hyvin toiminnallisuus hallitaan. Joskus ratkaisuksi ehdotetaan "käyttökokeuksilla kelpoistamista" ymmärtämättä sitä teknologian luonteesta, tilastomatiikan perusteista ja realiteeteista kombinoituvaa haasteellisuutta, mitä kelvollinen käyttökokemusten soveltaminen ohjelmistopohjaisessa teknologiassa todella tarkoittaa.

Analyseissä on monissa kohdin puutteita perusasioissa. Joskus vastaan kävelee täydellistä ymmärtämättömyyttä, kuten tapauksessa jossa ulkomainen ydinvoima- automaation "asiantuntija" väittää kirkkain silmin digitaalisen verkkotekniikan perus- vikaantumismekanismeja mahdottomiksi vastoin tosiasioita, joita koulutetaan Suomessa jopa ammattikoulutasolla.

## Toimintakulttuuri

Toiseksi perussyöksi väitän toimintaproses- sien ylenkatsomista. Ydinvoima-automaati-

ossa - viranomaistoiminta mukaan lukien - on perinteisesti totuttu tarkastelemaan suunnittelua itsessään, an sich, "näkeehän tuon suoraan päältäkin" -mentaliteetilla. Ajattelutapa on toiminut niin kauan kuin suunnitteluongelma ja -toteutus ovat olleet riittävän yksinkertaisia yksittäisen in- sinöörin käsityskyvyn kannalta. Muuta- man ison yleisjärjestelmän sijaan laitoksilla on ollut useampia pienempiä järjestelmiä, tai järjestelmien laitteistojen ja toiminto- jen välillä on ollut siinä määrin selkeämpi suhde, että osakokonaisuuksien hallinta on ollut intuitiivisesti helpompaa.

Verkottuneen, ohjelmistopohjaisen au- tomaatioteknologian osalta tarvitaan kuitenkin jämerämpiä apuvälineitä. Turval- lisuustarkastelu vaatii kokonaisuusien hallintaa, informaation synteesiä. Nyky- aikaisen automaatiojärjestelmän toimin- nallisuuden, suunnittelun tasojen ja kyt- kentöjen määrä ja monimutkaisuus ylittää monissa tapauksissa yksilön laskentakapa- siteetin, ja kokonaisuuden hallinta edellyt- tää useamman eri toimijan - yksilön tai or- ganisaation - välistä kommunikaatiota.

Normaalissa ICT-maailmassa vakiintunut ratkaisu monimutkaisuuden hallintaan on vaatimusorientoitunut suunnittelu, jossa tarpeet (ja tarpeiden todentaminen) erotetaan selvästi tarpeiden toteutuksesta ja toteutuksen suunnittelusta. Valitettavas- ti ydinvoimalaitosautomaation alalla vaati- muslähtöisyyden dogmi on varsin pahasti ylenkatsottu. Ylenkatsottu on myös suun- nittelun tukiprosessina toimivaa konfigu- raationhallintaa, jonka osa-alue, muutos- tenhallinta, on myös ydinvoima-alalla tun- netumpi.

Ei ole suurensuuri salaisuus, että ydin- voima-alan vaatimusten ja konfiguraati- on hallintakäytännöt eivät ole järin esi- merkillisiä, tarkasteli tilannetta kansallises- ti tai kansainvälisesti. Laajoissa projekteissa nämä ovat kuitenkin tärkeimmät työkalut, joissa epäonnistuminen aiheuttaa väis- tämättä ongelmia. Ylenkatse on havaitta- vissa myös eurooppalaisissa alan standar- deissa ja ohjeistoissa. Keskeiset suunnitte- lu- ja suunnittelun tukiprosessit ovat kyllä

nimeltä löydettävissä, mutta ohjeita tai kri- teeristöä kelvollisen toiminnan tason tun- nistamiseksi ei juuri anneta. Sama pätee valitettavasti pitkälti myös omaan YVL- oh- jeistoomme. Vertailukohtana voidaan tar- kastella esimerkiksi testaamista, jonka pai- nottamista pidetään perinteisesti luonno- lisena. Testaaminen toki on ensisijainen laadunhallinnan keino. Tosiasia on kuiten- kin se, että testauksen tuloksilla ei ole juu- rikaan uskottavuutta, mikäli ei tiedetä mitä tuloksia testeiltä halutaan (vaatimukset) tai mitä tuotetta ollaan testaamassa (konfigu- raationhallinta).

Lisänsä kuvaan tuovat modernit pro- jektikäytännöt ja monitoimittajaympäris- tö. Laajojen suunnittelutehtävien jakami- nen eri organisaatioille ja organisaatioyk- siköille luo alihankintaketjuineen amee- ban, jonka hallinta vaatii rautaista projek- tiosaamista. Yksi ajankuvan luonteenpiirre tuntuu olevan vanhan, mutta koetellun pääsuunnittelijakulttuurin hiljattainen ra- pautuminen.

Siinä missä vanhakantaisessa suunnit- telukulttuurissa perinteisesti on löytynyt taho, jolla on ollut sekä kyky että mah- dollisuus lausua tosiasiat ääneen, nykyor- ganisaatioissa vaikuttaa siltä, että tekni- nen asiantuntemus ja äänessä olevat eri tason managerit on erotettu puuhastele- maan toisistaan riippumattomasti. Pirstou- tumisesta seuraava "jaettu vastuu" merkit- see kuitenkin turhan monessa tapauksessa samaa kuin "ei vastuuta". Organisatoristen raja-aitojen ja roolien taakse on helppoa käpertyä suojaan ikävältä reaali- maailmalta; näkemys turvallisuuskulttuurista tämäkin.

## Liiketoimintaympäristö

Automaation liiketoimintaympäristön vai- kutus näkyy etenkin laitekelpoistukses- sa. Viranomaiselle monia kertoja esitetty argumentti on, että jonkin tietyn laitteen laatuvaatimuksia tulisi alentaa sen takia, koska kyseiseen tarkoitukseen ei ole saata- villa kelpoistettavissa olevaa laitetta.

Argumentti on puoleksi totta, puolek- si väärä. Markkinatalouden kylmä fakta on se, että toiminnan mielekkyys lasketaan ra-

hassa. Liiketaloudellisen toiminnan tulee jatkuakseen olla kaikille osapuolille voitollista. Tiettyjen laitetyyppien osalta tarjonta on valitettavan suppeaa. Laitetoimittajan kannalta ydinvoima-automaatio ei ole suurimpia markkina-alueita, ja alueella toimiminen vaatii panostusta sekä tuotteiden korkealaatuisuuden varmistamiseen että osoittamiseen.

Pienillä markkinoilla tämä tarkoittaa väistämättä sitä, että korkeaa laatua ja kelpoistusta haluavien asiakkaiden tulee olla valmiita maksamaan tuotteistaan hyllylaatua huomattavasti korkeampaa hintaa. Esimerkiksi Suomessa automaatiolaitteiden tiukimmassa turvallisuusluokassa vaadittava tyyppihyväksyntä on vain riippumattoman arviointielimen työtä, jota on ostettavissa rahalla. Laitetoimittajan motiivi tarvittavan informaation luovuttamiseen – mikä joskus on koettu ongelmaksi – kasvaa sekin liiketoiminnallisen kannattavuuden mukana. Toisaalta, mikäli kelpoistusevidenssiä ei ole, eikä sitä myöskään markkinataloudellisin argumentein löydy, on kyseessä suhteellisen selvä osoitus siitä, ettei laitetyyppiä tulisi käyttää turvallisuuskriittisissä sovelluksissa.

Viranomaisen rooliin tai mahdollisuuksiin ei kuulu kompensoida huonoa laitetarjontaa laatuvaatimuksia tiputtamalla. SAHARA-periaate tarkastellaan state-of-the-artia, ei markkinatilannetta vastaan.

## Viranomaisen toiminta

Säteilyturvakeskus on parasta aikaa uusimassa YVL-ohjeistoaan. Automaation kannalta mielenkiintoisimmat ovat järjestelmien suunnittelua koskeva ohje STUK YVL C-2, sekä sähkö- ja automaatiolaitteita koskeva ohje STUK YVL F-7.

YVL-ohjeet ovat viranomaisohjeita, joiden rooli on asettaa yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset, käytännössä hyväksynnän rajat. Suunnitteluohjeita YVL-ohjeet eivät ole, vaikka suunnitteluvaatimuksissa ne tulee lähdemateriaalina huomioidakin. Ohjeiston on oltava myös riittävän väljä mahdollistaakseen tasapuolisesti erilaisten ja eri toimittajien laitostyyppien ja

teknisten ratkaisujen lisensoitavuuden, mikäli nämä ovat riittävän turvallisia. Näistä syistä myös uudet YVL-ohjeet tulevat olemaan siinä määrin moniselitteisiä ja tulkinnanvaraisia, että kritisoiva palaute on väistämätöntä.

Tulevan ohjeiston automaatiolle asetama vaatimustaso tulee pysymään valtaosin samana. Sitkeästi elävä harhaluulo on se, että nykyisen ohjeen YVL 5.5 vaatimustaso olisi jotenkin erityisen korkea. Huhu ei pidä paikkaansa, sillä turvallisuuskriittisen ohjelmistopohjaisen ydinvoima-automaation tämänhetkinen vaatimustaso on merkittävästi matalampi verrattuna esimerkiksi ilmailu- ja avaruusalalan referensseihin. Mikäli reaktori osaisi lentää, se ei saisi lentolupaa.

Tarkastuksen painopisteitä tullaan korjaamaan tulevassa ohjeistossa joiltain osin.

Edellä kuvatun ohjelmistopohjaisen teknologian monimutkaisuuden ja kerättyjen kokemusten perusteella tarkastuksen painopistettä siirretään varsinaisen tuotteen tarkastamisesta toimintatapojen ja -prosessien tarkastamisen suuntaan. Tämä mahdollistaa varhaisemman puutumisen mahdollisiin ongelmatilanteisiin, ja on myös STUKin resurssien käytön kannalta tehokkaampaa.

Suunnittelutoiminnan hyväksyttävyydessä painotetaan enemmän vaatimuslähdistä suunnittelua ja dokumentointia

Laitekelpoistamisessa kannustetaan käyttämään entistä enemmän erilaisten arviointielimien lausuntoja. Tämä on STUKin resurssien kannalta käytännön välttämättömyys.

## Lopuksi

Tämän artikkelin keskeinen viesti on se, että merkittävä osa automaation ongelmista ei oikeastaan ole ohjelmistopohjaisen automaatioteknologian syytä, vaan syyt - joihin myös voidaan puuttua - löytyvät inhimillisestä toiminnasta; tietotaidosta, toimintaprosesseista, ja asennoitumisesta. Omaa elämäänsä eläville maailmoille, kuten turvakäyttöön kelpaavien laittei-

den markkinatilanteelle, emme välttämättä pienenä kansakuntana voi paljoakaan. Toivottavaa on, että ydinvoiman uuden tuleamisen aiheuttama kysynnän kasvu ja toisaalta teollisuusautomaation yleinen vaatimustason nousu korjaavat tilannetta parempaan suuntaan.

