



**VUOSIHUOLTOJEN YHTEYDESSÄ TEHTÄVIEN TURBIINILAITOKSEN SUORITUSKYKYMITTAUSTEN SUUNNITTELU OL3-LAITOKSELLE**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan diplomityö

2022

Kari Henttula

Tarkastajat: Dosentti Aki Grönman

DI/Vanhempi voimalaitosinsinööri Ari Anttila

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Kari Henttula

### **Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien turbiinilaitoksen suorituskykymittausten suunnittelu OL3-laitokselle.**

Energiatekniikan diplomityö

114 sivua, 24 kuvaa, 16 taulukkoa ja 25 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Aki Grönman ja DI/Vanhempi voimalaitosinsinööri Ari Anttila.

Avainsanat: Olkiluoto, Teollisuuden Voima, laitosmittaukset, suorituskyky, OL3, ydinvoima, turbiinilaitos, sekundääripiiri.

Työn tarkoituksena on suunnitella Olkiluoto 3- laitokselle mittausrutiini suorituskyvyn todentamiseksi vuosihuoltojen yhteydessä. Mittaus on tarkoitus tehdä laitoksen kiinteillä prosessimittauksilla. Mittaukset on tarkoitus tehdä ennen ja jälkeen vuosihuollon. Mittauksilla todennetaan ja pyritään löytämään vuosihuollon yhteydessä tapahtuneet muutokset voimalaitosprosessissa. Mittauksilla pyritään löytämään muutoksia ja muutoksen suuntaa, ei niinkään mittaustuloksen absoluuttista virheettömyyttä mittausten tuloksissa.

Tutkimustyö sisältää OL1- ja OL2- laitoksilla käytössä olevan mittausrutiinin tutkimista, OL3- laitoksella käyttöönoton aikana suoritettavien suorituskykykoiden sisältöä ja OL3- laitoksen tulevan takuukokeen koeohjelman tutkimista. Tutkimuksen sisältönä ja taustana on myös tutustua laajemmin maailmalla käytössä oleviin metodeihin sekä niiden soveltuvuuden arviointia OL3- laitoksella. Tutkimustyön tavoitteena on myös selvittää digitaalisen mallin käytettävyyttä tukemaan suorituskyvyn arviointia ja valvontaa OL3- laitoksella.

Tutkimustyössä tuodaan esiin vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien suorituskykymittausten liittyminen osaksi laajempaa suorituskyvyn valvontaa sekä menettelyjä liittyen organisaatioon, mittapisteisiin ja keskeisiin indikaattoreihin, joiden avulla laitoksen suorituskykyä voidaan todentaa ja valvoa. Tutkimustyössä esitettävän suorituskykymittauksen validointi ja jatkokehittäminen tehdään voimalaitoksen käyttöönoton jälkeen, mutta käyttöönoton aikana tehtävillä mittauksilla voidaan jo todentaa metodin käytännöllisyyttä ja soveltuvuutta.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Kari Henttula

### **Designing of measurements for performance monitoring in a turbine plant during outage in OL3 nuclear power plant**

Master's thesis

2022

114 pages, 24 figures, 16 tables and 25 appendices

Examiners: Docent Aki Grönman and M. Sc (Tech.)/Senior power plant engineer Ari Anttila

Keywords: Olkiluoto, Teollisuuden Voima, performance measurements, performance monitoring, OL3, nuclear power plant, turbine plant, secondary circuit.

The goal of the thesis is to design a measuring routine for performance monitoring for the OL3 nuclear power plant water-steam cycle, before and after outage. A measuring routine will be done using built-in measuring equipment. The purpose of the measuring is to find deviations in the process and performance before and after the outage but not to analyze uncertainty of the measurements or to try to achieve as low uncertainty as possible.

The thesis includes the evaluation of the measuring routine in the OL1- and OL2- nuclear power plants, performance tests during the commissioning of the OL3- nuclear power plant and the guarantee test procedure of OL3. This thesis also evaluates the experiences and lessons learned in real world performance monitoring and application of methods to OL3. Also discussed is the usage of a digital model in support of the performance monitoring. The benefits of a digital twin in performance monitoring are highlighted in the thesis.

This thesis highlights how the measurements before and after outage are connected to performance monitoring during normal operation and how important the on-line monitoring is. The thesis brings out the procedures for organization, measurement and indicators for performance monitoring. The validation for the measuring routine will be done in the future after the commissioning of the plant, however the method used in performance testing during the commissioning will support the evaluation of the method that will be used later during the operation of OL3.

## KIITOKSET

Diplomityö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:n voimalaitostekniikan toimistolle. Työtä on tehty samaan aikaan OL3- ydinvoimalaitoksen ydinteknisen käyttöönoton aikana. Iso kiitos kuuluu työnantajalle positiivisesta suhtautumisesta opiskeluun työn ohella sekä diplomityön tekemiseen. Haluan kiittää Ari Anttilaa mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta aiheesta sekä positiivisesta tuesta työn aikana. Haluan kiittää TVO:lta lisäksi Miia Hautalaa sekä Seppo Kerästä, joka on osallistunut oma-aloitteisesti työn tarkastamiseen.

Iso kiitos kuuluu LUT- yliopistolle, joka on tarjonnut hienon mahdollisuuden opiskella, oppia lisää ja kasvaa ihmisenä. Diplomityön ohjaajalle, Aki Grönmanille suuri kiitos tuesta ja positiivisuudesta työn aikana.

Olen kiitollinen myös omalle käyttövuorolle, vuoro numero viidelle, sekä lähiesimiehelle Janne Rouhiaiselle tuesta opiskelujen ja diplomityön aikana.

Suurin kiitos kuuluu tukijoukoille kotona. Kolmen vuoden opiskeluprojekti työn ohella ei olisi ollut mahdollista ilman kotijoukkojen tukea. Kiitos Aurora, Sofia, Kasper, Oskari, Topias ja Aino, että olen saanut mahdollisuuden kehittää itseäni ja käyttää aikaani, joka on ollut teiltä pois.

Aina kannattaa olla valmis oppimaan ja sivistämään itseään. Se avaa näkymiä, jotka muuten jäisivät kokematta.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$p$	paine	[bar, Pa]
$q_m$	massavirta	[kg/s]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
$R$	ainekohtainen kaasuvakio	[J/ (kg K)]
$T$	lämpötila	[°C, K]
$U$	jännite	[V]
$V$	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$v$	ominaistilavuus	[m <sup>3</sup> /kg]
$h$	entalpia	[kJ/kg]
$W_{th}$	reaktorin lämpöteho	[MW]
$HR$	lämpökapasiteetti	[kJ/kWh]
$\cos \Phi$	generaattorin tehokerroin	
$P$	teho	[Watti]
$\Delta P$	generaattorin tehokertoimen korjaus	[kW <sub>e</sub> ]
$K$	jäähdytysveden lämpötilan korjauskerroin	[%]
$CF$	kapasiteettikerroin	
$TPI$	tekninen suorituskykyindikaattori	
$DGHR$	päivittäinen bruttolämpö	
$Q$	lämpöteho	[kJ/h]
$U$	kokonaislämmönsiirtokerroin	[W/m <sup>2</sup> K]
$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta T_m$	logaritminen lämpötilaero	[K]

$R_f$	lämmönsiirtovastus	[K/W]
$U_0$	lämmönsiirtokerroimen suunnitteluarvo	[W/m <sup>2</sup> K]
$K_{stg}$	höyryn virtauskerroin	
$P_{gross,corr}$	korjattu bruttoteho generaattorin jälkeen	[MW]
$P_{gross,meas}$	mitattu bruttoteho generaattorin jälkeen	[MW]
$f_1$	generaattorin tehokertoimen korjauskerroin	[kW]
$f_2$	höyrynpaineen korjauskerroin	
$f_3$	korjauskerroin MP-turbiinin ulostulopaineelle tai jäähdytysveden lämpötilalle	
$f_{MWt}$	korjauskerroin höyrystimien lämpöteholle	
$\eta_{MS}$	kosteudenerottimen tehokkuus	[%]
$LMTD$	logaritminen lämpötilaero	[°C]
$C_p$	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
$M$	höyrynkosteus	[%]
$\% \Delta p_{cs}$	välitulistimen paineenpudotus	[%]
$F_M$	korjauskerroin materiaalille	
$F_{w,test}$	korjauskerroin jäähdytysveden lämpötilalle	
$\vartheta$	lämpötila	[K]

#### Alaindeksit

e	sähkö
th	lämpö
bd	ulospuhallus
fw	syöttövesi
pzt	paineistin

ms	päähöyry
cold	kylmä haara
hot	kuuma haara
stg	vaihe
meas	mitattu
s	saturaatio
NI	reaktoripuoli
TI	turbiinipuoli
50%	reaktoriteho 50 %
90%	reaktoriteho 90 %
100%	reaktoriteho 100 %
omäkäyttö	laitoksen omakäyttösähköteho
L,BAT	päämuuntaja
L,BAA	sähkön siirtokisko
gross	sähköteho
rht	välitulistin
heating	lämmittävän höyryn saturaatiolämpötila
csin	lämmittävän höyryn sisääntulo
csout	lämmittävän höyryn ulostulo
msdrn	main steam drain
htr	esilämmitin
AUX	omäkäyttö
hw	hotwell
CW	cooling water

ST	steam turbine
shaft	turbiiniakseli
ML	mechanical loss

#### Lyhenteet

OL1	Olkiluoto 1 ydinvoimalaitos
OL2	Olkiluoto 2 ydinvoimalaitos
OL3	Olkiluoto 3 ydinvoimalaitos
EPR	European Pressurized Water Reactor
MP	Matalapaine
KP	Korkeapaine
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
MW	Megawatti
Twh	Terawattitunti
STUK	Säteilyturvakeskus
RPM	Revolutions Per Minute
KKS	Kraftwerk Kennzeichen System
MSR	Moisture Separator Reheater
PICS	Process Information and Control System
HPT	High Pressure Turbine
LPT	Low Pressure Turbine
NRO	Net Rated Output
MHR	Mean Heat Rate
CWS	Commissioning Worksheet



ASME	The American Society of Mechanical Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
DIN	Deutsches Institut für Normung
IP	Intermediate Pressure
CBM	Condition Based Maintenance
IAEA	International Atomic Energy Agency
RTP	Reactor Thermal Power
STP	Sekundäripiiriin tuotu lämpöteho
TTD	Terminal Temperature Difference
CLF	Cleanliness Factor
DCA	Drain Cooler Approach
PTO	Provisional Take Over
NPP	Nuclear Power Plant
NSSS	Nuclear Steam Supply System
NP	Nuclear Power
SHBM	Secondary Heat Balance Measurement
TTKE	Turvallisuustekninen Käyttöehto
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
CI	Commissioning Instruction
NTM	Nuclear Testing Manual
EFPD	Effective Full Power Day
ACT	Average Coolant Temperature
HEI	Heat Exchange Institute

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto .....	14
2	Olkiluoto 3 ydinvoimalaitos .....	17
2.1	Primääripiiri .....	20
2.2	Höyrystin .....	20
2.3	Vesihöyryprosessi .....	22
2.3.1	Päähöyryjärjestelmä .....	23
2.3.2	Päälauhejärjestelmä .....	24
2.3.3	Pääsyöttövesijärjestelmä .....	25
2.3.4	Turbiinit .....	25
2.4	Generaattori .....	29
2.5	Merivesijäähdytys .....	31
2.6	Ajotapa .....	33
2.6.1	Osatehokaavio .....	34
2.6.2	Venytsajo .....	35
2.6.3	Järjestelmäsuoja .....	35
2.6.4	Laitoksen ajotapa tehoajolla .....	36
2.6.5	Vuosihuollot .....	37
3.	OL3- suorituskyky mittaukset käyttöönoton aikana .....	39
3.1	Testin tavoitteet .....	39
3.2	Testin hyväksymiskriteerit .....	40
3.3	Kokeen suoritus .....	41
3.4	Tulosten tarkastelu .....	44

4. Laitosmittaukset OL1- ja OL2-laitoksella .....	46
4.1 Esivalmistelut .....	47
4.2 Mittausten suorittaminen .....	49
4.3 Laskenta .....	50
4.4 Raportointi .....	51
5. Ydinvoimalaitoksen suorituskykytestit ja suorituskyvyn valvonta .....	52
5.1 Höyryturbiinin testaus ja valvonta .....	53
5.2 Ydinvoimalaitosten lämpöteknisen tehokkuuden valvonnan, diagnoosin sekä ennusteiden sovellus.....	57
5.3 Kokemukset ja opit liittyen suorituskyvyn valvontaan ja optimointiin .....	59
5.3.1 Suorituskyvyn valvontaohjelma .....	59
5.3.2 Tärkeimpien komponenttien suorituskyky .....	62
6. OL3 Takuumittaus .....	68
6.1 Reaktoripuolen koeohjelma .....	68
6.1.1 Tavoitteet .....	69
6.1.2 Testin hyväksymiskriteerit.....	71
6.1.3 Testin aloittamisen ennakkoehdot.....	72
6.1.4 Reaktoripuolen lämpötase .....	73
6.1.5 Testin tekeminen .....	74
6.1.6 Tulosten arviointi.....	77
6.1.7 Testin tulokset .....	79
6.2 Turbiinipuolen koeohjelma .....	79
6.2.1 Tavoitteet .....	80
6.2.2 Testiolosuhteet.....	82
6.2.3 Instrumentointi ja kalibrointi .....	83
6.2.4 Tulosten laskenta ja arviointi.....	84
6.2.5 Testin hyväksymiskriteerit ja raportointi.....	88
7. Simulointityökalujen käyttö suorituskyvyn valvonnassa .....	89
7.1 Fortum Solvo .....	89
7.2 Laitoksen suorituskyvyn arviointi prosessimallin avulla .....	91
8. OL3 suorituskyvyn valvonta ja laitosmittaukset .....	94
8.1 Suorituskyvyn valvonta tehoajolla .....	95
8.2 Laitosmittaukset vuosihuoltojen yhteydessä. ....	97

8.2.1 Mittausolosuhteet ja mittausten suoritus .....	98
8.2.2 Mittaustietojen keruu .....	99
8.2.3 Mitattavat kohteet ja tulosten analysointi.....	99
9. Johtopäätökset .....	105
Lähteet .....	111

## Liitteet

Liite 1. Primääripiirin virtauskaavio.