Suurten linjojen lomassa on paljon pieniä yksityiskohtia ja harmaansävyisiä alueita. On selvää että keskustelua, koulutusta ja yhteistyötä tarvitaan. Laajojen ohjelmistopohjaiseen teknologiaan perustuviin kokonaisuuksiin arviointiin liittyvä oppimisprosessi on käynnissä myös meillä Säteilyturvakeskuksessa.

■

Mika Koskela  
Tarkastaja  
Sähkö- ja automaatiojärjestelmät  
STUK  
mika.koskela@stuk.fi



# Ydinfysikaalisesta OIVALLUKSESTA voiman tuotantoon

*Lise Meitner oli lenkillä joulun aattona 1938 sisarenpoikansa Otto Frischin kanssa Kungälvin tienoilla Göteborgin pohjoispuolella Etelä-Ruotsissa. Lise Meitner käveli reippaasti ja Otto Frischer hiihti. Frisch oli kiinnostunut lähinnä magneettikentän vaikutuksesta neutroneihin kun taas Meitner yritti kääntää keskustelua orastaviin ajatuksiinsa uraaniytimen käyttäytymisestä. Keskustelu kääntyi Meitnerin haluamalle suunnalle, mikä sittemmin johti ytimen pisaramallin ja fissio-käsitteen muodostumiseen. Perusta ydinvoiman tuottamiselle oli luotu.*

**A**ikoinaan pyrin varmentamaan ydinfysiikan suomenkielisten termien vastineet ruotsiksi. Käytävissäni oli mm isoäitini veljen Hjalmar Tallqvistin kirja "Nyare strålnings- och atomfysik". Hän oli Helsingin yliopiston teoreettisen fysiikan professori ja varsin tuottelias alan kirjojen tekijä, joista minä aikoinaan sain tekijäkappaleet isäni kautta.

Tästä kirjasta ei löytynyt vastinetta esimerkiksi sanoille ytimen halkeaminen, fissio tai itseään ylläpitävä ketjureaktio. Nämä puutteet olivat käsittämättömiä varsinkin kun kirjan nimi oli Nyare strålnings- och atomfysik. Asia selvisi vasta kun tarkistin kirjan painatusvuoden: 1923 – viisitoista vuotta ennen Meitnerin oivallusta. Annoin anteeksi kirjoittajalle.

## Alkutaipaleen reaktoreita

Ensimmäiset reaktorifysikaaliset kokeet tehtiin alikriittisellä reaktorilla eli miilulla. Ensimmäinen ihmisen aikaansaama teknillinen ketjureaktio käynnistyi 2.12.1942 kello 15.25 paikallista aikaa Chicagossa Yhdysvalloissa ja kesti 28 minuuttia. Reaktorin lämpöteho oli vaatimattomasti puoli wattia. Todetakaan, että nykyinen fuusiotutkimus ei ole vielä yltänyt näinkään pitkälle.



Lise Meitner (1878-1968). Kuva on vuodelta 1900.

Voimantuotantoon tarkoitettu reaktori voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Fysikaalisina päävaihtoehtoina ovat fissio ja fuusio. Fissioreaktorit voidaan jakaa termisiin ja nopeisiin. Polttoaineena voi olla luonnon uraani, rikastettu uraani, toriumista kehitetty uraani tai plutonium. Termiset reaktorit ovat edelleen jaoteltavissa jäähdytteen ja hidastimen mukaan. Hidastimena on käytännössä tavallinen tai raskas vesi

tai grafiitti. Jäähdytteenä voi niin ikään olla joko tavallinen tai raskas vesi. Myös kaasulähinnä hiilidioksidi ja helium – tulee kysymykseen. Englannin ensimmäisissä reaktoreissa jäähdytteenä oli ilma – se kun on halpaa ja helposti saatavissa olevaa!

Nopeissa reaktoreissa ei ole lainkaan hidastinta. Jäähdytteen tulee olla jokin raskas aine, jotta se ei hidastaisi neutroneita. Käyttökelpoisena, joskaan ei kovinkaan ympäristöystävällisenä, aineena tulee kysymykseen lähinnä sula metalli kuten natrium, elohopea tai lyijy. Teknillisinä ratkaisuina tulevat kysymykseen kiehtus- ja painevesireaktorit, joissa polttoaine sijaitsee joko paineastiassa tai erillisissä paineputkistoissa. Fissioreaktori voi toimia hyötöreaktorina, jolloin se tuottaa uutta polttoainetta enemmän kuin kuluttaa alkuperäistä. Hyötöaineena voi olla uraani 'maho' isotooppi tai luonnon torium. Hyötöreaktorit ovat yleensä nopeita, mutta myös termisiä on rakennettu. Yhdysvaltojen ensimmäinen kaupallinen ydinvoimalaitos Shippingport oli terminen hyötöreaktori, joka perustui voimakkaasti rikastettuun uraaniin.

Erilaisin yhdistelmin toteutettuna erityyppisiä ydinvoimalaitoksia voi olla usei-



ta satoja. Eipä ihme että eri maissa lähdettiin liikkeelle eri suuntiin. Maailman ensimmäinen sähköä tuottanut ydinlaitos oli 1952 joulukuun 20. klo 13.50 Idahossa Yhdysvalloissa käynnistynyt nopea koereaktori. Tosin tuotettu sähköteho 200 wattia riitti ylläpitämään vain neljää hehkulamppua. Laitoksen varsinainen merkitys onkin että sillä pystyttiin osoittamaan hyötöreaktorin toiminta.

Ensimmäisen varsinaisen siviilikäyttöön tarkoitetun ydinvoimalaitoksen kunnia lieinee annettava neuvostoliittolaiselle laitokselle, joka käynnistettiin 27.6.1954 klo 17:30 Obninskissä, 100 km Moskovasta lounaaseen. Sen nimenä oli AM-1; Atom Mirny eli rauhanomainen atomi. Laitoksen sähköteho oli peräti 5 megawattia.

AM-1 oli Neuvostoliiton ainoa sähköä tuottava reaktori kymmenen vuotta. Laitos oli käytössä peräti 48 vuotta ja suljettiin se 29.4.2002. Reaktori oli tyypiltään grafiittihidasteinen kevytvesijäähdytetty lievästi rikastettua uraania käyttävä kiehutusvesijäähdytteinen kanavareaktori.

Kanavarakenteestaan johtuen laitos oli sopiva plutoniumin tuotantoon, mutta fyysikaltaan se ei missään nimessä ollut sopiva rauhanomaiseen käyttöön. Tämä nimityksellä RBMK tunnettu reaktorityyppi tuli sittemmin surullisen kuuluisaksi Tšernobylin onnettomuudesta.

Maailman ensimmäinen kaupallinen ydinvoimalaitos oli Calder Hall Englannissa. Laitos oli tyypiltään kaasujäähdytteinen grafiittihidasteinen luonnonuraania käyttävä reaktori. Sen sähköteho oli 50 MW. Kuningatar Elisabeth II vihki Calder Hallin käyttöön 17.10.1956, joskin ensivaiheistus valtakunnan verkkoon oli tapahtunut jo 27.8.1956.

Nopea reaktori jäi lähinnä teknillisistä vaikeuksista ja suurista kustannuksista johtuen sivuun kehityksen pääsuunnasta maailmanlaajuisesta valtavasta kehityspa-noksesta huolimatta.

Neljännän polven reaktoreihin panostava kehitystyö on kuitenkin viime vuosina herättänyt uutta kiinnostusta nopeisiin hyötöreaktoreihin.

## Monenlaisia reaktoreita

Yhdysvalloissa oli alkuunsa tavoitteena aluskäyttöön soveltuva voiman lähde. Rikastettua uraania polttoaineena käyttävä painevesireaktori oli tähän tarkoitukseen sopiva mm suhteellisen pienen kokonsa puolesta. Ensimmäinen ydinkäyttöinen sukellusvene USS Nautilus laskettiin vesille 30.9.1954. Ydinkäyttöisiä jäänmurttajia on sittemmin rakennettu arktisten alueiden tarpeita varten. Jotkut niistä on reaktoreita lukuun ottamatta valmistettu Suomessa.

Monet maat aloittivat luonnon uraanilla, jotteivät ne olisi tulleet riippuvaisiksi yhdestä rikastuspalvelun toimittajasta. Englannissa, Ranskassa ja Italiassakin aloitettiin luonnon uraania käyttävillä grafiittihidasteisilla kaasujäähdytteisillä reaktoreilla. Kanadassa ja Ruotsissa uskottiin enemmän raskasvesihidasteiseen reaktoriin, jonka polttoaineena oli niin ikään luonnon uraani. Samantapaisia ajatuksia oli myös Sveitsissä, vaikka siellä ei tällä linjalla päästy koereaktoria pidemmälle. Uraanin rikastuspalvelun kehityksessä uusien toimittajien myötä luonnon uraaniin perustuvat reaktorit jäivät vähemmistöön. Puhtaasti teknillis-kaupallisten näkökohtien ohella myös politiikka vaikutti tyyppivalintaan. Kanada pitää edelleen kiinni paineistettuun putkireaktoriin perustuvasta luonnonuraaniraskasvesilinjastaan. Joitakin yksittäisiä reaktoreita on toimitettu myös vientiin. Suomeenkin kaavailtiin tietystä vaiheesta Kanadan Candu-tyyppistä raskasvesireaktoria. Motivaationa oli mm. valmistuksen kotimaisen osuuden nostaminen.

Ruotsi siirtyi sittemmin kevytvesilinjalle rakentamalla yksitoista kiehutusvesireaktoria – joista kaksi Suomeen – ja kolme painevesireaktoria.

Iso-Britannian laitosvalinta osoittautui varsin mutkalliseksi. Kaasujäähdytteisen linjan luonnon uraani vaihdettiin rikastettuun. Koko tekniikka pyrittiin sitten korvaamaan kanadalaista perua olevalla raskasvesi-kiehutusvesireaktorilla. Tämä päättyi umpikujaan samaan tapaan kuin raskasvesilinja Ruotsissakin. Seuraavana olikin sitten kevytvesi-painevesireaktori.

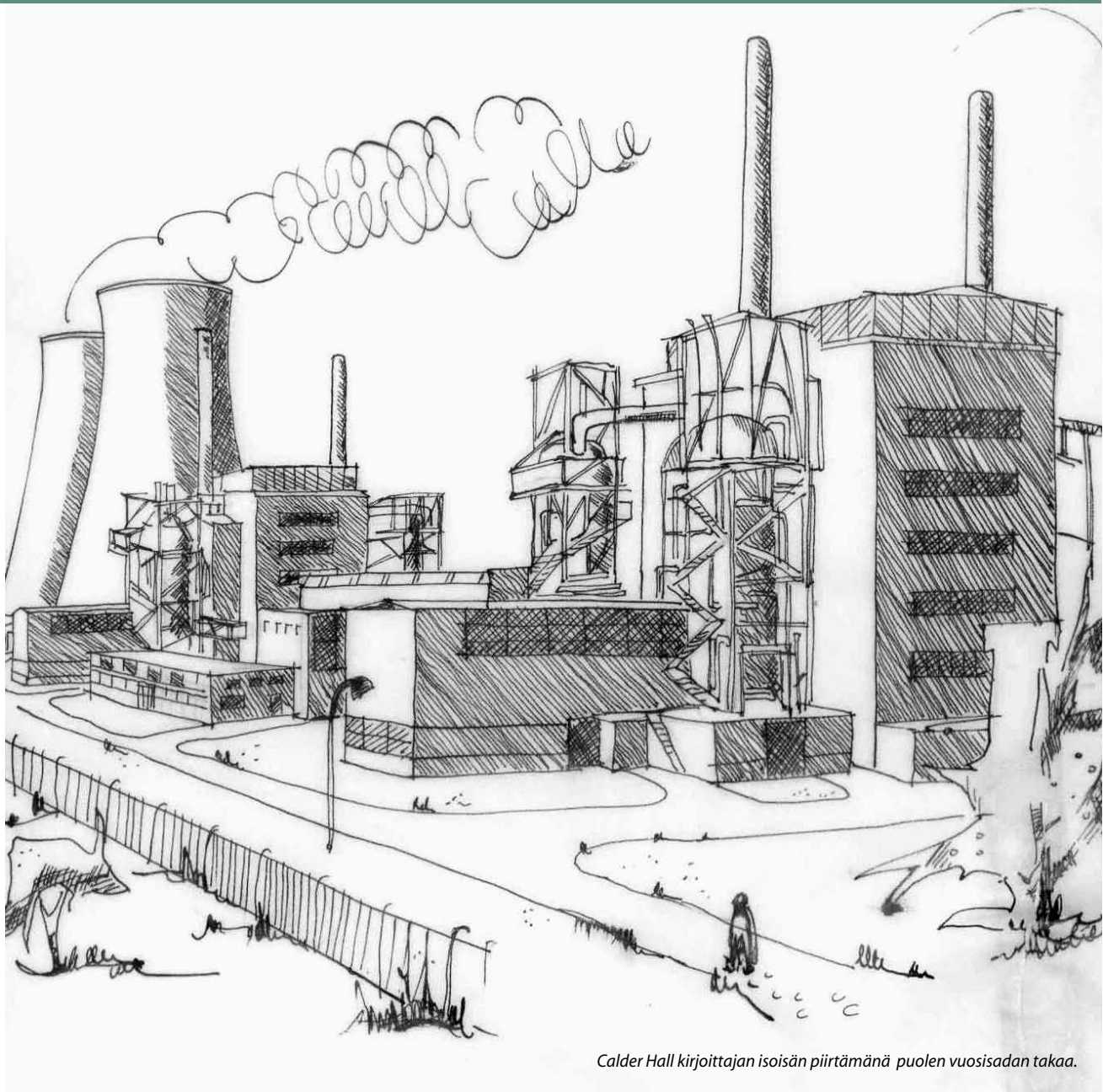
Ranskassa rakennettiin joukko grafiittihidasteisia kaasujäähdytteisiä reaktoreita brittien mallin mukaan. Tästä siirryttiin Westinghousen lisenssin pohjalta kevytvesi-painevesi tekniikkaan, josta sittemmin kehitettiin oma ranskalainen tyyppi. Ranskalais-saksalaisena yhteistyönä syntyi seuraavassa vaiheessa uudenaikaistettu painevesireaktori, jollainen nytemmin on rakenteilla mm. Suomessa.

Saksassa AEG rakensi amerikkalaisen General Electricin lisenssin pohjalta kiehutusvesireaktoreita ja Siemens Westinghousen lisenssin pohjalta painevesireaktoreita. Seuraavassa vaiheessa nämä toiminnot yhdistettiin Kraftwerk Unioniksi, joka valmisti kumpaakin tyyppiä. Omintakeisena reaktorityypinä saksalaiset kehittivät grafiittihidasteisen kaasujäähdytteisen korkealämpötilareaktorin. Polttoaine muodostui hieman tennispalloa pienemmistä grafiittipalloista, jotka sisälsivät suuren joukon pieniä rikastettuja uraanihippusia. Jäähdytteenä oli jalokaasu helium.

Erityispiirteensä oli luonnon toriumin muuttaminen käyttökelpoiseksi ydinpolttoaineeksi. Demonstraatiolaitoksen jälkeen rakennettu 300MWe:n koelaitos oli toiminnassa Saksassa kymmenisen vuotta. Tämä tekniikka on saanut viime aikoina uutta vauhtia Etelä-Afrikan päätettyä rakentaa koelaitoksen yhteistyössä eurooppalaisten, amerikkalaisten ja kiinalaisten kanssa. Tavoitteena on käynnistää kaupallinen laitos vuonna 2020.

Nopeisiin reaktoreihin suuntautuneen kehitystyön saksalaiset, niin kuin myös mm. amerikkalaiset, lopettivat jo aloitetun rakennustyön jälkeen.

Eksoottisista mutta pääosiltaan vain piirustuspyöydälle jääneistä reaktorityypeistä mainittakoon ruotsalaisten kaupunkikäyttöön tarkoitettu kaukolämpöreaktori SECURE sekä sen sähköä tuottava muunnos PIUS. Näiden erityistavoitteena oli maallikonkin ymmärrettävissä ja hyväksyttävissä oleva passiivinen turvallisuus. Tanskalaiset rakensivat aikoinaan parikilowattisen koereaktorin, jonka polttoaineena oli alipaineistetussa teräsastiassa oleva homogeeni-



Calder Hall kirjottajan isosän piirtämänä puolen vuosisadan takaa.

nen uraaniliuos. Mielenkiintoinen on myös alikriittinen reaktori, jota pidetään käynnissä ulkopuolisen neutronilähteen avulla. Brasilialaisilla on omintakeisena kehitystyönä vesihidastettu ja -jähdytetty leijupeti-painevesireaktori. Polttoaineena on altpäin pumpattavassa paineistetussa vedessä leijuvat muutaman millimetrin suuruiset uraanipallot. Jähdytysveden tulon lakkaaminen saa uraanipallot putoamaan paineastian pohjalle jolloin reaktori sammuu passiivisesti. Idean isänä toimiva Farhang Sefidvash oli aikoinaan tutkijana Suomessakin Teknillisen korkeakoulun silloisessa reaktorilaboratoriossa Otaniemessä.

## Reaktorityypit seestyvät

Puhtaasti kaupallisiksi vaihtoehtoiksi ovat toistaiseksi jääneet pääasiassa vain kevyt-

vesilinjan painevesi- ja kiehutusvesireaktorit. Kummallakin tyypillä on omat hyvät puolensa; tyypin valinta jää usein kaupallisten näkökohtien varaan. Näin Suomeenkin valmistui aikoinaan kaksi kumpaakin tyyppi olevaa ydinvoimalaitosta; kaksi painevesireaktoria Loviisaan ja kaksi kiehutusvesireaktoria Olkiluotoon. Ne ovat kaikki toimineet erinomaisen hyvin jo vuosikymmeniä. Seuraavana onkin sitten vanhat kokemukset uuteen tekniikkaan saksalais-ranskalaisin voimavaroin yhdistävä EPR – European Pressurized Water Reactor. Suomessa suunnitteilla oleville seuraaville kolmelle - neljälle ydinvoimalaitokselle on vaihtoehtoina jo seitsemän alustavasti hyväksyttyä laitostyyppiä.

Yksi näistä on japanilainen kiehutusvesireaktori, joka sisältää teknillisiä piirtei-

tä ruotsalais-suomalaisesta kehitystyöstä. Muista painevesireaktoreista mainittakoon amerikkalaisen Combustion Engineeringin System 80+, joka tuli yrityskauppojen kautta ensin ruotsalaisomistukseen, sitten brittiläiseen ja nyttemmin japanilaiseen omistukseen. Korealaiset ovat kehittäneet sitä edelleen ja ovat rakentaneet ja rakentavat parhaillaankin useita kotimaahansa ja ovat myyneet ulkomaillekin, hiljattain Lähi-Itään kokonaistoimituksina käytöineen.

Tapani Graae  
tapani@graae.com

# Pääkaupunkiseudun energiahuoltovaihtoehtojen kansantaloudelliset vaikutukset

Tämä artikkeli on julkaistu ensimmäisen kerran ATS Ydintekniikan numerossa 2/1981. Artikkelin tarjoaa hyvän vertailukohdan nyt rakenteilla ja hankkeilla olevien ydinvoimalaitosten myötä jälleen esiin nousseelle keskustelulle eri energiantuotantovaihtoehtojen vaikutuksesta kansantalouteen ja mahdollisuuksista hyödyntää ydinenergiaa sähkön ohella myös lämmitysenergian tuottamiseen.

Pääkaupunkiseudun sähkö- ja lämpöhuollon tulevia vaihtoehtoja on tutkittu viime vuosina eri osapuolten toimesta. Konventionaalisen, hiileen perustuvan energiantuotantovaihtoehdon lisäksi on selvitetty myös suurten sähköä ja lämpöä tuottavien ydinlämmityslaitosten sekä pienempien pelkästään lämpöä tuottavien ns. Secure-ydinlämpölaitosten mahdollisuuksia pääkaupunkiseudulla.

Aikaisemmat tutkimukset suoritettiin pääasiassa eri vaihtoehtojen taloudellisuustarkasteluina. Viimeisimpänä vaiheena on kuitenkin tarkasteltu myös eri vaihtoehtojen kansantaloudellisia vaikutuksia. Tämä tutkimus suoritettiin KTM:n rahoituksella VTT:n ja IVOn yhteistyönä ja se valmistui käytännössä vuoden 1980 lopussa. Seuraavassa esitetään lyhyt yhteenveto tutkimuksen tuloksista. Täydellisenä tutkimus on raportoitu julkaisussa [3].

## Tutkimuksen lähtökohta

Pääkaupunkiseudun energiahuoltajärjestelmä on niin laaja, että sitä ei ole syytä tarkastella kokonaan irrallisena valtakunnallisesta sähköntuotantajärjestelmästä. Tämän vuoksi pääkaupunkiseudun erilaisiin rakentamishjelmiin on tässä tutkimuksessa liitetty optimaalinen valtakunnallinen sähköntuotanto.