Liite 2. Vesihöyryprosessi.

Liite 3. Lämpötase 100 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 8°C lämpötilalla.

Liite 4. Päähöyryjärjestelmä.

Liite 5. Päälauhdejärjestelmä. Näyttökuvaa 30DMC02EJ13.

Liite 6. Pääsyöttövesijärjestelmä.

Liite 7. Generaattoritehon korjauskäyrä.

Liite 8. Tehokertoimen korjauskäyrä.

Liite 9. Tehokertoimen korjauskäyrä.

Liite 10. Tallennettavat binäärisignaalit. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

Liite 11. Näyttökuvat 3 ODMC03 EJ111 ja 3 OBAT00EJ101.

Liite 12. Näyttökuvat 3 OBBT00EJ101 ja 3 OMKY00EJ101.

Liite 13. OL1/OL2 Laskenta- Excelissä on seuraavat välilehdet.

Liite 14. OL1/OL2 laitosmittausraporteissa tyypillisesti esitetyt asiat.

Liite 15. Yksinkertaistettu OL3- laitoksen sähkökaavio.

Liite 16. PICS näyttökuvaa sähköjärjestelmästä.

Liite 17. Takuumittauksen sekvenssi.

Liite 18. Takuumittauksen omakäyttösähkön mittapisteet.

Liite 19. Korjauskerroin ikääntymiselle.

Liite 20. Lämpötase 100 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 5°C lämpötilalla.

Liite 21. Lämpötase 90 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 5°C lämpötilalla.

Liite 22. Lämpötase 50 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 5°C lämpötilalla.

Liite 23. Takuukokeen mittapistekaavio.

Liite 24. Mittausten määrittely TOPAS työkalun avulla.

Liite 25. Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien prosessimittausten mittapistet

# 1 Johdanto

Tutkimustyön tarkoituksena on luoda mittausjärjestelyt OL3- ydinvoimalaitoksen suorituskyvyn todentamiseen vuosihuoltojen yhteydessä. Tarkoituksena on löytää mittareita suorituskyvyn valvontaan, oleellisia mittapisteitä, sopiva ajankohta mittausten tekemiselle, suorituskyvyn vaikuttavia tekijöitä sekä otollisia laitoksen ja ympäristön olosuhteita mittausten suorittamiselle. Tarkoituksena on tehdä mittaukset laitoksen omilla prosessimittauksilla eikä erikseen lisättävillä tarkkuusmittauksilla. Tavoitteena on löytää muutoksia prosessissa, ei niinkään pyrkiä absoluuttiseen mittaustarkkuuteen. Työn tarkoituksena on myös tutustua OL1- ja OL2- laitoksilla jo käytössä olevaan metodiin liittyen suorituskykymittauksiin vuosihuoltojen yhteydessä. Työssä on tarkoitus tutustua OL3- laitoksen käyttöönoton yhteydessä tehtäviin suorituskykymittauksiin sekä käyttöönoton jälkeen tehtävään takuumittaukseen, jossa varmistutaan, että laitos täyttää laitosopimukseen liittyvät suorituskykyvelvoitteet. Työssä tutustutaan myös digitaalisen prosessimallin käyttöön suorituskyvyn valvonnassa ja nykyaikaisiin mahdollisuuksiin digitaalisen kaksosen käytössä valvonnan tukemiseen. Työssä käsitellään myös digitaalisen kaksosen ja jatkuvan valvonnan etuja satunnaisesti tehtävään mittaukseen verrattuna. Työssä tutkitaan myös vuosihuoltojen yhteydessä tehtävän suorituskykymittauksen liittymistä laajemmin suorituskyvyn valvontaan sekä tekijöitä, joita tulee ottaa huomioon valvonnassa liittyen ajojaksoon mittausten välillä. Tutkimustyö on tärkeää tehdä ennen käyttöönoton valmistumista, jolloin ollaan valmiina valvomaan suorituskykyä heti laitoksen kaupallisen käytön alkamisesta lähtien. Ydinvoimalaitoksen suuresta tuotantotehosta johtuen voidaan oikeilla suorituskyvyn valvontameteodeilla parantaa laitoksen hyötysuhdetta ja tuotantotaloutta merkittävästi. Oikean metodin avulla pystytään löytämään suorituskykyä heikentävät tekijät nopeasti sekä tekemään oikea-aikaisia päätöksiä ja toimenpiteitä liittyen korjauksiin, huoltoihin, mahdollisiin investointeihin tai käyttötoimintoihin, joiden myötä suorituskyky saadaan palautettua. Taustana työn tekemisessä on ollut lähes 17 vuoden työskentely OL3- projektissa sekä koulutautuminen reaktoriohjaajaksi. Olen työskennellyt tutkimustyön tekemisen aikana vuorossa reaktoriohjaajana ja siten läheltä osallistunut käyttöönoton etenemiseen.

Koska OL3- laitos on edelleen käyttöönottoaiheessa, ei aikaisempia tutkimustöitä ole tiedossa OL3- laitoksen suorituskykyyn liittyen. Sen johdosta tutustuin OL1- ja OL2- laitoksilla käytössä olevaan metodiin sekä siihen liittyvään hallinnolliseen työhön. Suorituskyky-mittaukset käyttöönoton aikana antavat taustatietoa suorituskyvyn varmentamisesta käyttöönoton aikana sekä metodin toimivuudesta. Käyttöönottoaiheen kokeet hyväksytään myös TVO:n sekä valvojan viranomaisen puolesta. Takuukoe tehdään erillistilauksena laitostoimittajalta ja tämän tutkimustyön aikana on saatu koeohjelman ensimmäinen versio kommentoitavaksi. Takuukoe eroaa käyttöönoton aikana sekä myöhemmin käytön aikana tehtävistä suorituskykymittauksista siten, että mittaukset pohjautuvat standardiin, ja ne suoritetaan erillisillä tarkkuusmittauslaitteilla. Tällä pyritään mahdollisimman pieneen virheeseen mittaustuloksissa. Käyttöönoton aikaiset mittaukset ja takuukoe antavat referenssituloksen ja vertailukohtan tulevaisuudessa tehtäville suorituskykymittauksille. Huomioitavaa on, että mahdolliset tulevat laitosmuutokset vaikuttavat myös referenssinä käytettävään laitostilaan. OL1- ja OL2- laitoksilla tehtyjen mittausten avulla on saatu hyviä tuloksia liittyen laitoksen suorituskyvyn valvontaan. Kerätyn mittausdatan avulla on pystytty arvioimaan, miten vuosihuolto on vaikuttanut laitoksen suorituskykyyn ja tulosten pohjalta on voitu suunnitella tulevia töitä ja laitosparannuksia. Suoritettuja mittauksia on käytetty päätöksenteon tukena liittyen laitoksen kunnossapitoon, huoltoon tai käyttötoimenpiteisiin.

Tutkimustyössä olen tutustunut myös siihen, miten maailmalla valvotaan ydinvoimalaitosten suorituskykyä ja minkälaisia metodeja on käytössä. Laajempi näkökulma tukee OL3- laitoksella tulevaisuudessa tehtävää suorituskyvyn valvontaa ja auttaa hahmottamaan vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien mittausten tarkoitusta osana suorituskyvyn valvontaa.

Tutkimustyö on pitänyt sisällään vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien mittausten suunnittelua mutta ei varsinaisia mittauksia ja tulosten käsittelyä, koska laitoksen käyttöönotto on vielä kesken. Mittausjärjestely on validoimatta vielä käytännössä, mutta käyttöönoton aikana tehtävä suorituskykymittaus antaa tukea tulevaisuuteen mittausmetodin käytettävyydestä. Suorituskyvyn valvonta ja mittaukset ovat jatkuvasti kehittyvä prosessi ja niitä pyritään kehittämään pitkäjänteisesti. Tutkimustyö pyrkii vastaamaan kysymykseen, miten suorituskykyä valvotaan vuosihuoltojen yhteydessä OL3- laitoksella. Tavoitteena on luoda

mittausjärjestely suorituskyvyn todentamiseksi laitoksen tulevan käytön aikana. Työ käsittelee myös ajojakson aikana tehtävän suorituskyvyn todentamisen tärkeyttä. Tutkimustyössä halutaan tuoda esiin myös nykyaikaisen tekniikan mahdollistamat edut ja metodit oikea-aikaiseen suorituskyvyn todentamiseen.



## 2 Olkiluoto 3 ydinvoimalaitos

Olkiluoto 3 (OL3) ydinvoimalaitos tulee olemaan valmistuttuaan Teollisuuden Voiman omistama. Teollisuuden Voima (TVO Oy) on listaamaton, julkinen osakeyhtiö. TVO:n suurin omistaja on Pohjolan Voima (58,5 %). Muita omistajia ovat Fortum Power and Heat Oy, EPV Energia Oy, Kemira Oy sekä Oy Mankala Ab. TVO konserniin kuuluu lisäksi TVO Nuclear Services (TVONS) sekä ydinjätehuolto-yhtiö Posiva Oy, sekä Posivan tytäryhtiö Posiva Solutions Oy. Posiva Oy:n omistaa TVO yhdessä Fortumin kanssa ja TVO:n omistusosuus on 60 %. (TVO Oy 2021a.)

TVO:lla on ennestään kaksi käyvää ydinvoimalaitosta, Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2). Ne ovat valmistuneet vuonna 1978 ja 1980 sähköntuotantoon ja ovat samanlaisia, kiehutusvesireaktoreita. Laitosten nykyinen nettosähköteho on 890MW. OL1- ja OL2- laitosten yhteinen sähköntuotanto vuonna 2019 oli 14,4 TWh, joka vastaa n. kuudesosaa Suomessa käytetystä sähköstä. Laitosyksiköillä on ollut korkea käyttökerroin ja vuonna 2021 laitosten yhteinen käyttökerroin oli 92,8 %. (TVO Oy 2021b.)

OL3-laitos on EPR-tyyppinen (European Pressurized Water Reactor) painevesireaktori. Se pohjautuu koeteltuun tekniikkaan, mutta siinä on mukana uusia turvallisuusominaisuuksia esimerkiksi liittyen vakavien onnettomuuksien hallintaan ja estämiseen. Tuotannon tehokkuus ja taloudellisuus on otettu huomioon laitoksen suunnittelussa. Laitostyyppin esikuvina on ollut Ranskalainen N4- laityyppi sekä Saksalainen Konvoi- laityyppi. Laitos kykenee tuottamaan 1600MW:n nettosähkötehon. Laitos on tilattu aikanaan kiinteähintaisena ns. avaimet käteen - toimituksena konsortiolta, jonka ovat muodostaneet AREVA GmbH, AREVA NP SAS sekä Siemens AG. Alkuperäisen aikataulun mukaan sähköntuotanto piti alkaa keväällä 2009. Säännöllisen sähköntuotannon pitäisi alkaa vuonna 2022 laitoimitajan antaman aikataulun mukaan. Aikataulua on päivitetty useaan kertaan projektin aikana. Laitokselle myönnettiin käyttöluva 7.3.2019 valtioneuvoston toimesta. Polttoaineen latauslupa myönnettiin 26.3.2021 Säteilyturvakeskuksen (STUK) toimesta. Polttoaineen lataus saatiin valmiiksi 1.4.2021. OL3- laitoksen valmistuttua Olkiluodossa tuotetaan 30 %

Suomen sähköntarpeesta, nostaen ydinvoiman osuuden 40 %:iin Suomessa käytetystä sähköstä. (TVO Oyj 2021c.).

Kuvassa 1 sekä taulukossa 1 on kuvattu Olkiluoto 3:n rakennukset. Kuvasta nähdään, että laitoskokonaisuus muodostuu useista rakennuksista. Kuvasta 1 nähdään myös Siemensin toimittama turbiinilaitos sekä Arevan toimittama reaktorilaitos. Turbiinilaitoksen oikealla puolella kuvassa 1 sijaitsevat laitoksen päämuuntajat, joiden kautta tuotettu sähkö tullaan johtamaan valtakunnan verkkoon. Laitoskokonaisuus on jaettu primääripiiriin sekä sekundaaripiiriin. Merivesipumppaamossa sijaitsevat päämerivesipumput. Turbiinilaitoksessa sijaitsee mm. turbiinit, generaattori, magnetointikone, lauhdutin, syöttövesipumput, lauhdepumput, välitulistimet ja syöttövesisäiliö.



Kuva 1. Olkiluoto 3:n rakennukset (TVO Oyj 2021d.)

Taulukko 1. Olkiluoto 3 rakennukset (TVO Oyj 2021d.)

Tunnus	Rakennuksen nimi
A	Reaktorirakennus
B	Turvallisuusjärjestelmärakennus 1
C	Turvallisuusjärjestelmärakennus 2
D	Turvallisuusjärjestelmärakennus 3
E	Turvallisuusjärjestelmärakennus 4
F	Polttoainerakennus
G	Reaktorirakennuksen apurakennus
H	Jätteenkäsittelyrakennus
I	Dieselrakennus
J	Sisäänkulkurakennus
K	Toimistorakennus
L	Turbiinirakennus
M	Kytkinlaitos
N	Merivesipumppaamo
O	Varmennetun merivesijärjestelmän pumppaamo
P	Suponestojärjestelmän pumput
Q	Apuhöyrykattilarakennus

OL3- laitoksen teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 2. Turbiinilaitoksella on yksi korkeapaineturbiini ja kolme matalapaineturbiinia. Höyryturbiinin kierrosnopeus on 1500 rpm, johdettua turbiinin suuresta fyysisestä koosta. Esimerkiksi OL1- ja OL2- laitoksilla turbiinin pyörimisnopeus on 3000 rpm. Reaktorin jäähdyttää korkeassa paineessa oleva vesi.

Taulukko 2. Tekniset tiedot. (TVO Oyj 2021d.)

Sähköteho	n. 1600 MW
Reaktorin lämpöteho	430 MW
Kokonaishyötysuhde	noin 37 %
Reaktorin toimintapaine	155 bar
Polttoainemäärä	241 kpl
Polttoaine	Uraanidioksidi UO <sub>2</sub>
Polttoaineen kulutus	noin 32 t vuodessa
Uraanin määrä reaktorissa	noin 128 tU
Tuorehöyryn lämpötila	290 °C
Vuotuinen sähköntuotanto	noin 13 TWh
Säätöelementtien määrä	89 kpl
Merivesivirtaus	57 m <sup>3</sup> /s
Turbiinin kierrosnopeus	1500 rpm
Turbiinien lukumäärä	1 KP 3 MP

## 2.1 Primääripiiri

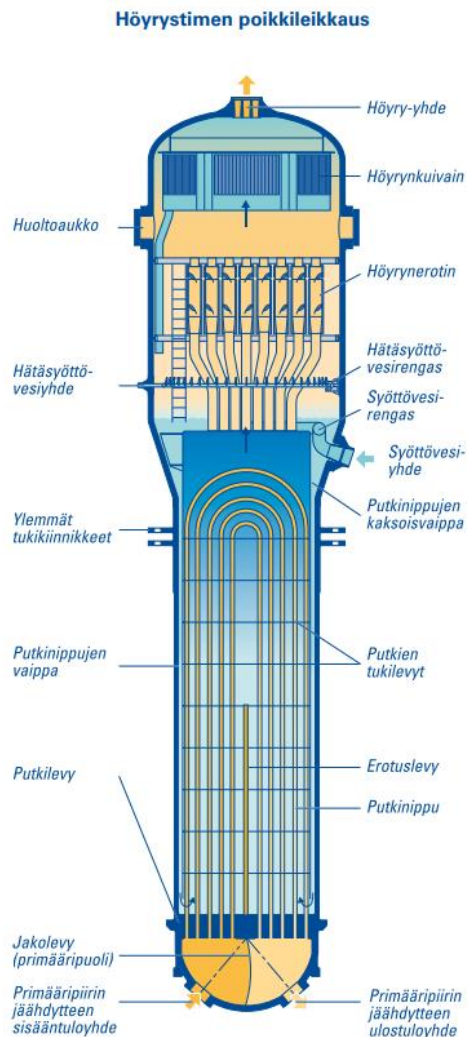
Primääripiiri sijaitsee kokonaisuudessaan reaktorirakennuksessa. Suunniteltu käyttöikä primääripiirille on 60 vuotta. Se on mitoitettu niin, että se kestää mahdolliset käyttö- ja onnettomuustilanteiden kuormitukset. Liitteessä 1. on kuvattuna primääripiirin prosessikaavio. Primääripiiri koostuu neljästä kiertopiiristä. Reaktorista ulostuleva jäähdyte on 328 °C asteista. Jäähdyte siirretään pääkiertoputkistoa (kuumahaara) pitkin höyrystimeen luovuttamaan lämpöä sekundääripuolelle. Höyrystin muodostaa rajapinnan primääripiirin ja sekundääripiirin välille. Primääripiirin jäähdyte ja sekundääripuolen vesi eivät ole kosketuksissa toisiinsa, ainoastaan lämpö siirtyy höyrystimen tuubien kautta sekundääripuolelle. Koska höyrystin on olennainen osa sekä primääripiiriä että sekundääripiiriä, sitä käsitellään erikseen seuraavassa kappaleessa. Höyrystimessä jäähdytteen lämpötila laskee 296°C asteeseen, jonka jälkeen jäähdyte siirtyy pääkiertoputkistoa (välihaara) pitkin pääkiertopumpulle. (TVO Oyj 2021e.)

Pääkiertopumpun jälkeen jäähdyte siirtyy pääkiertoputkistoa (kylmähaara) pitkin takaisin reaktoriin. Reaktorissa jäähdyte virtaa polttoainesauvojen ja polttoainenippujen välissä alhaalta ylöspäin ja siihen siirtyy polttoainesauvojen tuottamaa lämpöenergiaa. Paineistin, on kytketty kolmannen kiertopiirin kuumaan haaraan. Sen tehtävänä on pitää primääripiirin paine korkeana (155 bar), jotta jäähdyte ei pääse kiehumaan. Näin lämmönsiirto polttoainesauvoista jäähdytteeseen pysyy tehokkaana. Paineetta säädetään sähkövastuksilla sekä ruisikutuksella paineistimen höyrytilaan. Paineistimeen on kytketty paineenalennus- ja varoventtiilit, joiden tehtävänä on primääripiirin ylipaineen suojaus. Jäähdytevirtaus reaktorin läpi on 23135 kg/s, ja yhden pääkiertopiirin virtaus on 28330 m<sup>3</sup>/h. Pääkiertopumpun nostokorkeus on 100,2 m ± 5 %. Pääkiertopumpun moottorin teho on 9000 kW ja pääkiertopumpun pyörimisnopeus on vakio, 1465 rpm. (TVO Oyj 2021e.)

## 2.2 Höyrystin

Höyrystimiä on 4 kappaletta, yksi jokaisessa primääripiirin kiertopiirissä. Höyrystin on suuri lämmönvaihdin, jossa siirretään primääripiirin jäähdytteen avulla reaktorin polttoaineesta

vapautuvaa lämpöä sekundääripuolen veteen höyrystimen vaippapuolelle. Höyrystimet ovat pystytyyppisiä. Höyrystimen U-muotoiset putket muodostavat rajapinnan primääripiirin ja sekundääripuolen välille. Kuvassa 2. on esitetty havainnollistava kuva höyrystimen rakenteesta. (TVO Oyj 2021e.) Höyrystimen teknistä tietoa on esitetty taulukossa 3.



Kuva 2. Höyrystin (TVO Oyj 2021e.)

Vaippapuolella kiertävä sekundääripuolen vesi höyrystyy höyrystimessä. Höyrystimien yläosassa olevien höyrynerottimien ja höyrykuivaimen avulla erotetaan höyry vedestä. Höyry siirtyy höyryputkia pitkin korkeapaineturbiinille. Vesi, joka erotettiin höyrystä palaa höyrystimen alaosaan höyrystimen ulkokehällä. Kuitenkin sen vähäinen osuus (10 %) kylmään

syöttöveden sekoitettavasta määrästä mahdollistaa suuremman lämpötilaeron ja tehokkaamman lämmönsiirtymisen primääripiirin jäähdytteestä sekundääripuolelle. Syöttövettä lisätään höyrystimeen sama määrä, joka poistuu höyrystimestä höyrynä. Höyrystimen rakenteella on merkittävä rooli laitoksen kokonaishyötysuhdetta parantavana tekijänä. Suuri lämmönvaihtoala sekä pystysuuntainen syöttöveden esilämmitin ovat tekijöitä, jotka edesauttavat parempaa hyötysuhdetta. (TVO Oyj 2021e.)

Taulukko 3. Höyrystimen ominaisuuksia. (TVO Oyj 2021e.)

Lämmönsiirtopinta-ala/ höyrystin	7960 m <sup>2</sup>
Primääripiirin suunnittelupaine	176 bar
Primääripiirin suunnittelulämpötila	351 °C
Sekundääripiirin suunnittelulämpötila	311 °C
Sekundääripiirinpiirin suunnittelupaine	100 bar
U-putkien lukumäärä	5980 kpl
kokonaiskorkeus	23 m
kokonaispaino	520 t
Syöttöveden lämpötila	230 °C
Päähöyryn kosteus	0,25 %
Päähöyryvirtaus yhteensä, 4 höyrystintä	2443 kg/s
Päähöyryn kyläinen paine	78 bar
Paine kuumaseisokissa	90 bar

### 2.3 Vesihöyryprosessi

Sekundääripiirillä tarkoitetaan voimalaitoksen turbiinilaitosta. Sen tarkoituksena on muuntaa höyrystimiltä tuleva tuorehöyryn sisältämä lämpöenergia hyvällä hyötysuhteella sähköenergiaksi turbiinien ja generaattorin avulla. Sekundääripiirin tehtävänä on lauhduttaa turbiinilta tuleva höyry vedeksi ja esilämmittää sitä sekä palauttaa syöttövedenä höyrystimiin. Painevesilaitoksen sekundääripiiri on säteilystä vapaa. Tämä helpottaa kunnossapitoa, käyttöä ja huoltoa koska säteilyn aiheuttamaa kontaminaatiota ei tarvitse huomioida. Sekundääripiiri voidaan jakaa päähöyryjärjestelmään, päälauhdejärjestelmään, syöttövesijärjestelmään sekä turbiinigenaattoriyksikköön. (TVO Oyj 2021e.) Taulukossa 4 on esitetty sekundääripiirin ominaisuuksia.

Liitteessä 2 on kuvattuna vesihöyryprosessikaavio. Liitteessä 3 on kuvattuna lämpötasekuva. Lämpötasekuva on tehty 8 °C asteen jäähdytysvedellä ja täydelle 100 %:n laitosteholle. Lämpötaseesta näkee prosessin kannalta oleellisissa pisteissä paineen  $p$  [bar], entalpian  $h$  [kJ/kg], massavirran  $q_m$  [kg/s], lämpötilan  $T$  [°C] tai höyrypitoisuuden  $x$  [%]. Lämpötaseen arvot muuttuvat meriveden lämpötilan mukaan. Se on otettava huomioon mittaustuloksia analysoitaessa, jos niitä verrataan suunniteltuun lämpötasekuvaan.

Taulukko 4. Sekundääripiirin ominaisuuksia. (TVO Oyj 2021e.)

Sähköteho, brutto	1720 MWe
Sähköteho, netto	1600 Mwe
Höyryn paine turbiinilla	75,5 bar
Höyryn lämpötila	290 °C
Höyryn virtaus	2443 kg/s
Turbiinin kierrosluku	1500 1/min
Korkeapaineturbiini	1 kpl
Matalapaineturbiini	3 kpl
Turbiinigeneraattoriyhdistelmän pituus	68 m
Lauhduttimen jäähdytysvesivirtaus	53 m <sup>3</sup> /s
Lauhduttimen tyhjö tehoajolla	24,7 mbar abs.
Syöttöveden esilämmitysasteita	7 kpl
Syöttöveden loppulämpötila	230 °C

### 2.3.1 Päähöyryjärjestelmä

Päähöyryjärjestelmä on kuvattu yksinkertaistetussa prosessikaaviossa liitteessä 4. OL3- laitoksella on käytössä rakenteiden, komponenttien, järjestelmien, osajärjestelmien, laitteiden ja komponenttien nimeämiseen KKS- järjestelmä. KKS tulee Saksan kielisistä sanoista ”Kraftwerk Kennzeichen System”, joka suomennettuna tarkoittaa voimalaitoksen tunnistejärjestelmää. KKS- järjestelmän tarkoituksena on nimetä kaikki rakenteet, komponentit, järjestelmät, osajärjestelmät, laitteet ja koneistot. (OL3 laitostuntemuksen perusteet -kurssi, 2018). Käytössä on myös lyhenteitä, kuten liitteen 4 kuvassa MSR, joka tulee sanoista ”Moisture Separator Reheater”. TVO:lla on saatavilla työntekijöille vihot, joissa on kerättyinä käytössä olevat KKS- koodit sekä lyhenteet.

Höyrystimistä lähtevä tuorehöyry siirtyy neljää päänhöyryputkea pitkin korkeapaineturbiinille. Jokaisessa päänhöyryputkessa on sulku- ja säätöventtiili ennen korkeapaineturbiinia. Jokaisessa höyrylinjassa on häiriötilanteiden varalle kaksi varoventtiiliä, eristysventtiili ja höyryn ulospuhalluslinja. Tuorehöyryä voidaan myös johtaa suoraan lauhduttimeen ja ohittaa turbiinit. Ohitushöyryjärjestelmällä säädetään painetta laitoksen ajotilanteen mukaan ja osateholla osa höyrystä menee ohituksen kautta lauhduttimeen. KP-turbiinin jälkeen höyrystä erotetaan kosteus eli höyry kuivataan. Tämän jälkeen höyry tulistetaan kahdessa vaiheessa välitulistimen avulla. Tulistus tehdään väliottohöyryn, sekä tuorehöyryn avulla. Tulistimien jälkeen höyry jaetaan kolmeen matalapaineturbiiniin. Ennen MP-turbiinia on pikasulku- ja säätöventtiilit. (TVO Oyj 2021e.) Liitteen 3 lämpötaseesta näkee suunnitellut höyryn ja veden ominaisuudet sekä massavirrat prosessin eri pisteissä.

### 2.3.2 Päälahdejärjestelmä

Päälahdejärjestelmä on kuvattu liitteessä 5, PICS- näyttökuvalla (Process Information and Control System). Kyseessä on yksi näyttokuva ja siitä näkee, miten se on esitetty voimalaitoksen operaattorille. Päälahdejärjestelmä alkaa lauhduttimista, joissa MP-turbiinilta saapuva höyry lauhdutetaan vedeksi meriveden avulla. Lauhdutin koostuu kolmesta lohkokosta, joissa kussakin on kaksi erillisestä merivesikammiota. Lauhdutinlohkot sijaitsevat MP-turbiinin alapuolella. Lauhduttimeen tulee MP-turbiinilta saapuvan höyryn lisäksi prosessista poistettavia lauhde- ja kaasuvirtauksia. Jäähdytysvetenä käytettävän meriveden lämpötila nousee lauhduttimessa n. 12 °C. Lauhduttimen jäähdytysputkien likaantumista estetään puhdistusjärjestelmällä syöttämällä puhdistuspalloja jäähdytysputkien läpi ja keräämällä pallot talteen lauhduttimen jälkeen. Lauhduttimen tehokas toiminta vaatii hyvän alipaineen. Alipainejärjestelmän tyhjäpumpujen avulla kerätään ilmaa ja lauhtumattomia kaasuja pois lauhduttimesta ja pidetään yllä mahdollisimman hyvä alipaine. Lauhduttimen jälkeen lauhde pumpataan päälahdepumpuilla syöttövesisäiliöön. Lauhdepumppuja on kolme, joista kaksi on käytössä ja kolmas pumppu on varalla. Lauhde esilämmitetään neljässä vaiheessa ennen sen saapumista syöttövesisäiliöön. Esilämmityksen avulla parannetaan prosessin hyötysuhdetta. Osana päälahdejärjestelmää on mekaaninen puhdistusjärjestelmä, jonka avulla poistetaan epäpuhtauksia prosessista. (TVO Oyj 2021e.)