Rakennusohjelmien osalta tutkimus pohjautuu osaltaan viitteeseen [1] sekä muihin samoihin aikoihin suoritettuihin tutkimuksiin, joiden lähtökohtana oli vuoden 1978 hintataso ja silloiset energiankulutusennusteet. Jotta tämän tutkimuksen tulokset olisivat vertailukelpoisia aikaisempiin verrattuna, on tässä käytetty samaa hintatasoa. Polttoainehintojen reaalinouksiksi on oletettu kaikkien polttoainete osalta 2%/a.

Tutkimuksessa on tarkasteltu aikaväliä 1990 - 2005 ja kolmea taulukon 1 mukaista perusvaihtoehtoa, joista

- hiilivaihtoehto (H) sisältää pääkaupunkiseudulla viisi uutta hiililämmityslaitosta

	Hiilivaihtoehto	SECURE-vaihtoehto	Ydinvaihtoehto
Pääkaupunkiseutu	1990 hiili 350/460 Vuosaari	1989 SECURE - /400 Malmi	1990 ydin 1000/800 Kopparnäs
	1991 hiili 150/200 Suomenoja	1991 SECURE - /400 Malmi	1993 ydin 1000/800 Kopparnäs
	1993 hiili 350/460 Vuosaari	1992 hiili 250/340 Salmisaari	1995 hiili 250/340 Salmisaari
	1995 hiili 200/260 Salmisaari	1997 hiili 200/260 Hanasaari	
	1998 hiili 200/260 Hanasaari		
Valtakunnallinen lauhdesähkö	1990 ydin 1000 MW	1990 ydin 1000 MW	1997 ydin 1000 MW
	1995 - " -	1993 - " -	2000 - " -
	2000 - " -	1997 - " -	2001 - " -
	2004 - " -	2001 - " -	
		2005 - " -	
Valtakunnallinen kaasuturpiinivoima	- 1990 0 MW	0 MW	0 MW
	1991 - 1995 0 MW	59 MW	0 MW
	1996 - 2000 229 MW	570 MW	591 MW
	2001 - 2005 381 MW	747 MW	750 MW

Taulukko 1. Vertailtaviin vaihtoehtoihin liittyvät rakennusohjelmat pääkaupunkiseudulla ja niitä vastaava optimoitu (10% korko, 2%/a nousevat polttoainehinnat) erillinen valtakunnallinen sähköntuotanto. Laitosten valmistumisvuodet ja tyypit 1, 2/.

ARKISTON  
HELMIÄ



- ydinvaihtoehto (Y) kaksi 1 000/800 MW ydinlämmityslaitosta (laskennallinen sijoituspaikka Kopparnäs) ja yhden hiililaitoksen,

- Secure-vaihtoehto (S) sisältää kaksi 400 MW kaukolämpötehoista Secure-ydinlämpölaitosta ja kaksi hiililaitosta.

Lisäksi kuhunkin vaihtoehtoon sisältyy 10 % reaalkorolla optimoitu valtakunnallinen sähköntuotannon rakennusohjelma, jonka on oletettu perustuvan lauhdesähkön osalta ydinvoimaan. Valtakunnallinen sähkönkysyntäarvio, johon taulukon 1 rakennusohjelmat perustuvat, on seuraava:

- v. 1990 57,6 TWh,
- v. 1995 67,1 TWh,
- v. 2000 76,6 TWh ja
- v. 2005 86,1 TWh.

Ennuste on vuoden 1995 osalta hieman korkeampi kuin KTM:n viimeisimmän arvioon "Energiatalous v. 1995" ylempää skenaarioria vastaava kysyntä 64 TWh.

Pääkaupunkiseudun energiahuoltojärjestelmän laajuus ja eräisiin vaihtoehtoihin liittyvät ydinvoimalaitokset aiheuttavat sen, että tuotantolaitosten rakentamiseen liittyvää päätöksentekoa ei voida tehdä irrallaan valtakunnallisesta energiapolitiikasta. Tämän päätöksenteon avuksi tarvitaan tietoa liiketaloudellisten seikkojen lisäksi myös muista eri vaihtoehtojen seurannaisvaikutuksista. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on vertailla eri vaihtoehtoja kansantaloudellisten vaikutusten osalta ja täten täydentää aikaisempia tutkimuksia /1,2/.

## Tarkastellut kansantaloudelliset vaikutukset

Tutkimuksessa on tarkasteltu pääosin seuraavia neljää kansantaloudellista tekijää: kokonaistuotoksen lisäys (kansantalouden liikevaihto), kotimaisuusaste, tuonnin kasvu ja työllisyysvaikutukset.

Kutakin tekijää on tarkasteltu kolmella eri tasolla:

**Ensimmäisellä tasolla** tarkastellaan rakennusohjelmien välittömiä vaikutuksia, ts. energian tuottamisesta vastaavalla yritykselle tulevia välittömiä kustannuksia, niiden jakautumista kotimaisiin ja ulkomaisiin osiin sekä välittömiä työllisyysvaikutuksia,

Hanke	Tark. taso	Kotimaisuusaste/%	Kokonaistuotoksen lisäys Mmk	Tuonnin lisäys/Mmk	Työllistävää vaikutus htv
Ydin 1000/- (3000 MW <sub>th</sub> )	1	61,6	3100	1190	7936
	2	48,3	4072	1602	10280
	3	46,4	4208	1672	13581
Ydin 1000/800 (3000 MW <sub>th</sub> )	1	61,4	3182	1228	8080
	2	48,1	4176	1652	10473
	3	46,2	4314	1723	13841
SECURE-/400 (400 MW <sub>th</sub> )	1	64,1	561	201	1473
	2	48,3	758	290	1947
	3	46,1	785	304	2607
HIILI 350/460 (890 MW <sub>th</sub> )	1	56,5	725	316	1403
	2	43,0	918	413	1866
	3	41,4	945	427	2522
HIILI 250/340 (650 MW <sub>th</sub> )	1	56,5	500	218	968
	2	43,0	640	285	1287
	3	41,4	659	295	1739
HIILI 150/200 (390 MW <sub>th</sub> )	1	56,5	370	161	716
	2	43,0	469	211	952
	3	41,4	483	218	1287
KAASUT 2 x 20	1	28,2	40,2	28,8	26
	2	26,8	50,5	29,4	30
	3	26,3	50,8	29,6	37

Taulukko 2. Yhteenveto tuotantokoneistojen rakentamisen kansantaloudellisista vaikutuksista.

**tasolla 2** on tarkasteluissa mukana myös tuotannon kerrannaisvaikutukset kansantaloudessa. Tuonnin ja kotimaisuusasteen osalta tämä merkitsee kotimaisten tuotteiden alihankintaketjun huomioon ottamista,

**tasolla 3** otetaan huomioon myös kotimaassa maksettujen palkkojen aiheuttaman lisäkulutuksen vaikutukset, ts. tarkastellaan rakennusohjelmien vaikutusta koko kansantalouteen.

Em. vaikutuksia on tutkittu eri vaihtoehtojen osalta tarkastelemalla koko energiatuotantoa. Lisäksi on erikseen tarkasteltu eri osatekijöitä pääjaotuksen ollessa energiantuotannon rakentamistoiminta ja käyttötoiminta, jotka edelleen jakautuvat eri osatekijöihin.

Seuraavassa tuloksia on esitelty lyhyesti siten, että ensin tarkastellaan yksittäisten voimalaitosten rakentamisen vaikutuksia ja sitten koko taulukon 1 mukaisten vaihtoehtoisten rakennusohjelmien vaikutuksia.

Lopuksi esitetään, pääosin aikaisempien tutkimusten pohjalta, eri vaihtoehtojen puhdas kustannusvertailu sekä herkkyys-tarkasteluja.

## Yksittäisten voimalaitosten rakentamisen kansantaloudelliset vaikutukset

Taulukossa 2 on yhteenveto eri voimalaitosten rakentamisen vaikutuksista kaikilla kolmella tarkastelutasolla. Kuten edellä todettiin, on markkamääräiset vaikutukset laskettu vuoden 1978 rahassa ja kustannustasolla. Mielenkiintoisimpana taulukon 2 tuloksista voitaneen pitää kotimaisuusastetta (Kuva 1).

Tasolla 3 tämä on ydinlauhde-, ydinlämmitys- ja Secure-laitoksilla melko tarkkaan yhtä suuri eli 46,1 - 46,4 %. Hiililämmityslaitoksen vastaava arvo on n. 41,4 %. Jos tarkasteltaisiin vain välitöntä kotimaisuusastetta (tasoa 1), niin tämä olisi Securella suurin (64,1 %). Suurilla ydinlaitoksilla se olisi n. 61,5 % ja hiililaitoksilla 56,5 %. Yleensä erilaisten hankkeiden kotimaisuusasteista puhuttaessa tarkoitetaan juuri tasoa 1, joka kuitenkin saattaa antaa virheellisen kuvan hankkeeseen sijoitetun rahan kotimaahan jäävän osan suuruudesta (taso 3).

Kuvissa 2 - 4 on havainnollistettu laitojen rakentamisen aiheuttamia kokonaistuotoksen ja tuonnin lisäyksiä sekä työllisyysvaikutusta suhteuttamalla ne ko-

**ENERGIAN TUOTANTO**

Vaihtoehto	Taso 1			Taso 3		
	KT	Tuonti	Työll.	KT	Tuonti	Työll.
Y	53566	38507	56393	61377	41427	105609
S	56756	40623	59185	65006	43674	112296
H	55848	40811	54382	62893	43548	100036
Y-H	-2282	-2304	2011	-1516	-2121	5573
S-H	908	-188	4803	2113	126	12260

**RAKENTAMISTOIMINTA**

Vaihtoehto	Taso 1			Taso 3		
	KT	Tuonti	Työll.	KT	Tuonti	Työll.
Y	14881	5494	39256	20500	7875	66696
S	15287	5827	39486	20996	8206	67265
H	13558	4939	35316	18674	7111	60342
Y-H	1323	555	3940	1826	764	6354
S-H	1729	888	4170	2322	1095	6923

**KÄYTTÖTOIMINTA**

Vaihtoehto	Taso 1			Taso 3		
	KT	Tuonti	Työll.	KT	Tuonti	Työll.
Y	46732	40460	18227	48763	40987	44579
S	49719	42530	20541	52033	43126	50457
H	51202	43892	21234	53198	44405	46144
Y-H	-4470	-3432	-3007	-4435	-3418	-1565
S-H	-1483	-1362	-693	-1165	-1279	4313

Taulukko 3. Energiantuotantovaihtoehtojen kansantaloudellisten vaikutusten kumulatiiviset arvot ja kumulatiivisten arvojen erot. Rakentamistoimintaa tarkasteltu vuoden 2000 lopussa. Käyttötoimintaa tarkasteltu vuoden 2005 lopussa. Yhdistettyjä arvoja tarkasteltu jakson 2000 - 2005 puolivälissä. (Yksiköt: Mmk ja htv.)

konaiskustannukseen, laitoksen lämpötehoon ja hintaan.