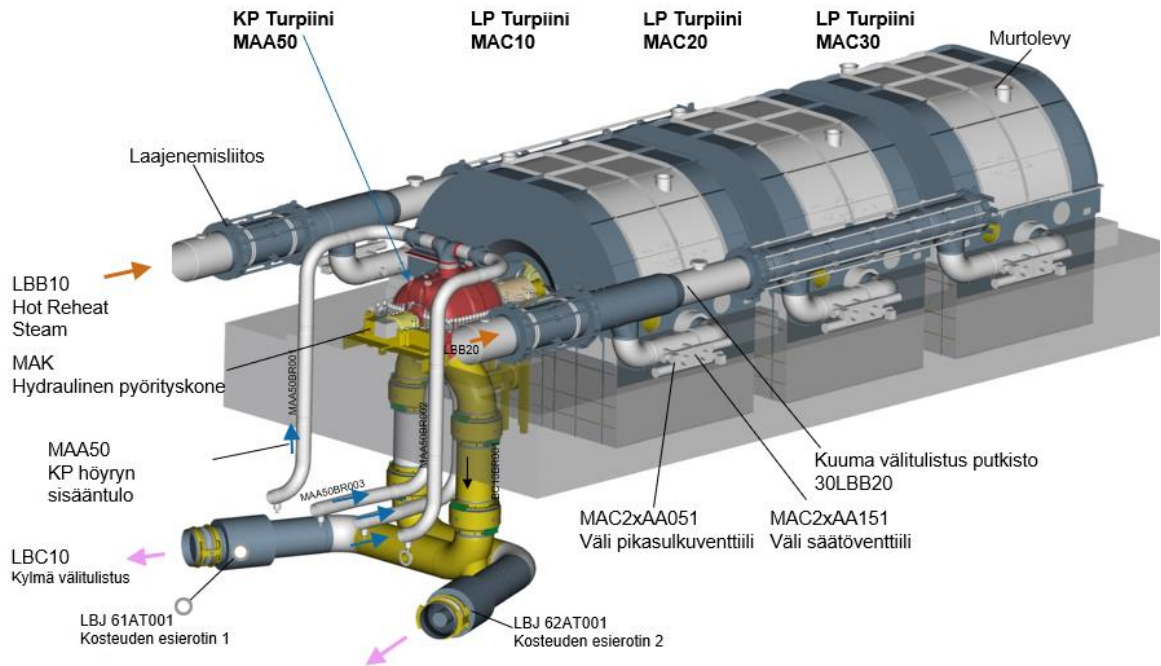


### 2.3.3 Pääsyöttövesijärjestelmä

Pääsyöttövesijärjestelmän yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty liitteessä 6. Sen pääkomponentteja ovat syöttövesitankki, apusyöttövesipumppu, neljä syöttövesipumppua, esilämmittimet sekä syöttövesiventtiilit ennen höyrystimiä. Apusyöttövesipumppu on käytössä laitoksen käynnistyksessä ja sammutuksessa, sekä pienemmillä tehotasoilla. Neljästä syöttövesipumpusta on kolme käytössä ja yksi varalla. Syöttöveden esilämmitysjärjestelmä koostuu kahdesta rinnakkaisesta kolmivaiheisesta esilämmitysjärjestelmästä. Esilämmityslinja koostuu kahdesta korkeapaineisesta esilämmittimestä sekä välitulistuslauhteiden jäähdyttimestä. Syöttövettä lämmittävä höyry tulee korkeapaineturbiinin väliotoista. Esilämmittimien jälkeen syöttövesi johdetaan turvallisuusrakennuksissa olevien syöttövesiventtiilien kautta reaktorirakennuksen höyrystimiin. (TVO Oyj 2021e.)

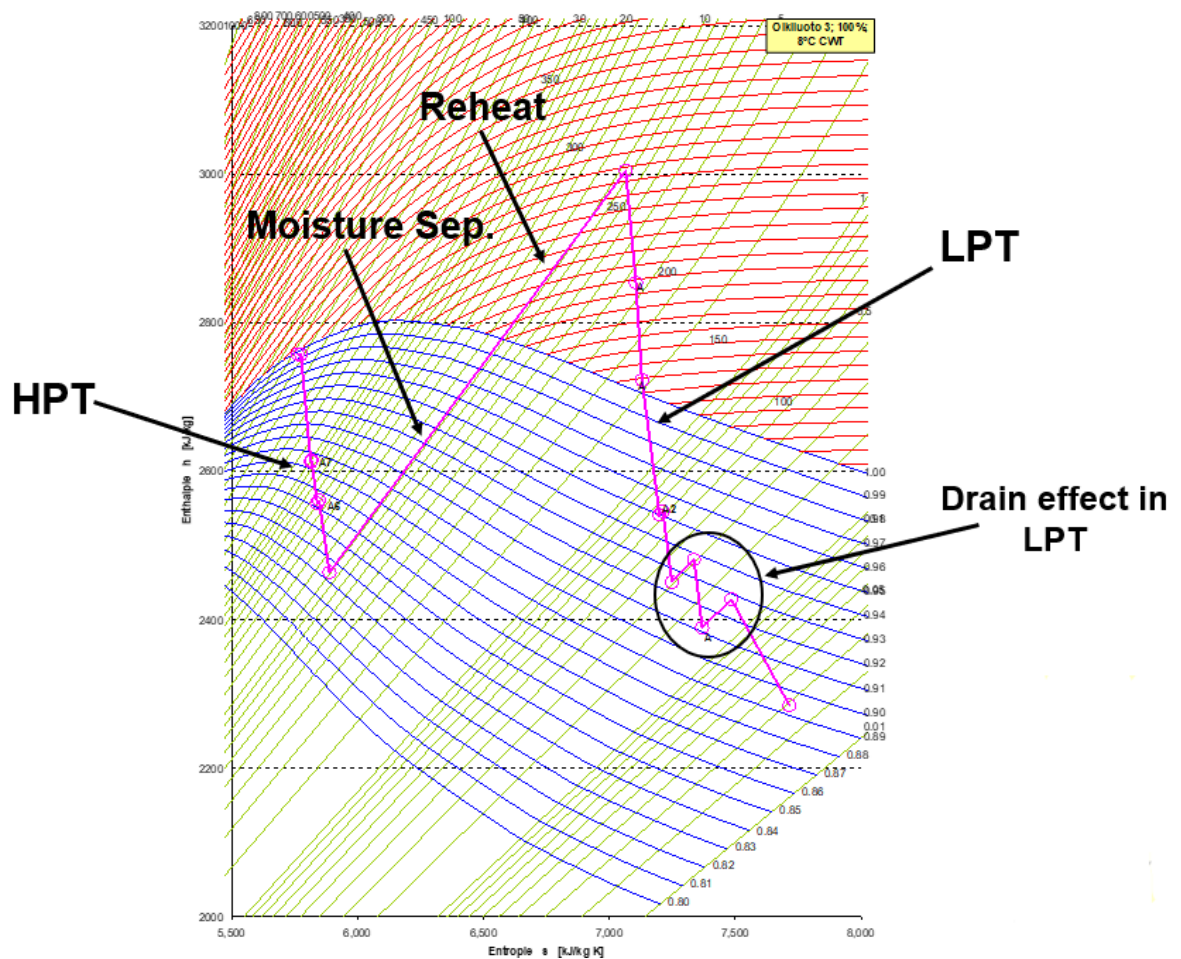
### 2.3.4 Turbiinit

Kuvassa 3 on havainnollistettu höyryturbiinilaitoksen järjestelyitä. Liitteessä 4 on kuvattu yksinkertaistetulla virtauskaaviolla höyryn kulkua turbiinilaitoksella. Turbiinilaitoksen tehtävänä on muuntaa reaktorissa aikaansaatu lämpöenergia mekaaniseksi energiaksi. Höyry pyörittää turbiinia ja samalla akselilla on generaattori, joka muuntaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Turbiinigeneraattorikoneikko on yhdellä akselilla ja sen kokonaispituus on 68 m. Se koostuu yhdestä korkeapaineturbiinista, kolmesta matalapaineturbiinista, generaattorista sekä magnetointikoneesta. Turbiini pyörii 1500 kierrosta minuutissa. (TVO Oyj 2021e.)



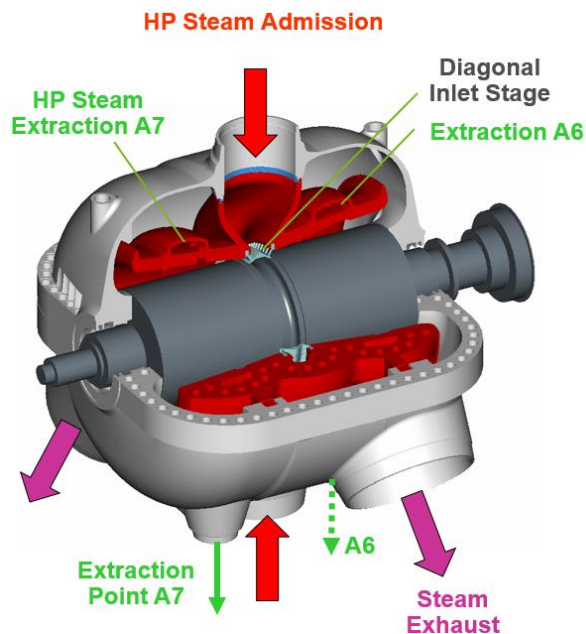
Kuva 3. Höyryturbiinin järjestelyt (OL3 laitostuntemus -kurssi, 2018).

Kuvassa 4. on kuvattuna Mollier- diagrammilla höyryn ominaisuuksia turbiinilaitoksella. Kuvasta näkyy höyryn paisunta korkeapaineturbiinilla, kosteuden poisto, tulistus sekä höyryn paisunta matalapaineturbiinin jälkeen.

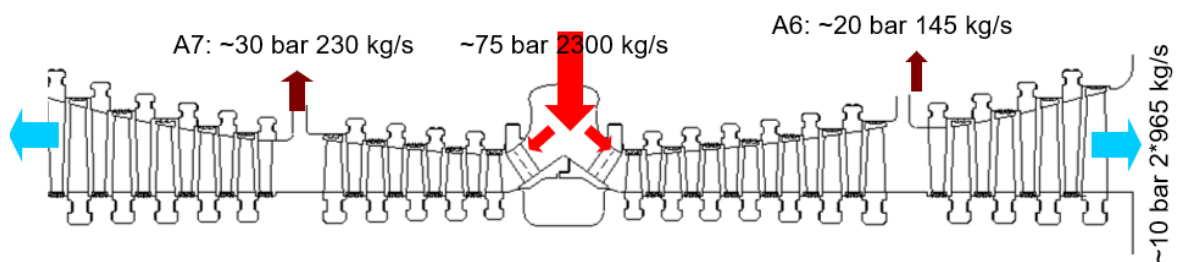


Kuva 4. Höyryn paisunta 100 %:n teholla ja jäähdytysveden lämpötilalla 8 °C (OL3 laitostuntemus -kurssi, 2018).

Havainnollistava kuva korkeapaineturbiinista on esitetty kuvassa 5. Se on kaksisyöttöinen reaktioturbiini, joka koostuu 12:sta johto- ja juoksusiipivyöhykkeestä. Se tuottaa fyysiseen kokoonsa nähden suuren osuuden laitoksen sähkötehosta, n. 40 %, joka vastaa n. 650 MW:n sähkötehoa. Korkeapaineturbiinista on kaksi väliottoa. Väliotto A7 on sekä välitulistimen 1. vaiheelle että syöttöveden korkeapaine-esilämmittimelle ja väliotto A6 syöttöveden korkeapaine-esilämmittimille. Höyryn kulkua ja ominaisuuksia KP-turbiinissa on esitetty kuvassa 6. (OL3 Advanced -course, 2011).



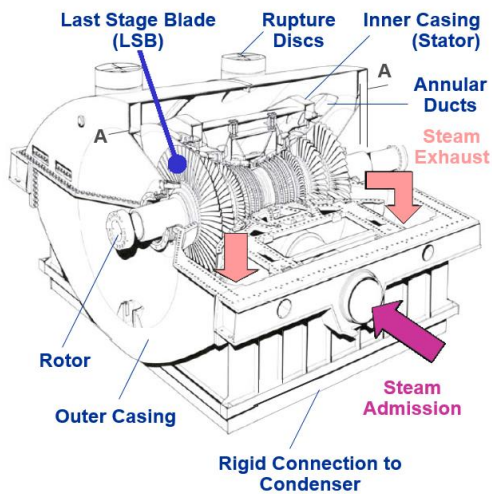
Kuva 5. Korkeapaineturbiini (OL3 Advanced -course, 2011).



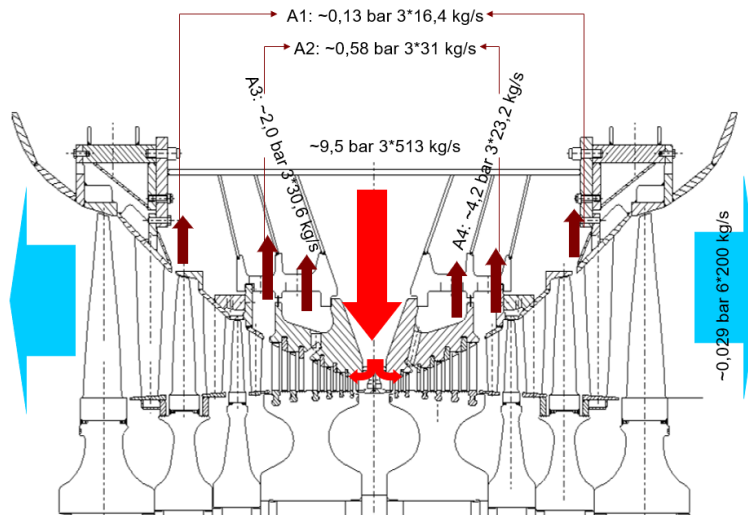
Kuva 6. Höyryn ominaisuuksia KP-turbiinissa (OL3 laitostuntemus kurssi, 2018).

Korkeapaineturbiinin jälkeen höyry siirtyy kahteen pystymalliseen välitulistimeen. Niiden tehtävänä on poistaa höyrystä kosteus sekä lisätä siihen lämpöenergiaa tulistamalla höyryä. Tulistettu höyry siirtyy välitulistimilta kolmeen matalapaineturbiiniin.

Kuvassa 7 on havainnollistettu matalapaineturbiini. Matalapaineturbiinit tuottavat yhteensä n.60 % laitoksen sähkötehosta. Kukin MP-turbiini tuottaa noin 320 MWe sähkötehon. MP-turbiini on kaksijakoinen reaktiiturbiini, joka koostuu 9:stä johto- ja juoksusiipivyöhykkeestä. Matalapaineturbiinista on neljä välilottoa A1-A4 (OL3 Advanced -course, 2011). Höyryn kulkua ja höyryn ominaisuuksia MP-turbiinissa on esitetty kuvassa 8.



Kuva 7. Matalapaineturbiini (OL3 Advanced -course, 2011).

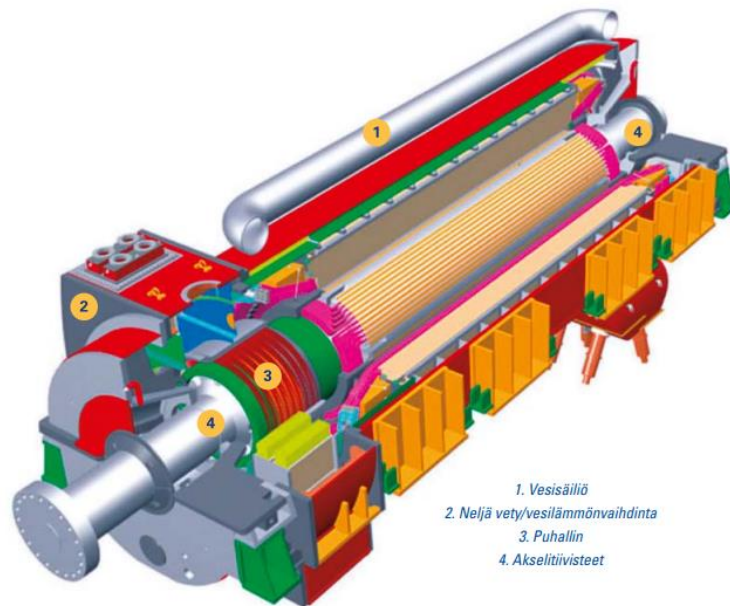


Kuva 8. Matalapaineturbiini (OL3 Advanced -course, 2011).

## 2.4 Generaattori

Generaattori on neljänapainen ja sen roottorikämmet jäähdytetään vedyn avulla. Vedyn paine on 5 bar ja lämpötila n. 40 °C. Vety jäähdytetään jäähdytysveden avulla lämmönvaihtimissa. Vety kiertää generaattorin sisällä roottorille asennetun puhaltimen avulla. Staattorin käämejä sekä ulosottoläpivientejä jäähdytetään jäähdytysveden avulla. Generaattorin tuottama teho siirretään putkikiskoa pitkin päämuuntajille ja edelleen Fingridin hallinnoimaan 400 kV:n

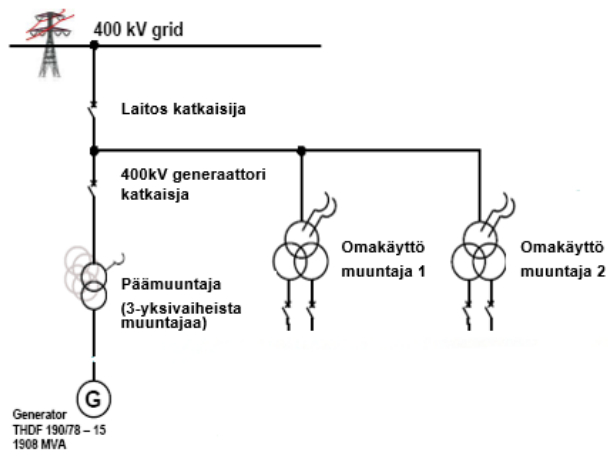
kantaverkkoon. Kuvassa 9. on esitetty havainnollistava kuva generaattorista, ja taulukossa 5 generaattorin ominaisuuksia. (TVO Oyj 2021e.). Kuvassa 10 on esitetty generaattorin liittyminen Fingridin 400 kV:n kantaverkkoon sekä omakäyttömuuntajille.



Kuva 9. Generaattori (TVO Oyj 2021e.)

Taulukko 5. Generaattorin ominaisuuksia. (TVO Oyj 2021e.)

Kierrosnopeus	1500 1/min
Taajuus	50 Hertz
Pätöteho	1793 $Mw_{el}$
Nimellisteho	1992 MVA
Tehokerroin	0,9
Jännite	27 kV $\pm$ 5 %
Hyötysuhde	n. 99 %
Magnetointivirta	9471 A
Jäähdytysveden lämpötila	45 °C
Vesijäähdytteen lämpötila	40 °C



Kuva 10. Generaattorin liittyminen valtakunnan verkkoon sekä omakäyttömuuntajille. (OL3 Laitostuntemus- kurssi, 2018).

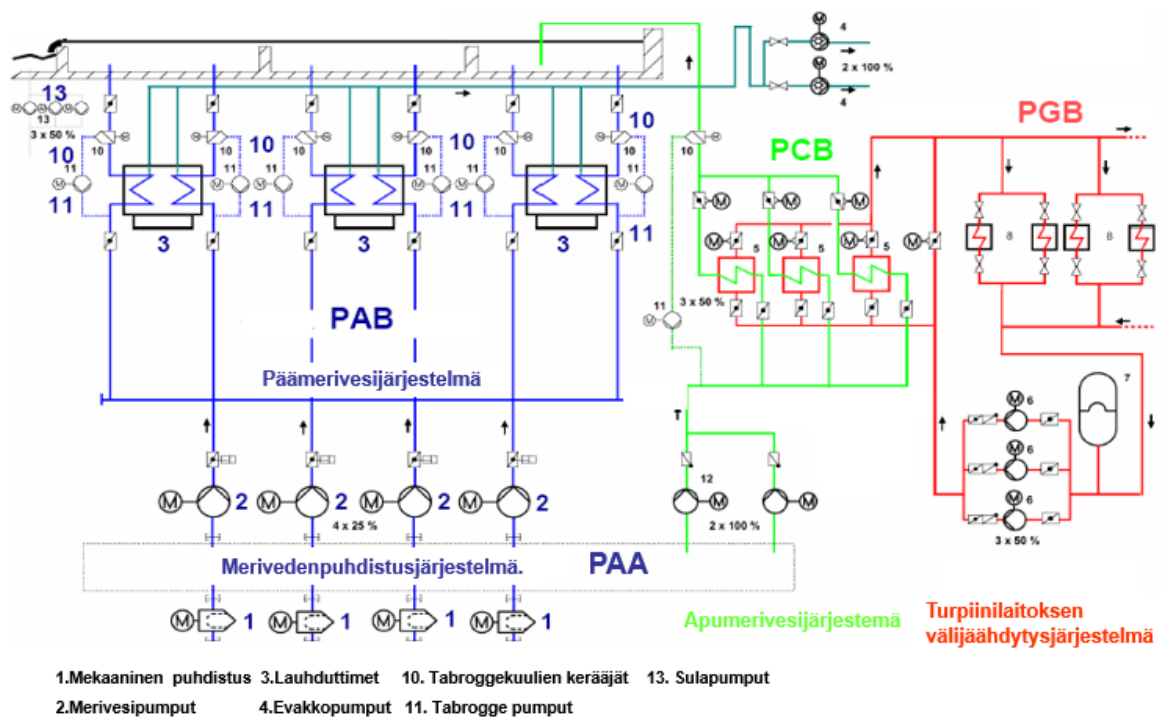
## 2.5 Merivesijäähdytys

Kuvassa 11 on esitettyä konventionaaliset jäähdytysjärjestelmät. Jäähdytysvetenä käytetään merivettä. Meriveden kokonaisvirtaus laitokselle on  $57\text{m}^3/\text{s}$  ja  $4\text{m}^3/\text{s}$  kokonaisvirtauksesta käytetään jäähdyttämään järjestelmiä. Suurin osuus meriveden virtauksesta kulkeutuu lauhduttimille jäähdyttämään turbiinilta tulevaa höyryä. Merivesi johdetaan laitokselle tunnelia pitkin pumppurakennukseen. Merivettä puhdistetaan monessa vaiheessa ennen sen päätymistä lauhduttimeen. Ensin siitä poistetaan suurempia epäpuhtauksia karkeavälppien avulla. Ennen merivesipumppuja merivesi johdetaan neljän puhdistuslinjan lävitse, joista jokainen koostuu hienovälpistä ja ketjukorisuodattimista. Päämerivesipumppuja on neljä kappaletta, jotka kaikki käyvät laitoksen ollessa käytössä. Jokainen pumppu tuottaa noin  $13\text{m}^3/\text{s}$  virtauksen merivettä lauhduttimeen. Lauhduttimen jälkeen merivesi johdetaan aaltoilualtaaseen ja edelleen poistomerivesitunnelia pitkin mereen. (TVO Oyj 2021e.)

Meriveden lämpötila vaikuttaa suuresti laitoksen käyttötalouteen. Mitä pienempi on lauhduttimen paine, sitä enemmän entalpia putoaa turbiinilla ja sähkön tuotanto kasvaa. (Ahti-Jaatinen- Värri, 2018). Toisin sanoen, mitä matalampi on meriveden lämpötila, sitä pienemmäksi saadaan lauhduttimen paine ja sitä kautta entalpiaero suuremmaksi. Lauhduttimen

tyhjä paranee taas käyttöejektorien avulla, jotka poistavat lauhduttimesta ilmaa ja lauhtumattomia kaasuja, mahdollistaen paremman alipaineen lauhduttimeen.

Evakkopumput edesauttavat meriveden virtausta lauhduttimen läpi ja parantavat lauhduttimen lämmönsiirtokykyä. Lauhduttimen merivesipuolen jäähytinputkiin voi kerääntyä happea ja evakkopumppujen avulla saadaan jäähdytysputket pidettyä täynnä merivettä. Tapprogejärjestelmä kierrättää puhdistuskuulia lauhduttimen merivesipuolella ja edesauttaa lämmönsiirtopinnan puhtaana pysymistä, parantaen näin lämmönsiirtymistä. Sulapumppujen tehtävänä on pumpata lämmintä vettä merivesikanavaan, jos meriveden lämpötila putoaa liian matalalle, on vaarana suppoilmiö laitoksella. (OL3 Laitostuntemuksen syventävä -kurssi, 2018).

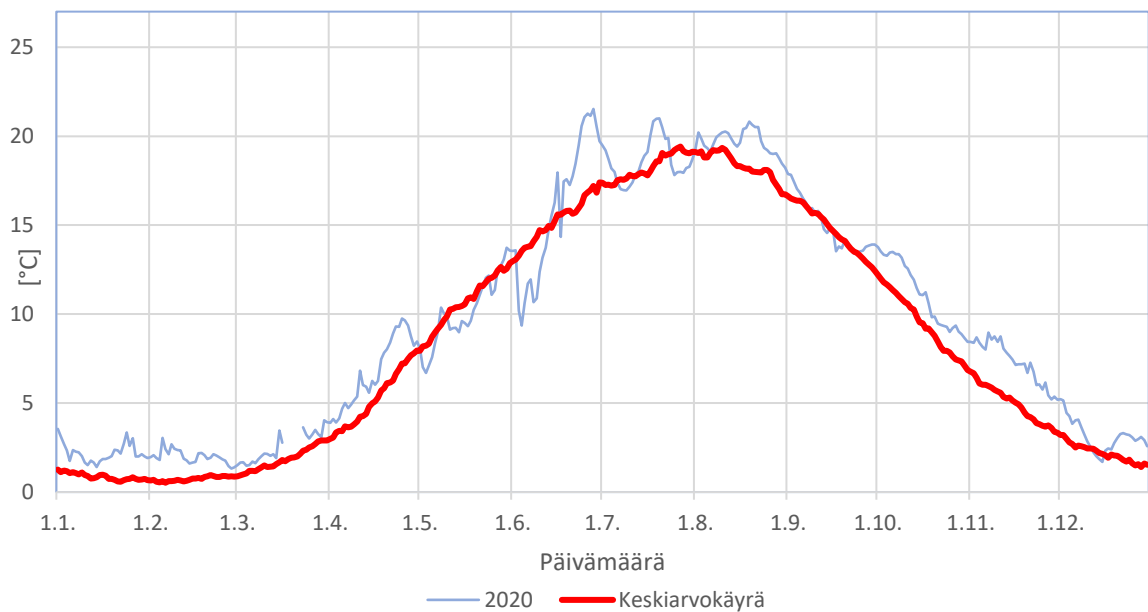


Kuva 11. Konventionaaliset jäähdytysjärjestelmät (OL3 Laitostuntemuksen syventävä -kurssi, 2018).

Meriveden lämpötiloja Olkiluodossa on esitetty kuvassa 12. Mittauspiste 112K501 sijaitsee OL1- laitoksella meriveden tulokanavassa. Lämpötilat ovat vuorokausikeskiarvoja. Kuvassa on esitetty vuoden 2020 lämpötilat sekä vuosina 2007–2020 tehdyn mittauksen keskiarvo.



Laitosmittauksissa on huomioitava meriveden lämpötilan vaikutus suorituskykyyn. Paras hyötysuhde laitoksella on talvikuukausina meriveden ollessa kylmimmillään. Riippuen vuosi- ja kuukausittaisesta ajankohdasta, voidaan laitosmittaukset tehdä ennen ja jälkeen vuosi- ja kuukausittaisen huollon hyvinkin erilaisissa olosuhteissa johtuen meriveden lämpötilamuutoksesta. Suurinta lämpötilan muutosta havaitaan keuhällä ja syksyllä.