### Eri rakennusohjelmien vertailu kansantaloudellisten kokonaisvaikutusten osalta

Vaihtoehtojen kumulatiivisia vaikutuksia tarkasteltaessa on rakentamisen tarkasteluajankohta ollut v. 2000, jolloin vuoden 2005 jälkeen valmistuvien laitosten rakentamisaikaiset vaikutukset eivät vaikuta tuloksiin.

Käyttötoiminnan kumulatiivisia vaikutuksia on tarkasteltu v. 2005 ja kokonaisvaikutuksia em. ajankohtien puolivälissä. Tuloksista on esitetty yhteenveto tarkastelutasoilla 1 ja 3 taulukossa 3 seuraavasti:

- taulukossa 2a energiantuotannon yhteisvaikutukset;
- taulukossa 3b rakentamistoiminnan osuus;
- taulukossa 3c käyttötoiminnan osuus.

Merkinnät Y, S ja H viittaavat taulukon 1 rakennusohjelmiin ja Y-H ja S-H ovat eroja hiilivaihtoehtoon nähden.

Kokonaistuotoksen lisäystä kansantaloudessa tarkasteltaessa voidaan todeta, että yhteisvaikutukset ydinvaihtoehdolla ovat pienemmät ja Secure-vaihtoehdolla suuremmat kuin hiilivaihtoehdolla. Erot selittyvät rakentamis- ja käyttötoiminnoista.

Rakentamistoiminnassa sekä ydin- että Secure-vaihtoehtojen vaikutukset ovat suurempia kuin hiilivaihtoehdon. Keskimääräisiksi vuosiarvioiksi muutettuna Y-vaihtoehdon vaikutukset ovat n. 120 Mmk/a ja S-vaihtoehdon n. 150 Mmk/a suuremmat kuin H-vaihtoehdon. Ydinvaihtoehdon rakentamistoiminnan vaikutuksiin on lämmönsiirto johdon rakentamisella suhteellisen suuri vaikutus (Y- ja H-vaihtoehdon kumulatiivinen ero n. 0,4 mrd. mk), kun taas Secure-vaihtoehdon lämmönsiirtojohto on hieman halvempi kuin hiilivaihtoehdon.

Käyttötoiminnan osalta tilanne on päinvastainen: keskimääräiset vuosivaikutukset ovat Y-vaihtoehdolla n. 290 Mrnk/a ja S-vaihtoehdolla n. 80 Mmk/a pienemmät kuin H-vaihtoehdolla. Tämä johtuu suurim-

malta osin polttoainekustannusten eroista, ja näin ollen erot ovat riippuvaisia ydin- ja hiilipolttoaineitten hinnan kehityksestä.

Jos tarkastelut tehtäisiin kokonaistuotoksen sijasta bruttokansantuotteelle, niin tulokset olisivat samansuuntaiset, mutta markkamääräisesti pienemmät kuin edellä (esim. ydinvoimalaitosten rakentamisen aiheuttama BKT:n lisäys on vajaa 30 % kokonaistuotoksen lisäyksestä).

Tuontivaikutuksista voidaan todeta, että kokonaistuonnin osalta ydinvaihtoehto on edullisempi ja Secure-vaihtoehto likimain samanarvoinen kuin hiilivaihtoehto. Polttoainetuonnilla on varsin suuri osuus eri vaihtoehtojen tuonnin eroihin, sillä Y-vaihtoehdon polttoainetuontivaikutukset ovat n. 3,5 mrd. mk (keskimäärin vuositasolla n. 230 Mmk/a) ja S-vaihtoehdon n. 1,4 mrd. mk (80 Mmk/a) pienemmät kuin H-vaihtoehdon. Polttoaineitten hintakehityksellä on näin ollen suuri vaikutus eri vaihtoehtojen tuontivaikutuksiin.

Työllisyysvaikutuksista voidaan todeta, että ydinvaihtoehdon yhteenlasketut työllisyysvaikutukset ovat n. 5 600 htv ja Secure-vaihtoehdon n. 12 300 htv suuremmat kuin hiilivaihtoehdon. Ydinvaihtoehdon työllistävä vaikutus johtuu pääasiassa rakentamistoiminnasta, joka jakaantuu puoliksi voimalaitosten ja puoliksi siirtojohtojen osalle. Secure-vaihtoehdon suhteellisen suuresta työllistävästä vaikutuksesta suurin osa johtuu tuotantokoneistojen rakentamisesta, mutta myös käyttötoiminnalla on merkittävä osuutensa.

### Yhteenveto kustannusvertailun tuloksista sekä herkkyytstarkasteluista

Eri rakennusohjelmien kustannusten vertailu suoritettiin tutkimuksen yhteydessä, jolloin lähtöhintatasona sekä polttoaine- että investointikustannuksille oli vuoden 1978 jälkipuoliskon hintataso /1/. Laskelmat suoritettiin kiinteällä rahanarvolla, ja polttoaineitten reaalihintanousuksi oletettiin 2 %/a kaikille polttoaineille. Investoinneista laskelmiin sisällytettiin valtakunnallisen erillisen sähköntuotannon sekä pääkaupunkiseudun yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon ja siirron vaatimat lisäinvestoinnit vaihtoehtoisilla rakennusoh-

ajelmilla. Muuttuvista kustannuksista otettiin huomioon sekä valtakunnallisen sähköntuotannon että pääkaupunkiseudun sähköntuotannon ja kaukolämmön tuotannon muuttuvat kustannukset. Vuoteen 1990 diskontattujen kokonaiskustannusten osalta todetaan, että

ydinvaihtoehto oli lähes 1,2 mrd. mk, keskimääräisinä vuosikustannuksina lähes 160 Mmk/a edullisempi kuin hiilivaihtoehto,

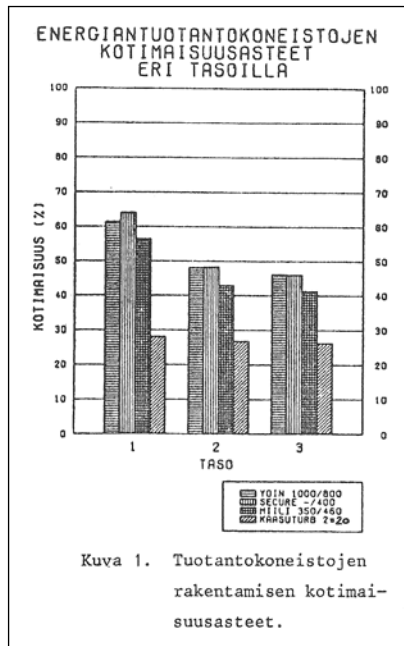
hiilivaihtoehto oli puolestaan n. 150 Mmk (n. 20 Mmk/a) edullisempi kuin Secure-vaihtoehto, kun vertailu pohjautui 10 % reaalikorkokantaan.

Sekä em. kustannusvertailun että kohdan 5 kansantaloudellisen vertailun tulokset riippuvat käytetyistä lähtöolettamuksista. Tärkeimmät tekijät tässä suhteessa ovat korkokanta, investointikustannukset ja polttoainehintakehitys. Lisäksi ydinlämmityslaitoksella vaikuttaa kaukolämmön siirtoetäisyys oleellisesti tuloksiin.

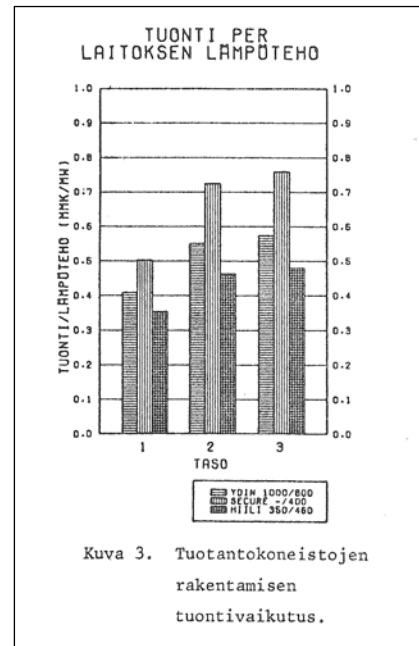
Verrattaessa tämän tutkimuksen polttoainehintoja (v. 1978 taso) ns. suurvoimalaitosselvityksen hintoihin (v. 1980 taso) todetaan, että jälkimmäiset ovat ydinpolttoaineen osalta n. 39 % ja hiilen osalta n. 27 % suurempia. Inflaatiokin huomioon ottaen on nousu tällä lyhyellä aikavälillä ollut nopeampaa kuin laskelmissa oletettu 2 %/a. Vuoden 1980 lopulla hiilen hinta on edelleen noussut, joten hiilija ydinpolttoaineen hintasuhte on säilynyt likimain laskelmissa käytetyssä arvossa (3,3). Ydinlämmityslaitosten investointikustannusarvot ovat vastaavana aikana kasvaneet 23..55 %, joten polttoaine- ja investointikustannukset ovat kasvaneet likimain samassa suhteessa. Reaalihintojen todellisia muutoksia seuraavan kahden vuosikymmenen aikana on kuitenkin mahdotonta mennä ennustamaan edellä mainittujen lyhyen aikavälin muutosten perusteella.

**Muutosten vaikutuksista tuloksiin** voidaan kuitenkin lyhyesti todeta seuraavaa:

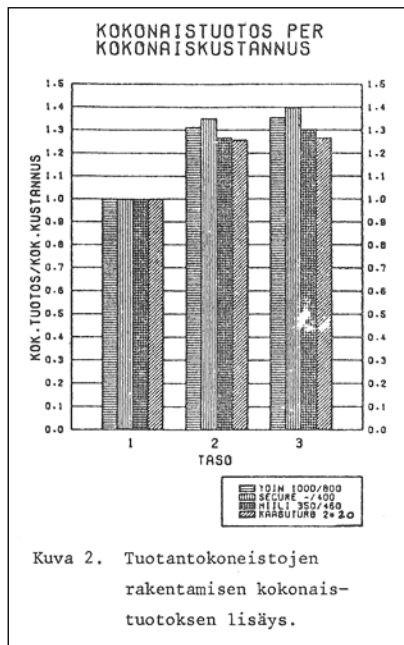
Reaalikoron pienentäminen parantaa Y- ja S-vaihtoehdon taloudellisuutta H-vaihtoehtoon verrattuna. S-vaihtoehto tulee samanarvoiseksi H-vaihtoehdon kanssa 5...6 % korolla, jos muut lähtöolettamukset pysyvät entisellään.