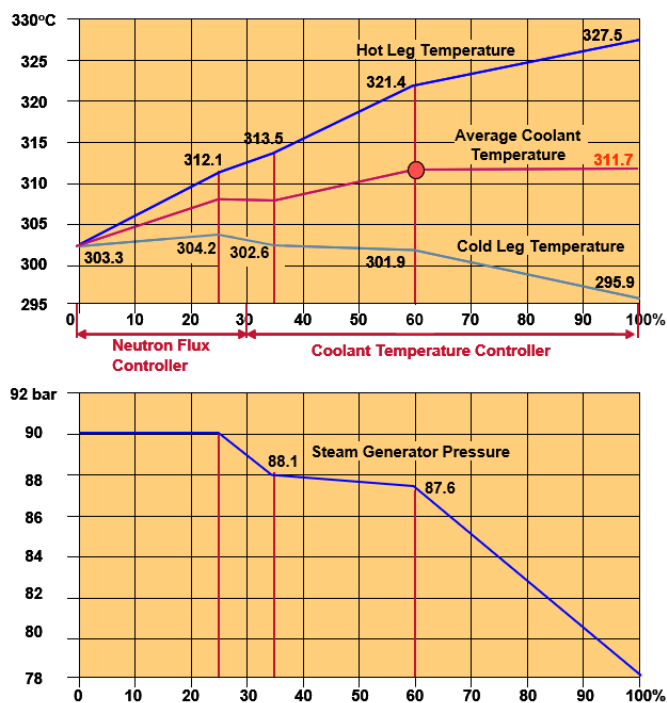
Kuva 12. Meriveden lämpötilan vuorokausikeskiarvo 112K501 mittapisteessä. (Mäkitalo, 2021)

## 2.6 Ajotapa

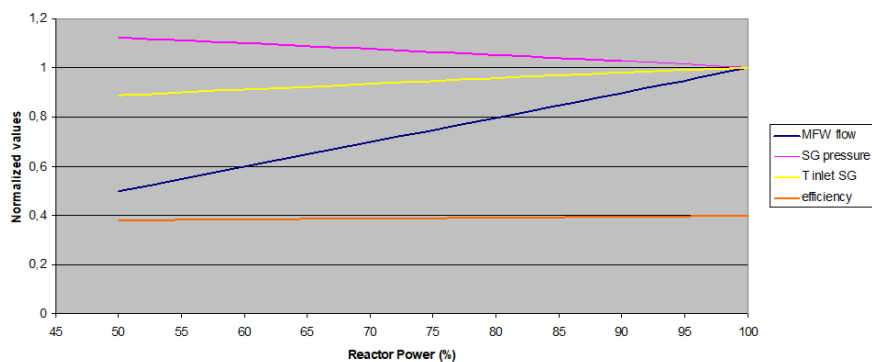
Ydinvoimalaitoksia pyritään käyttämään Suomessa 100 %:n teholla. Tässä kappaleessa tuodaan esiin OL3- laitoksen ominaisuuksia, jotka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa laitosmittauksia. Näiden lisäksi on huomioitava sähkömarkkinoiden mahdollinen vaikutus laitoksen sähköntuotantotehoon.

## 2.6.1 Osatehokaavio

Kuvassa 13. on esitetty osatehokaavio. Päähöyrinpaine nousee tehon laskiessa. Myös jäädytteen lämpötilat muuttuvat laitoksen tehon mukaan. Kuvassa 14 on esitetty sekundääripiirin pääparametreja eri tehotasoilla. Syöttöveden virtaus (MFW flow), höyrinpaine (SG pressure), syöttöveden lämpötila ennen höyrystintä (T inlet SG) sekä hyötysuhde (efficiency). Kuvista voidaan nähdä miten laitoksen ominaisuudet muuttuvat eri tehotasoilla. Laitoksen hyötysuhde laskee kuvan 14 mukaan tehotason laskiessa. Laitosmittaukset tulisi tehdä niin että tuloksia voidaan vertailla keskenään.



Kuva 13. Osatehokaavio. (OL3 Laitostuntemuksen syventävä -kurssi, 2018).

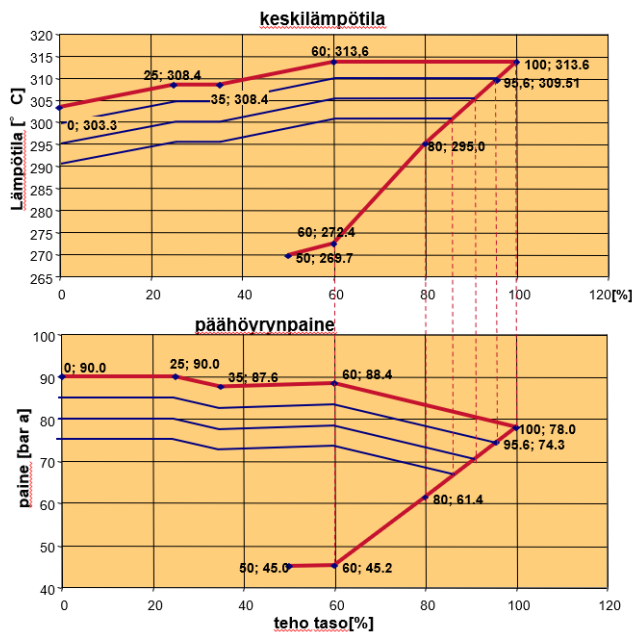


Kuva 14. Sekundääripiirin pääparametreja eri tehotasoilla. (OL3 Advanced -course, 2011).

## 2.6.2 Venytysajo

Venytyssajo on huomioitava suunniteltaessa laitosmittauksia ennen vuosihuoltoa. Laitosmittaukset tulisi tehdä ennen kuin venytyssajo alkaa, jotta laitoksen olosuhteet eivät muuttuisi liikaa.

Venytyssajo alkaa, kun primääripiirin booripitoisuus laskee minimirajalle (10-20ppm) ajojakson lopussa. Booripitoisuudella kompensoidaan polttoaineen palamaa ja ajojakson lopussa polttoaineen ylijäämäreaktiivisuus ei pysty pitämään enää lämpötilaa vakiona. Reaktiivisuutta saadaan lisää laskemalla jäähdytteen lämpötilaa, joka taas laskee reaktorin tehoa. Höyrynpaine laskee myös jäähdytteen lämpötilan laskiessa. Kuvassa 15. on esitetty reaktorin tehon, jäähdytteen keskilämpötilan sekä päänhöyrynpaineen muutokset venytyssajossa. (OL3 Laitostuntemuksen syventävä -kurssi, 2018).



Kuva 15. (OL3 Laitostuntemuksen syventävä kurssi, 2018).

## 2.6.3 Järjestelmäsuoja

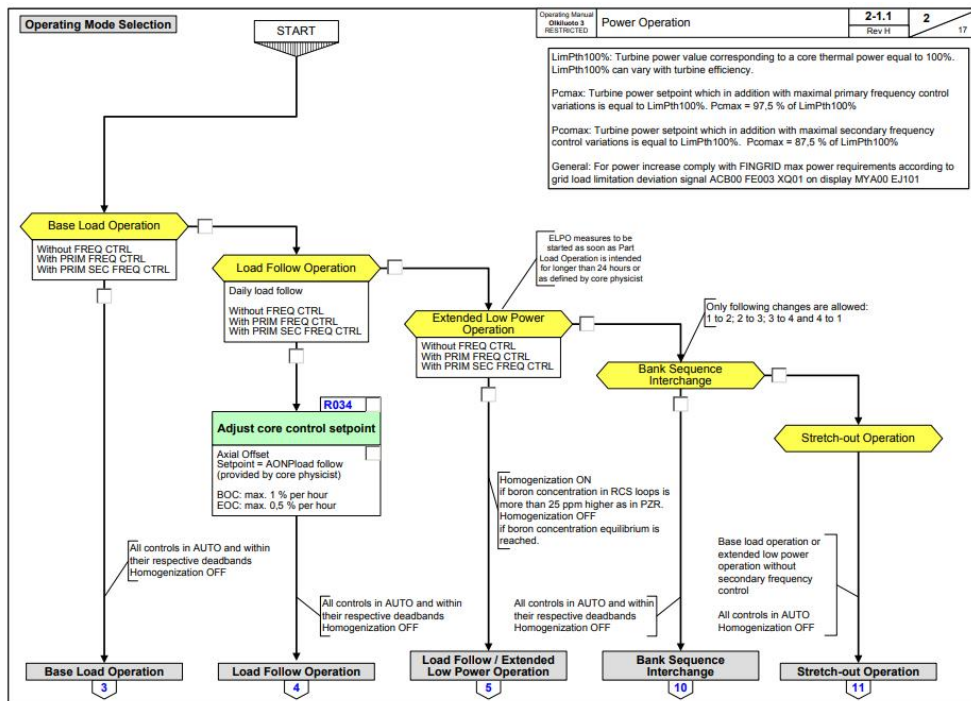
OL3 on sähköteholtaan suuri voimalaitos. Voimalaitoksen tuottaman sähkön nopean menestystilanteen varalle on kehitetty järjestelmäsuoja. Sen tehtävänä on alentaa sähkönkulutusta

tilanteessa, jossa OL3 putoaa verkosta pois. OL3 putoaminen verkosta saa aiheuttaa suurimmillaan 1300 MW:n tehonmuutoksen verkkoon. Järjestelmäsuojan kuluttajat on valittu Fingridin tarjouskilpailun perusteella 2017 ja niiden kokonaisteho on 266MW. Järjestely on voimassa vuoden 2022 loppuun. (Fingrid, 2021).

Jotta OL3- laitosta voidaan käyttää 100 %:n teholla, on oltava järjestelmäsuojan kunnossa. Järjestelmäsuojan tukemiseksi Olkiluotoon on rakenteilla suurtehoakkuvarasto, jonka akkukapasiteetti on 90MW. Suurtehoakkuvaraston esiselvitys sekä järjestelmäsuoja on kuvattu muistiossa, jonka tunnus on 1912631. Se on tarkoitettu TVOn sisäiseen käyttöön. Yleisesti voidaan todeta, että suurtehoakuston käytettävyyks on hyvä, jolloin se tukee hyvin järjestelmäsuojaa. Järjestelmäsuojan on kuitenkin oltava täysin käytössä, jotta OL3-laitos voi olla 100 %:n tuotantoteholla. (TVO, 2021f.) Järjestelmäsuojan toiminta on otettava huomioon laitosmittauksissa, jotta mittaukset pystytään tekemään 100 %:n teholla. (OL3 Laitostuntemuksen syventävä -kurssi, 2018).

#### 2.6.4 Laitoksen ajotapa tehoajolla

Tehoajon käyttöohjeen sivu 2 on esitettyä kuvassa 16. Siinä on kuvattu laitoksen eri käytötavat. Vaihtoehtoina on peruskuorma, kuorman seuranta, pidennetty matala teho, pankinvaihto tai venytysajo. Pankinvaihto liittyy säätösauvapankkien ohjaukseen sekä säätösauvaryhmien vaihtoihin. Laitosmittausten kannalta tulisi huomioida, että laitosta käytetään mahdollisimman tasaisesti ja pyritään pitämään olosuhteet muuttumattomana mittausten aikana. OL3-laitoksella pystyy tukemaan verkon taajuutta mutta se ei voi olla käytössä laitosmittausten aikana, vaan silloin tulee käyttötapana olla tasaisen peruskuorman tuottaminen ilman taajuudensäätöä. (TVO Oyj, 2021g).



Kuva 16. Tehojon käyttöohje. (TVO Oyj, 2021g).

## 2.6.5 Vuosihuollot

Vuosihuolto ydinvoimalaitoksella voi olla suunniteltu tai suunnittelematon. Suunnittelemattomaan vuosihuoltoon voidaan joutua esimerkiksi turvallisuussyistä. Vuosihuollon tavoitteena voi olla esimerkiksi polttoaineenvaihto, turvallisuustason korkeana pitäminen, huolto-ohjelmien toteuttaminen, tarkastusten ja testausten toteuttaminen tai vuosihuollon pituuden optimointi. Riippuen vuosihuoltotyypistä ja sen aikana tehtävistä töistä vuosihuollon pituus voi vaihdella hyvin paljon. OL3- laitoksella suunniteltu ajokausi vuosihuoltojen välillä voi olla 12–24 kk. Se eroaa muista Suomen ydinvoimalaitoksista siinä, että niiden vuosihuollot tehdään joka vuosi. Muutokset ajokausojen pituudessa aiheuttavat sen, että laitostarkastusten ajankohtaa joudutaan sovittamaan eri vuodenaikoihin ja meriveden lämpötila voi vaihdella hyvinkin paljon mittausten aikana verrattaessa niitä keskenään tulevaisuudessa.

OL3- laitoksen ensimmäinen vuosihuolto on aikataulutettu välille 23.9.2023 - 23.10.2023 ja toinen vuosihuolto 21.9.2024 - 11.10.2024. Ensimmäisen vuosihuollon kesto olisi 30 vrk

ja toisen 20 vrk. Vuosihuoltoryhmä arvioi vuosihuoltojen kestoa, ajankohtaa sekä tehtäviä töitä. (TVO Oyj, 2021h).

Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävillä laitosmittauksilla saadaan näkyväksi vuosihuoltojen aikana tehtyjen töiden mahdollinen vaikutus prosessiin. Mittausten perusteella voidaan arvioida laitoksen ja komponenttien tehokkuutta ja toimintakykyä. Mittausten perusteella voidaan myös havaita vikoja tai säätötarpeita laitoksella. Ne antavat tietoa myös komponenttien tai laitoksen suoristuskyvystä, kun vertaillaan tuloksia pitkällä aikavälillä. Mittaustulosten perusteella voidaan analysoida syitä ja seurauksia ja miettiä korjaavia toimenpiteitä tai tarkentavia lisämittauksia. Tuloksia voidaan käyttää myös apuna seuraavien vuosihuoltojen suunnittelussa.

### 3. OL3- suorituskykymittaukset käyttöönoton aikana.

Suorituskykymittaukset tehdään käyttöönottovaiheen D aikana. Käyttöönottokoe suorituskyvyn varmentamiseksi kuvataan dokumentissa ”OL3 Plant efficiency test during commissioning phase D”. Dokumentti kuvaa miten reaktorisydämen lämpötehon sekä nimellistehon (*NRO*, Net Rated Output) avulla määritetään ominaislämmönkulutus (*MHR*, Mean Heat Rate).

#### 3.1 Testin tavoitteet

Testit tehdään painotetuilla tehotasoilla 50 %, 90 % sekä 100 %. Mittauksien avulla arvioidaan, että laitoksen hyötysuhde vastaa laitossopimusta. Mittaukset tehdään laitoksen omilla kiinteillä mittauksilla ja mittausten tarkoitus on todistaa edellytykset laitoksen luovuttamiselle. Mittaukset tehdään käyttöönottovaiheiden D3 sekä D4 aikana:

- Käyttämällä käyttöönoton koeohjelmaa CWS31 sydämen lämpötehon laskentaan. (Secondary heat balance commissioning worksheet, 2021)
- Tehon indikointi luetaan PICS- näytöltä nimellistehon (*NRO*) laskentaan.

Sydämen lämpötehon sekä *NRO*-arvon avulla määritetään ominaislämmönkulutus (*MHR*). *NRO*-arvon määrittämiseksi käytetään korjauskerrointa poikkeamalle nimellisolosuhteista (meriveden lämpötila 5°C, tehokerroin 0,9). Liitteissä 7–9 on kuvattuna kaaviot generaattoritehon sekä tehokertoimen korjauskäyrille. Mittaukset tehdään normaalissa käyttötilanteessa niin, että höyrystimen ulospuhallus on normaalissa käytössä. Lisäveden syöttö on käytössä sekä primääripiirissä, että sekundääripiirissä. Testin aikana reaktoriteho pidetään referenssinä, kun säädetään laitoksen tehotasoa jokaisen mittauksen aikana. Laitoksen lämpöteho tulee olla kaksi tuntia tasainen jokaisen mittauksen yhteydessä seuraavin toleranssein.

- 100 +0/-2 % NP (Reaktoriteho)
- 90 +2/-2 % NP
- 50 +2/-2 % NP

Jokaisessa mittauksessa, heti kun laitoksen stabiilisuus on todettu ja teho on vaadituissa rajoissa, sydämen lämpöteho luetaan PICS- näytöltä signaalista ”3 0JSB00 FJ610X XQ61” joka löytyy näyttökuvasta ”DMB01 EJ101”. Lisäksi tulee varmistaa sekundääripuolen lämpöteho CWS31 mukaan. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

### 3.2 Testin hyväksymiskriteerit

Testin tarkoituksena on varmistaa voimalaitoksen kapasiteetti kaupalliseen käyttöön siirtymiselle. Kriteerit tulevat täytetyksi, jos korjattu sähköteho [ $P_{netkorjattu}$ ], sekä ominaislämpökapasiteetti täyttävät ehdot:

$$P_{netkorjattu} \geq 94 \% \text{ NRO}$$

$$MHR \leq 104 \% \text{ mitoitettu MHR}$$

$MHR$  on määritelty seuraavasti:

$$MHR = 0,7 \cdot HR_{100\%} + 0,2 \cdot HR_{90\%} + 0,1 \cdot HR_{50\%} \quad (1)$$

jossa  $HR$  on laitoksen lämpökapasiteetti [kJ/kWh) tietyllä tehotasolla.  $HR$  on taas määritelty reaktorisydämen lämpötehon suhteesta laitoksen nettosähkötehoon. Taulukossa 5 on esitetty testin hyväksymiskriteerit.



Taulukko 5. Testin hyväksymiskriteerit. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

Mitattu/laskettu arvo	Hyväksymiskriteeri
<i>NRO</i> 100 % teholla	$P_{\text{net, korjattu, min}} \geq 0,94 \cdot P_{\text{net, LBV}} \geq 1529,1 \text{ MWe}$
<i>MHR</i>	$HR_{\text{Mean, max}} \leq 1,04 \cdot HR_{\text{LBV}} \leq 10000 \text{ kJ/KWh}$

Reaktori- ja turbiinipuolen järjestelmien tulee olla käyttökäsikirjan mukaisessa tilassa. Laitoksen järjestelmien tilat on määritelty lisäksi myös dokumentissa ”OL3 plant efficiency test during commissioning phase D” liitteessä C. Dokumentissa tarkastellaan reaktoripuolen järjestelmiä ja varmistetaan että sopiva määrä puhaltimia, pumppuja, tasasuuntaajia, jäähdytyskoneita, dieseleiden esilämmityksiä, säätösauvojen ohjauskaappeja ja talotekniikkaa on käytössä. Samat järjestelmät tarkistetaan ja kirjataan jokaisella tehotasolla. *NRO* sekä sydämen lämpöteho tulee mitata samaan aikaan ja turvallisuusteknisistä käyttöehdoista ei saa poiketa. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

### 3.3 Kokeen suoritus

Ensin tarkastetaan laitoksen tila. Kirjataan ylös seuraavat asiat:

- Reaktorin lämpöteho JSB00FJ610X XQ61

Höyrystimen ulospuhallusvirtaus tulisi olla 6,1 kg/s jokaisessa höyrystimessä, ja ne luetaan mittapisteistä:

- LCQ10 CF001 XQ01

- LCQ20 CF001 XQ01

- LCQ30 CF001 XQ01

- LCQ40 CF001 XQ01

Lisäksi kirjataan ylös, onko lisäveden syöttö primääripiiriin sekä sekundääripiiriin automaattilla. Tämä jälkeen kirjataan ylös järjestelmien tilat. Liitteessä 10 on esitetty binäärisignaalit, jotka voidaan tarkastaa TOPAS työkalun avulla. TOPAS kerää ja tallentaa prosessin mittaustietoja. Liitteen 10 signaalien lisäksi kirjataan ylös säätösauvojen tietoja, hätädieseileiden esilämmitykset, tasasuuntaajien tilat sekä rakennustekniikan osalta palojärjestelmän, valaistuksen ja hätäsähkön tilat. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

Kun on varmistettu, että laitos on määritellyssä alkutilanteessa, odotetaan kaksi tuntia prosessin tasapainottumista. Kun on todettu, että laitoksen parametrit ovat tasapainossa, voidaan aloittaa mittaukset. Ensin varmistutaan, että reaktorin lämpöteho on tasapainossa ja halutulla tasolla ohjeen CWS31 mukaan. Mittausaika on 20 min ja mittausväli  $\leq 5$  s. Jos reaktorin lämpöteho ei ole vaaditun mittaustoleranssin sisällä, reaktoritehoa pitää säätää ja aloittaa mittaus alusta. Mittauksen lopussa kerätään liitteessä 10 esitetyt binäärisignaalitiedot uudestaan. Viimeisenä vaiheena on kerätä TOPAS- järjestelmästä varsinaiset mittaustiedot ja niistä keskiarvot. Taulukossa 6 on esitetty mittaustiedot, jotka tallennetaan. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

Taulukko 6. Tallennettavat mittauksiedot. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

<b>KKS Tunnus</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Yksikkö</b>
3 0JSB00 FJ610X XQ61	Reaktorin lämpöteho	%
3 0JSB00 FE721X XQ60	Generaattoriteho	MW
3 0MKA01 CE903A XQ01	Generaattorin pätotheho	MW
3 0MKA01 CE004A XQ01	Generaattorin loisteho	MVar
3 0ACA00 CE003 XQ01	Pätotheho	MW
4 0ACA00 CE003 XQ01	Loisteho	MVar
3 0MKY10 DE503 ZQ01	COS PHI	
3 0MKA01 CE005A XQ01	Generaattorin taajuus	Hz
3 0MKA01 CE002A XQ01	Generaattorin virta L1	kA
3 0MKA01 CE002B XQ01	Generaattorin virta L2	kA
3 0MKA01 CE002C XQ01	Generaattorin virta L3	kA
3 0MKA01 CE001A XQ01	Generaattorin jännite L1-L2	kV
3 0MKA01 CE001B XQ01	Generaattorin jännite L2-L3	kV
3 0MKA01 CE001A XQ01	Generaattorin jännite L3-L1	kV
3 0ACA00 CE005 XQ01	KJ kiskon taajuus	Hz
3 0ACA00 CE002A XQ01	KJ kiskon virta L1	kA
3 0ACA00 CE002B XQ01	KJ kiskon virta L2	kA
3 0ACA00 CE002C XQ01	KJ kiskon virta L3	kA
3 0ACA00 CE001A XQ01	KJ kiskon jännite L1-L2	kV
3 0ACA00 CE001B XQ01	KJ kiskon jännite L2-L3	kV
3 0ACA00 CE001C XQ01	KJ kiskon jännite L3-L1	kV
3 0BBT01 CE003 XQ01	Laitosmuuntajan pätotheho	MW
3 0BBT01 CE004 XQ01	Laitosmuuntajan loisteho	MVar
3 0BBT01 CE002B XQ01	Laitosmuuntajan virta L2	A
3 0BBT02 CE003 XQ01	Laitosmuuntajan pätotheho	MW
3 0BBT02 CE004 XQ01	Laitosmuuntajan loisteho	MVar
3 0BBT02 CE002B XQ01	Laitosmuuntajan virta L2	A
3 0PAB01 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila	°C
3 0PAB21 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 0PAB22 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 0PAB23 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 0PAB24 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 0PAB25 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 0PAB26 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C

### 3.4 Tulosten tarkastelu

Ensin lasketaan tulokset jokaisella tehotasolla erikseen 50 %, 90 % ja 100 %.

- Lasketaan reaktorin lämpöteho perustuen ohjeeseen CWS31: (Secondary Heat Balance commissioning worksheet CWS31)
  - $W_{th}$  [ $MW_{th}$ ]
- Kirjataan ylös keskiarvot mittaussjakson aikana meriveden lämpötilalle sekä tehokerroimelle:
  - Meriveden lämpötila (3 0PAB01CT001 XQ01) [ $^{\circ}C$ ]
  - Tehokerroin (3 0MKY10DE503 XQ01) [ $\cos \Phi$ ]
- Kirjataan keskiarvo generaattoriteholle mittausten aikana:
  - 3 0JSB00FE721X XQ60 (GEN POWER) [ $MW_e$ ]
- Seuraavaksi kirjataan omakäyttömuuntajille BBT01 sekä BBT02 menevä sähköteho:
  - 3 0BBT01 CE003 XQ01 [ $MW_e$ ]
  - 3 0BBT02 CE003 XQ01 [ $MW_e$ ]
  - $P_{omakäyttö} = BBT01 + BBT02$  [ $MW_e$ ]
- Lasketaan korjattu sähköteho käyttämällä apuna liitteen 7,8 ja 9 korjauskäyriä.
  - $\Delta P$  (tehokertoimen korjaus) [ $MW_e$ ]
  - Jäähdytysveden lämpötilan korjauskerroin  $K$
  - $W = (P_{gen} + \Delta P) \cdot (1 + K \cdot 10^{-2}) = [MW_e]$  (2)
- Lasketaan  $NRO$  arvo jokaisella tehotasolla:
  - $W_{NRO} = W - P_{L,BAT} - P_{L,BAA} - P_{omakäyttö}$  [ $MW_e$ ] (3)
- Jossa,  $P_{L,BAT}$  on päämuuntajan häviö, sekä  $P_{L,BAA}$  on häviöt sähkön siirtokiskossa BAA. (TI power transmission system, 2021).

- $P_{L,BAT,50\%} = 1,553\text{MW}$
  - $P_{L,BAT,90\%} = 3,653\text{MW}$
  - $P_{L,BAT,100\%} = 4,365\text{MW}$
  - $P_{L,BAA,50\%} = 0,208\text{MW}$
  - $P_{L,BAA,90\%} = 0,674\text{MW}$
  - $P_{L,BAA,100\%} = 0,833\text{MW}$
- Lasketaan lämpökapasiteetti  $HR$  eri tehotasoilla:
- $$HR = \frac{W_{th-3600}}{W_{NRO}} = \left[ \frac{kJ}{kWh} \right] \quad (4)$$
- Lopuksi lasketaan ominaislämmönkulutus  $MHR$  kaavan 1 mukaan, sekä laitoksen nimellissähköteho  $NRO$ , sekä vertaillaan tuloksia kokeen hyväksymiskriteereihin.

Liitteissä 11 ja 12 on esitettyä näyttökuvat sähköjärjestelmästä, sähköjakelusta laitokselle sekä valtakunnan verkkoon sekä generaattorin toimintapisteestä. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

## 4. Laitosmittaukset OL1- ja OL2-laitoksella

Mirva Pirinen on tehnyt diplomityön TVO:lle vuonna 2008. Työn aiheena on ollut ”laitosmittaukset turbiinilaitoksen suorituskyvyn seurantaan ydinvoimalaitoksen vuosihuoltojen yhteydessä”. Työssä on tuotu hyvin esille mittausten tarpeellisuus, sekä perusteet mittausten tekemiselle. Diplomityössä kehitettiin laitosmittausrutiini ennen ja jälkeen vuosihuollon. Ensimmäiset mittaustulokset löytyvät TVO:n tiiminetistä samalta vuodelta, jolloin esimerkkimittaukset tehtiin. Pirinen esitti diplomityössään mittausten suorittamisen, tulosten laskentaa ja tarkastelua sekä raportointia. Standardit, jotka pohjautuvat höyryturbiinien sekä lämmönsiirtimien vastaanottokokeisiin, ovat olleet pohjana luodulle mittausrutiinille. Mittauksista kehitettiin kuitenkin vastaanottokokeita kevyempi ja yksinkertaisempi mittaus, joka kuitenkin olisi riittävä antamaan luotettavaa tietoa vuosihuollon vaikutuksesta prosessiin. Kerätyn mittausdatan perusteella määriteltiin mm. prosessin lämpötase, prosessivuodot, mittapisteiden epävarmuudet sekä ajankohtaiset tunnusluvut. Vuosittain voidaan vaihdella tarkastuspisteitä, jolloin saadaan laaja-alaisempaa tietoa, prosessin tilasta (Pirinen, Mirva. 2008).

Pirisen diplomityön pohjalta on TVO:lle kehittynyt mittausrutiini sekä sisäiset ohjeet liittyen esivalmisteluihin, mittausten suorittamiseen, laskentaan ja raportointiin. Ohjeistus on luotu helpottamaan mittausta sekä harmonisoimaan eri vuosina tehtyjä mittauksia, jotta tuloksia voidaan verrata keskenään. (TVO Oyj. 2021i).

Tässä kappaleessa on tarkoitus käydä mittausrutiinia läpi ja nostaa esiin pääperiaatteita. Tarkoitus on myös nostaa esiin hallinnollisia menettelyitä, jotka ovat olennainen osa ydinvoimalaitoksen käyttötoimintaa. Tässä työssä pohditaan, miten käytössä olevaa mittausrutiinia voidaan soveltaa OL3- laitoksella. Laitosmittausrutiinia ja raportointia on tarkoitus tulevaisuudessa suoraviivaistaa sekä kehittää. Tämä on hyvä pitää mielessä, kun suunnitellaan kyseistä mittausrutiinia OL3- laitokselle.