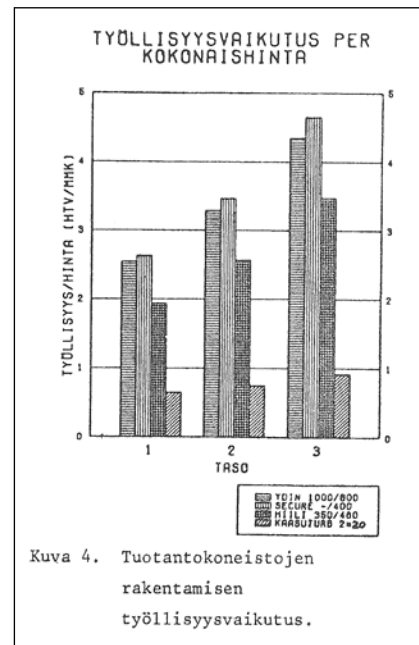
Kuva 1. Tuotantokoneistojen rakentamisen kotimaisuusasteet.



Kuva 3. Tuotantokoneistojen rakentamisen tuontivaikutus.



Kuva 2. Tuotantokoneistojen rakentamisen kokonais- tuotoksen lisäys.



Kuva 4. Tuotantokoneistojen rakentamisen työllisyysvaikutus.

Polttoainehintojen oletettua nopeampi nousu tai hintasuhteen hiili-ydinpolttoaine kasvaminen parantavat Y- ja S-vaihtoehdon taloudellisuutta H-vaihtoehtoon nähden. Samanaikaisesti erot tuonnissa kasvavat Y- ja S-vaihtoehdojen hyväksi. Polttoainehintojen vakiona pysyminen tai oletettua pienempi nousu vaikuttavat luonnollisesti päinvastaiseen suuntaan.

KIRJALLISUUSVIITTEET

[1] Hannus, M., Mankamo, T., Kärkkäinen, S & Tarjanne, R., Secure- ydinlämpölaitoksen soveltuvuus pääkaupunkiseudun kaukolämmitykseen. Helsinki 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio. Tiedonanto 43. 93 s.

[2] Savolainen, I., Vuori, S., Nordlund, G., Tammelin, B., Kärkkäinen, S. & Ranne, A., Ydinvoimalaitosten sijoituspaikkatutkimus, Helsinki 1978. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio. Tiedonanto 36. 108 s.

[3] Kärkkäinen Seppo, Ranne Aulis & Kangas Matti, Pääkaupunkiseudun energiahuoltovaihtoehtojen kansantaloudelliset vaikutukset. Espoo 1981. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Sähkötekniikan laboratorio, Tiedonanto 60. 58 s + liitt. 42 s.

Seppo Kärkkäinen  
Valtion teknillinen tutkimuskeskus  
Sähkötekniikan laboratorio

# Ohjeita ATS Ydintekniikan artikkelien kirjoittamiseen

*Tekstinkäsittelytekniikka on viime aikoina kehittynyt, valokuvauksessa on siirrytty digiaikaan, ja lehtemme on jo muutaman vuoden ajan ollut täysissä väreissä. On siis korkea aika päivittää artikkelien kirjoittajille suunnatut ohjeet ajan tasalle.*

**A**TS Ydintekniikka on jo 39 vuoden ajan julkaissut ydintekniikan alaan liittyviä artikkeleita. Tärkein asia on aina pysynyt samana: kirjoittajalla pitää olla lehden lukijakuntaa kiinnostavaa ja hyödyttävää kerrottavaa ja kyky viestiä asiastaan ymmärrettävästi. Artikkelin aiheita voi kuka tahansa tarjota lehden toimitukselle sähköpostiosoitteeseen [toimitus@ats-ydintekniikka.fi](mailto:toimitus@ats-ydintekniikka.fi) tai ottamalla suoraan yhteyttä johonkuhun lehden sivulla 2 luetelluista toimituskunnan jäsenistä.

Käytännön toimitustyön sujuvuuden varmistamiseksi – ja lehden ulkoasun pitämiseksi sopivan yhdenmukaisena – seuraavassa on esitetty muutamia artikkelin tekoa koskevia käytännön ohjeita.

## Teksti

Artikkelin sopiva pituus on 2 - 4 sivua. Oheisessa kuvassa on esimerkkejä erimittaisten artikkelien merkkipituuksista (luvat bruttopituuksia: välimerkit, välilyönnit jne. siis laskettu mukaan). Otsikon ja ensimmäisen kappaleen väliin tulee muutaman lauseen mittainen johdanto (<http://fi.wikipedia.org/wiki/Ingressi>).

Tekstiä jaksottamaan tarvitaan kuvaavia, lyhyitä ja ytimikkaita väliotsikoita. Väliotsikot ovat nimensä mukaisesti väliotsikoita, eli ingressin jälkeen siirrytään suoraan ensimmäiseen kappaleeseen, ja ensimmäinen väliotsiko tulee vasta ensimmäisen kappaleen jälkeen.

Tekstiä ei ole tarpeen muotoilla kappalejakoa enempää. Sopivia formaatteja puhtaana ASCII-tekstin lisäksi ovat MS Wordin doc ja rtf. Juttua elävöittämään on syytä liittää muutama kuva, graafi tai taulukko. Tekstin loppuun liitetään kuvatestit ja kirjoittajan tiedot (jäljempänä kuvatulla tavalla), mutta itse kuvat pitää toimittaa erillisissä tiedostoissa yhteensopivuusongelmien välttämiseksi ja niiden tarkkuuden säilyttämiseksi mahdollisimman hyvänä.

## Kuvat, graafit ja taulukot

Juttua on syytä elävöittää tekstiä tukevilla valokuviilla, piirroksilla ja graafeilla. Mahdollisimman hyvän kuvanlaadun varmistamiseksi kuvia tai graafeja ei saa lait-

taa tekstinkäsittelyohjelman tuottaman dokumentin sisään, vaan ne pitää toimittaa erillisinä kuvatiedostoina. Kuvan halutun paikan voi osoittaa tekstissä sanallisesti. Pääsääntöisesti kuvia ei numeroida, mikä on hyvää huomioon noihin viitattaessa. Kuviin tulee laatia sellävät kuvatestit, jotka on suoraviivaisinta liittää tekstin loppuun.

Digikuvien tarkkuuden on syytä olla niin suuri kuin mahdollista. Vähimmäiskoko on 650x650 pistettä (palsan levyinen pikkukuva), 1500x1500 pistettä (kahden palstan kuva) ja 2000x2000 pistettä (sivun levyinen kuva). Kirjoittajatielätkkoon tulevan kasvokuvan pitää olla kooltaan vähintään 200x200 pistettä. Oikeudet kuvan julkaisuun on syytä varmistaa sen tekijältä, mikäli ei ole ilmeistä, että kuvan julkaisu on mahdollista sitaatioikeuden rajoissa ilman tekijän lupaa. Sopivia kuvaformaatteja ovat esim. jpg, eps, tiff, pdf ja gif.

Jos juttuun sopiva kuva on paperimuodossa, se voidaan digitoida myös toimituksen toimesta. Näissä tapauksissa kuvat voi lähettää joko suoraan toimituksen osoitteeseen (löytyy lehden kakkosivulta) tai sopia muusta menettelystä jonkun toimituskunnan jäsenen kanssa. Paperikuvat palautetaan lähettäjälle digitoinnin jälkeen, mikäli niiden yhteydessä on kerrottu palautusosoite.

## Kirjoittajan tiedot

Kirjoittajien esittelyä varten tarvitaan seuraavat tiedot: 1) oppiarvo, 2) nimi, 3) organisaatio, 4) titteli/toiminimike, 5) osasto/osaamisalue, 6) sähköpostiosoite sekä 7) kasvokuva, kooltaan vähintään 200x200 pistettä.

Uutisten yhteydessä tarvitaan vain kirjoittajan nimi, joka julkaistaan uutisen lopussa. Kirjoittajalle toimitetaan painoksesta muutama ylimääräinen kappale, mikäli jutun yhteydessä toimitetaan osoite, johon kirjoittajakappaleet lähetetään.

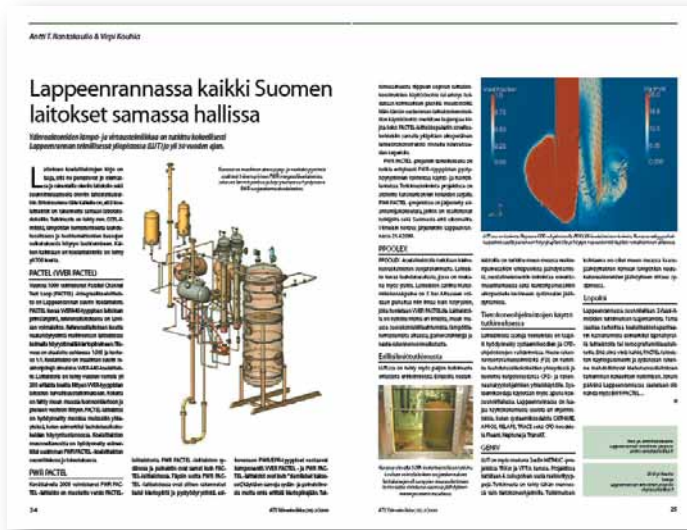
## Jutun toimittamisesta

Jokaiselle artikkelille on toimituskunnan keskuudesta sovittu vastuutoimittaja, joka huolehtii yhteydenpidos-





*Esimerkkejä lyhyehköistä jutuista: yhden sivun juttu (3580 merkkiä), kahden sivun juttu (5750 merkkiä).*



ta kirjoittajaan päin, artikkelin oikolukemisesta ja mahdollisesti tarvittavasta viimeistelytyöstä (pituuden hienosäätö, tiivistäminen, väliotsikoiden lisääminen jne.) Jos kirjoittaja haluaa saada artikkelin nähtäväkseen vedosvaiheessa ennen lehden painamista, tämä onnistuu sopimalla asiasta vastuutoimittajan kanssa.

Tulevien lehtien teemat on kerrottu lehden kakkos sivulla. Tämä ei kuitenkaan sido artikkelin tekijöitä: jokaiseen numeroon mahtuu muutama juttu myös valitun teeman ulkopuolelta. Toimitusaikataulu on pääpiirteissään seuraava: artikkelit vastuutoimitta-

jille tammikuun, huhtikuun, syyskuun ja marraskuun ensimmäisen viikon aikana, toimitustyöhön ja hienosäätöön aikaa viikko, ja taittoon toinen. Näin aikataulutettuna lehti ilmestyy säännöllisesti helmikuussa, kesäkuussa, lokakuussa ja joulukuussa.

Toimitusaikataulu on tietenkin vain viimeinen raja sille, milloin toimitetut artikkelit vielä ehtivät seuraavaan lehteen: juttuja otetaan mielellään vastaan milloin tahansa!

## Muiden ottamien kuvien käyttö

**LEHTIJUTTU SOPIVILLA** aihetta tukevilla kuvilla varustettuna on poikkeuksetta parempi kuin juttu ilman kuvia. Aina ei sopivaa kuvaa löydy kirjoittajan itsensä tekemänä tai ottamana, ja tällöin pitää turvautua muiden tuotoksiin. Helpointa on, jos kuvan ottajalta tai tekijältä saa kysytyä luvan kuvan käyttämiseen lehtijutussa. Kaikissa tapauksissa kuvan tekijän lupa ei kuitenkaan ole välttämätön.

Tekijänoikeuslain 49 a S:ssä säädetään:

*“Valokuvaajalla on yksinomainen oikeus määrätä valokuvasta, muuttamattomana tai muutettuna:*

- 1) valmistamalla siitä kappaleita;
- 2) saattamalla se yleisön saataviin.

*(14.10.2005/821) Oikeus valokuvaan on voimassa, kunnes 50 vuotta on kulunut sen vuoden päättymisestä, jona kuva valmistettiin.”*

**PÄÄSÄÄNTÖ SIIS ON**, että toisen ottaman valokuvan käyttö edellyttää kuvaajan lupaa. Pääsääntöön on kuitenkin joukko poikkeuksia, joista tässä yhteydessä merkittävien on ns. kuvasitaatiooikeus. Tekijänoikeuslain 25 §:n 1 momentissa säädetään seuraavasti:

*“Julkistetuista taideteoksista saa ottaa tekstiin liittyviä kuvia:*

- 1) arvostelemaan tai tieteelliseen esitykseen; sekä
- 2) sanomalehteen tai aikakauskirjaan selostettaessa päivantapautumaa, edellyttäen ettei teosta ole valmistettu sanomalehdessä tai aikakauskirjassa toisinnettavaksi.”

**KUVAA SAA** siis käyttää ilman kuvaajan lupaa siinä tapauksessa, että se on (lain 8 §:n esittämällä tavalla, esim. viemällä Internetiin yleisesti nähtäville) julkistettu, ja sitä lainataan tieteelliseen pidettävään esitykseen. “Tieteellinen” tulkitaan tässä tapauksessa varsin laajasti: nyrkkisääntönä voi pitää, että ATS Ydintekniikkaan hyväksytyt artikkelit täyttävät kuvasitaatiooikeuden edellyttämän tieteellisyyden kriteerit.

Siteerattavien kuvien on kuitenkin liityttävä tekstiin: toisen työtä ei saa perusteettomasti hyödyntää, vaan omasta tekstistä on löydettävä järkevä syy sille, miksi juuri kyseisen kuvan käyttö ko. yhteydessä on tarpeen.

Lähde on aina mainittava sitaatin yhteydessä.

## APROS-ohjelman 6-yhtälömallin ilmiövalikoiman laajentaminen

**Y**ksidimensioista kaksifaasivirtausmallia APROS-ohjelmistoon alettiin kehittää jo 1980-luvun jälkipuoliskolla. Aluksi kaksifaasilaskenta perustui ns. homogeeniseen malliin, jossa oletettiin, että höyry ja vesi virtaavat samalla nopeudella ja että höyry ja vesi ovat samassa lämpötilassa. Johtuen homogeenisuusoletuksesta tässä mallissa tarvittiin vain kolme perusyhtälöä: massa, liikemäärä ja energiyhtälöt kaksifaasiselle seokselle.

**ALUSTA ALKAEN** oli selvää, että homogeenisellä mallilla ei voida riittävällä tarkkuudella simuloida ydinvoimalaitoksen onnettomuustapahtumia. Tällä hetkellä kaksifaasivirtausta voidaan APROSissa simuloida homogeenisella 5-yhtälömallilla ja 6-yhtälömallilla, jossa massa- liikemäärä- ja energiyhtälöitä sovellettiin erikseen molemmille faaseille. Väitöskirjassa käydään läpi APROS-simulointiohjelmistoon kuuluvan yksidimensioisen 6-yhtälömallin perusteet ja kuvataan tarkemmin eräät 6-yhtälömalliin tehdyt parannukset. Samalla kerrotaan kuinka monimutkainen ohjelmakokonaisuus pidetään hallinnassa ohjelman eri osia kehitettäessä.

**JOHDANNON LISÄKSI** väitöskirja sisältää ohessa luetellut neljä julkaisua. Ensimmäisessä kuvataan faasien vastakkaisuuntaisen virtauksen rajoittamiseen käytettyjen CCFL-korrelaatioiden (Counter Current Flow Limitation) liittäminen laskentajärjestelmään, sekä näiden korrelaatioiden kelpoistamiseen liittyvät simuloinnit. Toisessa kerrotaan yksityiskohtaisesti lauhtumattomien kaasujen laskentamallista, sen kelpoistamisesta ja soveltamisesta todellisen laitostransientin laskentaan. Kolmannessa julkaisussa kuvataan ohjelmaan kehitetty vaihtoehtoinen korkeamman kertaluvun diskreetointimenetelmä, jolla pystytään vähentämään numeerista diffuusiota. Neljännessä julkaisussa tarkastellaan ylikriittisen paineen laskennan vaatimia muutoksia kaksifaasimalliin ja kuvataan mallin toimivuutta mittaavien laskentatapauksien simuloineja.

**YLEENSÄ CCFL-KORRELAATIOT** perustuvat pienimitakaavavaiisiin kokeisiin. Todellisessa ydinvoimalaitoksessa reaktoripaineastian dimensiot ovat kuitenkin huomattavasti suuremmat kuin useimmissa koelaitteistoissa. Saksassa sijaitsevalla täysmittakaavaisella UPTF (Upper Plenum Test Facility) -koelaitteistolla tehtyjen kokeiden perusteella Glaeser kehitti CCFL-korrelaatiot reaktorin ylätukilevyn läpi-virtauksille, sekä reaktoripaineastian alastulotilassa tapahtuville veden ja höyryn vastakkaisuuntaisille virtauksille. Julkaisussa I kuvataan kuinka nämä Kutateldze-muodossa olevat korrelaatiot implementoidaan 6-yhtälömallin faasien väliseksi kitkakorrelaatioksi. Käyttäen APROSiin ohjelmoituja korrelaatioita, mallilla laskettiin useita UPTF-kokeita. Lasketut virtaukset vastasivat yleensä kohtuullisen hyvin kokeissa mitattuja arvoja.

**APROSIN 6-YHTÄLÖMALLILLA** on mahdollista vesihöyryseoksen lisäksi simuloida erilaisia lauhtumattomia kaasuja. Käyttäjä voi valita yhden neljästä lauhtumattomasta kaasusta – ilman, typen, vedyn tai heliumin. Nykyisessä mallissa kaasu voi olla joko kaasuna muodostaen homogeenisen seoksen vesihöyryn kanssa tai se voi olla liuenneena vesifaasissa. Riippuen olosuhteista veteen liennut kaasu voi vapautua nestefaasista kaasufaasiin tai päinvastoin se voi liueta kaasufaasista nestefaasiin. Mallia testattiin laskemalla PACTEL-koelaitteistolla tehty koe, jossa vesisäiliöön liennut typpi vapautui, kun paineen annettiin laskea antamalla suuripaineisen typen vuotaa ulos säiliöstä. Lisäksi mallia sovellettiin Loviisan vuototransientissa, jossa hätäakkuun liennut typpi vapautui primääripiirissä.

**APROSIN 6-YHTÄLÖMALLISSA**, kuten useimmissa systeemikoodeissa, käytetään ensimmäisen kertaluvun ylävirta -paikkadiskreetointia. Tämän menetelmän haittana on se, että numeerisen diffuusion vaikutuksesta terävät lämpötila- ja konsentraatiojakautumat pyrkivät tasoittumaan virtauksen edetessä laskentanoodi-

en läpi. APROSin 6-yhtälömalliin on tehty vaihtoehtoinen menetelmä, jossa ylävirtadiskretointi on korvattu diskretoinnilla, jossa muuttujien jakautuma määritetään kolmen peräkkäisen laskentanoodin avulla. Tätä korkeamman kertaluvun diskretointia on testattu laskemalla kaksi PACTEL-laitteistolla tehtyä vuotokoetta. Näissä hätäjähdytykseen käytettiin korkealle sijoitettua lisävesisäiliötä, jossa hätäjähdytysveden injektointi perustui painovoimaan. Transientin edetessä säiliöön muodostui terävä lämpötilajakautuma. Uudella mallilla tämä jakautuma pystyttiin varsin hyvin ennustamaan. Mallia on menestyksellisesti sovellettu myös terävien booririntamien etenemisen simulointiin.

**YLIKRIITISESSÄ PAINEESSA** olevan veden kaksifaasio-minaisuudet häviävät ja sitä voidaan käsitellä yksifaasisena. APROSin 6-yhtälömalli perustuu taseyhtälöihin, jotka on kehitetty sekä neste- että kaasufaasille. Kun APROSin kaksifaasimallia sovelletaan ylikriittiselle painealueelle, siinä säilytetään kaksifaasimallin peruseriaatteet. Tämä tapahtuu siten, että entalpien ylittäessä eräänlaisen paineesta riippuvan kylläistä entalpiaa vastaavan raja-arvon (ominaislämpökapasiteetin maksimi), pakotetaan höyryn tilavuusosuus yhdeksi. Päinvastaisessa tapauksessa höyryn aukko-osuus pakotetaan nolaksi. Tässä hyödynnetään faasien välistä lämmönsiirtomallia, jossa höyrystyvää tai lauhtuva massavirta lasketaan rajapintaan tulevasta energiataaseesta käyttäen höyrystymislämpöä. Todellisuudessa ylikriittisen paineen alueella höyrystymislämpö on nolla, mutta 6-yhtälömallissa käytetään hyvin pientä minimiarvoa. Pientä arvoa käytettäessä höyrystyminen tai lauhtuminen tapahtuu nopeasti ja vältetään epäfyysikaalinen neste ja kaasufaasin samanaikainen esiintyminen. Tällä hetkellä ylikriittisen paineen malli toimii melko robustisti ja sitä voidaan soveltaa sekä ydin- että polttovoimalaitoksiin.

**APROSIA JA** sen 6-yhtälömallia kehitettäessä on tärkeää pitää huoli siitä, että kun uusia malleja otetaan käyttöön

tai olemassa olevia malleja muutetaan, samalla varmistetaan uuden ohjelmistoversion toimintavarmuus. Kaikki muutokset ja uudet mallit dokumentoidaan tarkasti. Samalla merkitään, miksi ja milloin ohjelmia on muutettu. Tarkoituksena on, että kunkin version muutokset pystytään myöhemmin jäljittämään.

Julkaisut

Hänninen, M. *Implementation and validation of downcomer and upper tie plate CCFL-correlations in a two-fluid code. Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16 May 11–15, 2008, Orlando, Florida.*

Hänninen, M. & Ahtinen, E. *Simulation of non-condensable gas flow in two-fluid model of APROS – Description of the model, validation and application. Annals of Nuclear Energy 36 (2009), pp. 1588–1596.*

Vihavainen, J., Hänninen, M. and Tuunanen, J. *Improved Thermal Stratification Modeling in the APROS Code Simulations of Passive Safety Injection Experiments. Ninth International Topical Meeting in Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), San Francisco, California, October 3–8, 1999.*

Hänninen, M. & Kurki, J. *Simulation of flows at supercritical pressures with a two-fluid code. NUTHOS-7: The 7th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, Seoul, Korea, October 5–9, 2008.*

## VÄITÖSKIRJA

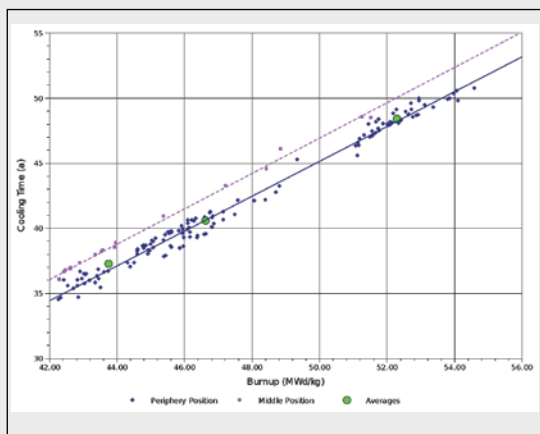
“Phenomenological extensions to APROS six-equation model: non-condensable gas, supercritical pressure, improved CCFL and reduced numerical diffusion for scalar transport calculation” on saatavilla osoitteessa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2009/P720.pdf>

Markku Hänninen  
TkT  
Erikoistutkija  
VTT  
Markku.Hanninen@vtt.fi



## Ydinpolttoaineen optimipalama



**Y**ksi Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -kiehutusvesireaktoreiden polttoaineen käyttöä säätelevistä tekijöistä on yksittäisen polttoainepun keskipalammalle asetettu yläraja, joka tällä hetkellä on 45 MWd/kgU. Materiaalien kehityksen myötä palamarajan nostaminen on tullut mahdolliseksi. Korkeammilla palamilla suurempi osa nipussa olevasta polttoaineesta saadaan hyödynnettyä ja samalla vuosittain reaktoriin ladattavien tuoreiden nippujen määrä putoaa, vaikkakin pienemmällä latausmäärällä joudutaan käyttämään väkevämpää polttoainetta.

**REAKTORISTA POISTETUN** polttoaineen jälkilämpöteho riippuu olennaisesti palamasta: mitä korkeampi palama, sitä enemmän jälkilämpöä nippu tuottaa. Tämän jälkilämmön poistosta on huolehdittava, ja polttoaineen on annettava jäähtyä välivarastoissa ennen loppusijoitusta, joka on suunniteltu aloitettavaksi Posivan toimesta Olkiluodossa vuonna 2020.

**YHTEEN OL1/OL2:N** polttoaineelle suunniteltuun loppusijoituskapseliin mahtuu yhteensä 12 nippua, joiden yhteenlaskettu lämpöteho loppusijoitushetkellä saa materiaaliteknisistä syistä johtuen olla korkeintaan 1700 W eli keskimäärin 140 W/nippu. Tämä rajoitus on määräävä tekijä, kun lasketaan aikaa, joka polttoaine joudutaan välivarastossa pitämään. Huomattavaa on myös, että reaktorisydämen reunalta ja keskiosista poistettujen nippujen jäähtymisajoissa on selvä ero johtuen alueilla vallineiden neutronivoiden eroista.

Tässä diplomityössä tutkittiin laskennallisin keinoin palaman vaikutusta polttoaineen jälkilämpötehoon ja

jäähtymisaikaan sekä etsittiin taloudellista optimipalamaa huomioimalla sekä polttoaine-, jäähdytys- että loppusijoituskustannukset. Tavoitteen saavuttamiseksi luotiin polttoaineelle mahdollisimman realistinen käyttöhistoria käyttäen kolmea eri poistopalamaa: 45 MWd/kgU, 50 MWd/kgU ja 55 MWd/kgU.

**KAIKISSA KOLMESSA** tapauksessa polttoaineen väkevöinti mitoitettiin sopivaksi, minkä jälkeen suoritettiin SIMULATE-3- ja FINELOAD-ohjelmistojen avulla sydämen lataussuunnittelu termisten marginaalien täyttämiseksi. Lataussuunnittelua jatkettiin aina jakso kerrallaan, kunnes sydän saatiin ajettua tasapainoon. Näin syntyneestä datasta laskettiin jälkilämpötehot ja jäähtymisajat käyttäen Studsvik Scandpowerin SNF-ohjelmaa (Spent Nuclear Fuel).

**KORKEAMMILLA PALAMILLA** polttoaineen valmistuskustannukset ja loppusijoituskustannukset laskivat polttoainepunjen lukumäärän laskiessa. Vastaavasti polttoaineen väkevöinti- ja jäähdytyskustannukset nousivat. Jäähdytyskustannukset osoittautuivat optimaalisen maksimipalaman kannalta erityisen merkittäviksi.

**JÄÄHDYTYS JA** valvonta eivät aiheuta suuria lisäkustannuksia, mikäli alueella on samanaikaisesti muutakin toimintaa. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun reaktorit sammutetaan ja synergiaedut menetetään. Jos Olkiluodossa on käyviä laitoksia vuoteen 2070 asti ja nykyiset käyvät laitokset pysäytetään vuonna 2040, on tehdyistä hintaoletuksista riippuen OL1:n ja OL2:n optimaalinen maksimipalama 50-55 MWd/kgU. Jos käyviä laitoksia on alueella vielä huomattavasti pidempään, nousee optimi vieläkin korkeammalle.

*Opinnäyte hyväksytty  
Teknillisessä korkeakoulussa.*

*DI Atte Moilanen  
TVO  
Turvallisuusinsinööri  
Ydinturvallisuus  
atte.moilanen@tvo.fi*

# TAPAHTUMAKALENTERI

**23.-31.10.2010**

**Ekskursiomatka Iso-Britanniaan.**

**4.11.2010 Syysseminaari**

Hotelli Linnassa Helsingissä  
Ydinenergian näkymät PAP-päätösten jälkeen.  
Lisätiedot ja ilmoittautumiset:  
Silja Holopainen  
silja.holopainen@vtt.fi

**17.11.2010**

**ATS-seniorien ja YG:n seminaari**

Säätytalolla, Helsingissä.  
Atomivoimaa Suomeen.  
Lisätiedot ja ilmoittautumiset:  
Tapani Raunio  
tapani.e.raunio@fortum.com

*Lisätietoja kaikista ATS:n tapahtumista  
löytyy internetistä: [www.ats-fns.fi](http://www.ats-fns.fi)*

## UUDISTUNUT TIETOJENMUUTOSLOMAKE

ATS:n [www-sivuilla](http://www.sivuilla) oleva osoitteenmuutoslomake  
(<http://ats-fns.fi/info/yhteystiedot.html>)  
on uudistunut kattamaan kaikki jäsenrekisterin tiedot.

Nykyisin lomakkeessa kysytään nimen, osoitteen, kotipaikkakunnan ja sähköpostiosoitteen lisäksi tutkinto, työnantaja ja tehtävänimike.

Uudistuksella pyritään saattamaan ATS:n jäsenrekisteri ajantasalle kaikkien tietojen osalta.  
Aikaisemmin työnantajätietoja on kysytty ainoastaan jäsenhakemuksessa, minkä vuoksi jäsenrekisterissä on monen kohdalla vanhentunutta tietoa.

Ole ystävällinen ja tarkista, että tietosi on ajantasalla.  
Näin saamme rekisterin jälleen kaiken kattavaksi.  
Kiitos yhteistyöstä!

*ATS:n hallitus*

# UUDET JÄSENET

## VARSINAISIA JÄSENIÄ

- Pentti Kauppinen, VTT
- Tiina Tigerstedt, Fennovoima
- Tero Heinikangas, TVO
- Libor Klecka, VTT
- Silja Holopainen, VTT
- Matti Kaisanlahti, Fortum
- Sasu Valkamo, Fortum
- Sari Järvimäki, Fortum Power and Heat Oy
- Juha Kerttula, Wärtsilä Finland Oy
- Juha Sirola, Fennovoima
- Lauri Muranen, Energiategollisuus
- Laura Taivalaho, STUK
- Matti Paananen, Fortum Nuclear Services
- Jani Virtanen, TVO
- Irene Olkonen, STUK
- Sara Kärki, Fortum
- Einari Mattila, Fortum Loviisa
- Susanna Lindgren, Posiva Oy

## OPIKSELIJAJÄSENIÄ

- Mikko Pellinen, LUT
- Lauri Rintala, Aalto-yliopisto
- Risto Vanhanen, Aalto-yliopisto
- Antero Kuusi, STUK
- Kim Stålhandske, Fortum Loviisa

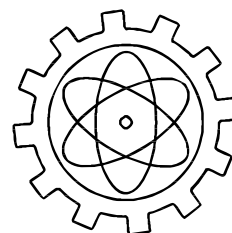
Suomen Atomiteknillisessä Seurassa oli 4.10.2010 pidetyn johtokunnan kokouksen jälkeen 572 varsinaista jäsentä ja 30 opiskelijajäsentä.

Kunniajäseniä oli 11 ja kannatusjäseniä 20.

Seuran jäseneksi pääsee johtokunnan hyväksymällä hakemuksella.

Hakemukseen tarvitaan kahden jäsenen suositus.

*ATS:n jäsenhakemus internetissä:  
<http://www.ats-fns.fi/info/jasenhakemus.html>*



SUOMEN  
ATOMITEKNILLINEN  
SEURA —

ATOMTEKNISKA  
SÄLLSKAPET  
I FINLAND ry



Palautus  
**Suomen Atomiteknillinen Seura**  
c/o VTT (Tietotie 3, Espoo)  
PL 1000  
02044 VTT

## **Kannatusjäsenet**

Alstom Finland Oy  
B+Tech Oy  
Fennovoima Oy  
Fortum Nuclear Services  
Mirion Technologies (RADOS) Oy  
Patria Finavitec Oy  
Platom Oy  
Pohjoismainen Ydinvakuutuspooli  
Pohjolan Voima Oy  
Posiva Oy  
PRG-Tech Oy  
PrizzTech Oy  
Saanio & Riekkola Oy  
Siemens Osakeyhtiö  
Teollisuuden Voima Oyj  
TVO Nuclear Services Oy  
Voimaosakeyhtiö SF Oy  
VTT  
Wärtsilä Finland Oy  
YIT Installaatiot

## **ATS internetissä:**

<http://www.ats-fns.fi>