## 4.1 Esivalmistelut

Mittausten esivalmistelut tulee tehdä hyvissä ajoin ennen varsinaisia mittauksia ja ne voidaan jakaa seuraaviin työvaiheisiin:

- Selvitetään ja sovitaan sopiva mittausajankohta
- Tarkastetaan koeohjelma
- Tehdään käyttömääräin
- Informoidaan vastuuhenkilöitä
- Tarkastetaan mittapisteiden ajantasaisuus

Laitosmittaukset tehdään ennen ja jälkeen vuosihuollon. Ajankohta riippuu Coast-down ajon alkamisesta. OL1- ja OL2- laitoksella käytetään venytysajosta termiä Coast-down. Mittaukset tulee tehdä ennen Coast-Downin alkamista, eli 100 %:n teholla. Coast-down alkamisen ajankohdan määrittelevät reaktorifyysikot. Tämän lisäksi tulee ottaa huomioon sopiva meriveden lämpötila, joka saisi olla mahdollisimman sama mittauksissa ennen ja jälkeen vuosihuollon. Myös henkilökunnan työkuorma tulee ottaa huomioon ajankohdan päättämisessä. Mitä lähemmäksi vuosihuollon ajankohta tulee, sitä suuremmaksi kasvaa henkilökunnan työkuorma. Ylösajon jälkeiset mittaukset tehdään, kun on päästy 100 %:n teholle ja tarvittavat kalibroinnit on tehty. Käyttöjaosten päälliköille esitetään sopivaa ajankohtaa ja he ottavat huomioon mm. määräaikaiskokeet ja päättävät sopivan ajankohdan sen mukaan. (TVO Oyj. 2021i).

Koeohjelmat, jotka tarkastetaan ennen laitosmittauksia:

- Laitosmittaukset ennen vuosihuoltoa, Olkidoc 126464
- Laitosmittaukset vuosihuollon jälkeen, Olkidoc 126680

Koeohjelmista tarkastetaan ajantasaisuus sekä otetaan huomioon edelliset mittaukset ja käytönaikaiset havainnot. Koeohjelmien mukaiset käyttömääräimet, tehdään koeohjelmien mukaan käytönsuunnitteluinsinöörin toimesta. Laitosmittauksista informoidaan seuraavia:

- Käyttöpäällikkö
- Käytön jaospäällikkö
- Käyttömääräimistä vastaava käytönsuunnitteluinsinööri
- Laboratorion näytteenottomittauksista vastaava laboratorioanalyytikko
- Käytön seurannasta vastaava käytönsuunnitteluinsinööri
- Prosessityöryhmä

Tulosten laskentaa varten kerätään PMS-järjestelmään (prosessitietokonejärjestelmä) tallennetuista prosessimittauksista tarvittavat tiedot mittapisteistä. Mittapisteet on jaettu seitsemään listaan. Suluissa on haettavan datan aikayksikkö.

- Stabiilisuustarkasteludata (10sek)
- Epävarmuustarkasteludata (10sek)
- Pinnankorkeusdata (1 min)
- Mittapisteet1 (1 min ja h)
- Mittapisteet2 (1 min ja h)
- Mittapisteet3(1 min ja h)
- Mittapisteet4 (1 min ja h)



Laskentadataa ja laskennan suorittamista varten on luotu erilliset listat laskentaan liittyviä Excel-pohjia varten. Stabiilisuustarkasteludata -listaan on koottu mittapisteet, joita tarvitaan kelpoisuustarkastelun tekemiseen. Epävarmuustarkasteludata- listaan on koottuna mittapisteitä, joita tarvitaan epävarmuustarkastelussa. Mittapisteille 1–4 tallennettuja tuntidatoja käytetään Excel- pohjaiseen laskentaan. Mittapisteille 1–4 tallennettuja minuutin hetkellisarvoja otetaan PMS:tä vain jos tehdään mahdollisia ja tarkempia lisätarkasteluja. (TVO Oyj. 2021i).

## 4.2 Mittausten suorittaminen

Mittausten suorittaminen on kuvattu tarkemmin koeohjelmissa:

- Laitosmittaukset ennen vuosihuoltoa, Olkidoc 126464
- Laitosmittaukset vuosihuollon jälkeen, Olkidoc 126680

Edellytyksenä mittauksille on, että laitos on 100 %:n teholla, eikä laitoksella ole häiriöitä tai vikoja, jotka vaikuttavat mittauksiin. Lisäksi voimalaitoksen prosessi on eristetty. Eristyksellä tarkoitetaan laboratorion näytteenottovirtauksen sulkemista, lauhduttimen lisävedenoton sulkemista ja tankkien 352T1 sekä 452T1 tyhjentämistä. Lisäksi tarkastetaan koeohjelmassa luetellut hälytykset, venttiilien kiinniasennot sekä lämpötilamittaukset. Laboratorio-mittauksia, joita ei voida sulkea, mitataan laitosmittauksen aikana laboratoriohenkilökunnan toimesta vuotolaskentaa varten. Mittausten aikana lauhduttimeen ei saa ottaa lisävettä, joten lauhduttimeen otetaan tarvittava lisävesi ennen stabilointijakson alkamista. Wet-well jäädytetään ja sen pinta lasketaan sellaiselle tasolle, ettei mittausten aikana tule jäähdytys- tai tyhjennystarvetta. Lisäksi mittausten aikana ei suoriteta lauhteenpuhdistusmassojen vaihtoa. (TVO Oyj. 2021i).

Ennen vuosihuoltoa tehtävässä mittauksessa on kolme kahden tunnin mittausjaksoa. Ensimmäinen ja kolmas mittaus tehdään välitulistus säädettynä ajomarginaaliin. Keskimäinen

mittaus tehdään välitulistin täysin auki. Vuosihuollon jälkeen tehdään kaksi kahden tunnin mittausjaksoa, joista toisessa välitulistus on täysin auki ja toisessa säädettyä ajomarginaaliin. Keskenään vertaillaan niitä mittauksia, joissa on välitulistin auki sekä mittauksia, jossa se on säädettyä ajomarginaaliin. Jokaista mittausjaksoa edeltää kahden tunnin stabilointijakso, jonka aikana ei tehdä muutoksia prosessiin. Myöskään mittausjakson aikana, ei sallita muutoksia prosessiin. Mittausjakson aikana tulostetaan prosessikaavioita varmuudeksi laitostapahtumista. Mittausten jälkeen mittapisteiden tiedot kerätään ja tallennetaan Excel-formaatissa. (TVO Oyj. 2021i).

### 4.3 Laskenta

Laitosmittauksissa tarkasteltavana olevat tunnusluvut määritetään saatujen mitattujen suureiden pohjalta laskentana, joka tehdään Excel- pohjaisena. Laskennassa on pohjana kolme Excel-tiedostoa:

- Stabiilisuustarkastelu
- Laskenta
- Epävarmuus

Stabiilisuustarkastelulla tarkastellaan mittausdatan käytettävyyttä sekä kerätyn datan soveltavuutta laskentaan ja analysointiin. Varsinaiset tulokset käsitellään Laskenta- pohjalla. Epävarmuus- laskentapohjaa taas käytetään selvittämään, miten suuri epävarmuus sisältyy laskennassa määritettyyn generaattoritehoon. Stabiilisuustarkastelussa tarkastellaan stabiilisuutta ensisijaisesti turbiinistandardissa IEC 60953-3:2001 esitettyjen, seurattaville muuttujille asetettujen raja-arvojen perusteella. Lisäksi seurataan mittausjakson vaihtelua syöttöveden esilämmittimien standardin ASME PTC12.1–2015 sekä kosteudenerottimilla varustettujen välitulistimen standardin ASME PTC12.4-1992 mukaisesti. (TVO Oyj. 2021i, IEC 60953-3, ASME PTC12.1–2015, ASME PTC 12.4-1992).

Laskenta- Excelissä olevat välilehdet on esitetty liitteessä 13. Laskennan Excel-taulukon välilehdet on avattu tarkemmin asiakirjassa 139842. Laskennan taustaa on esitetty Pirisen Diplomityössä. Myös epävarmuustekijöiden tarkempi selvitys laskennasta, joka perustuu tilastollisiin menetelmiin, löytyy Pirisen Diplomityöstä. (TVO Oyj. 2021i).

#### 4.4 Raportointi

Laitosmittauksista tehdään kaksi raporttia. Ennen vuosihuoltoa tehtävistä mittauksista tehdään pikaraportti. Pikaraportti on tarkoitus tehdä mahdollisimman viipymättä ja saada nopeasti tietoa käyttöjakson aikana tapahtuneista mahdollisista muutoksista sekä niiden mittakaavasta. Pikaraportin tehtävänä on antaa vastaus kysymykseen ” muuttuiko käyttöjakson aikana mikä ja minkä verran”? Pikaraportin on tarkoitus valmistua viikon kuluessa mittauksista. Lisäksi voidaan saada esiin sellaista dataa, jota voidaan käyttää vielä hyväksi tulevaa vuosihuoltoa silmällä pitäen. Pikaraportin avulla voidaan analysoida mm. tarvetta mittalaitteiden tarkistuksille tai kalibroinneille. Pikaraportissa esitetään mm. arvio prosessin tilasta, generaattoriteho, säätökammion paine, höyrykiikku sekä mittausdatan kelvollisuus ja virheelliset mittaukset. Pikaraportin tuloksia verrataan edellisen vuoden mittautuloksiin. Mittauksessa havaitut poikkeamat, virheet tai venttiilivuodot tuodaan raportissa esiin ja informoidaan laitevastaavia. (TVO Oyj. 2021i).

Laitosmittausraportti taas koostuu ennen ja jälkeen vuosihuollon tehtävien laitosmittausten tuloksista. Laitosmittausraportin tarkoituksena on vastata kysymykseen ”Muuttuiko vuosihuollon aikana mikä ja minkä verran”? Eli tässä verrataan ennen vuosihuoltoa mitattuja ja laskettuja tiettyjä tunnuslukuja ja mittausten arvoja vuosihuollon jälkeen mitattuihin ja laskettuihin tunnuslukuihin ja arvoihin. Laitosmittausraportissa esiin tuotuja tunnuslukuja ja tarkastelun kohteita voidaan vaihdella eri vuosina ja tarkastelun painopistettä vaihdella, jolloin saadaan mahdollisimman kattava kuva prosessin tilasta. Liitteessä 14 on esitetty laitosmittausraportissa olevat tyypilliset asiat. (TVO Oyj. 2021i).

## 5. Ydinvoimalaitoksen suorituskykytestit ja suorituskyvyn valvonta

Ydinvoimalaitoksen suorituskykymittaukset ovat osa laitoksen kunnonvalvontaa, eliniänhallintaa, tuotantotaloutta sekä töiden hallintaa. Suorituskykymittaukset tukevat kaiken kaikkiaan laitoksen käyttöä, kunnossapitoa sekä päätöksentekoa liittyen laitoksen ylläpitoon ja kehittämiseen. Ydinvoimalaitoksen suorituskykyä valvotaan myös rutiinitoimenpiteillä jatkuvana monitorointina. Käyttöhenkilökunta valvoo laitoksen parametrejä prosessivalvonnan kautta ja lukee säännöllisesti trendinäytöltä muutoksia laitoksen prosesseissa. Käyttövuoron käyttömiehet raportoivat kentällä esiin tulleista poikkeamista. Raportoidut poikkeamat käynnistävät vianselvitysprosessin laitoksella. Käyttöhavainnot tekevät kaikki laitoksella työskentelevät. Prosessinäytöille tulee hälytys poikkeamista prosessissa. Nykyaikainen automatisoitunut ja digitalisoitunut tekniikka, jota on käytössä myös OL3- laitoksella antaa hyvät mahdollisuudet valvoa laitoksen suorituskykyä myös muuten kuin erikseen tehtävillä takuu- tai suorituskykymittauksilla.

Ydinvoima-alalla on laaja-alaista yhteistyötä voimalaitosten omistajien välillä ja tärkeä osa alan elinvoimaa on käyttökokemuksista oppiminen ja tiedon jakaminen operaattorien välillä. Monesti tämä liittyy turvallisuuteen liittyvien asioiden jakamiseen. Yhtä lailla tämä koskee laitoksen ylläpitoon liittyvää tietoa ja osaamista, jolla valvotaan laitoksen käyttöä, kunnossapitoa sekä laitoksen suorituskykyä. Tässä kappaleessa tuon esiin näkökulmia muualta maailmasta kuin Olkiluodosta, liittyen laitoksen kunnonvalvontaan, suorituskykyyn sekä testeihin, joilla suorituskykyä valvotaan.

Laitoksen hyötysuhteesta on tärkeää huolehtia. Ydinvoimalaitoksen teho on suuri ja pienetkin muutokset prosessissa voivat vaikuttaa vuositasolla suuresti energiantuotannon määrään. Huolehtimalla ydinvoimalaitoksen suorituskyvystä voidaan edesauttaa vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannossa ja sitä kautta pienentää hiilidioksidin määrää, joka vapautuisi ilmakehään vaikuttaen ilmaston lämpenemiseen. Vastuullinen energiantuotanto on huolehtimista laitoksen hyötysuhteesta, ja ydinvoima tulee olemaan tämän päivän tiedon valossa osa vastuullista energiantuotantoa myös jatkossa.

## 5.1 Höyryturbiinin testaus ja valvonta

Höyryturbiinien testaus voimalaitoksissa koostuu tyypillisesti seuraavista testiohjelmista:

- ASME PTC (The American Society of Mechanical Engineers Power Test code)
  - Full scale PTC 6 Steam Turbines (ASME PTC 6-2004:2006)
  - Alternative PTC 6 Steam Turbines (ASME PTC 6-2004:2006)
  - PTC 6S Station type testing (ASME PTC 6S Report-1998:2003)
- DIN Test Code (DIN 1943:1975)
- International Electrotechnical Commission (IEC) Doc. A, IEC Doc B (IEC 953-1:1990, IEC 60953-2:1990, IEC 60953-3:2001)

Näissä standardeissa on määritelty ohjeet ja vaatimukset takuukokeille sekä suorituskyvyn valvontaan. Standardit on kehitetty vuosien aikana yhteistyössä sekä turbiinivalmistajien, että laitosten käyttäjien kanssa. ASME PTC 6 sarja on yleisin käytössä oleva standardi turbiinien testauksessa. Jatkuva suorituskyvyn monitorointi on tärkeää myös tehonkorotusten suunnittelussa, antaen lisätietoa siitä mitä potentiaalia prosessissa on. ASME PTC 6 sisältää lisäksi standardeja myös erillisille komponenteille kuten lauhduttimelle. ASME PTC 6 sisältää ohjeet testin tekemiseen, datan analysointiin, korjauksien tekemiseen ja mittauksiin, sekä testiin liittyviin epävarmuuksiin. Suorituskykymittaus tuottaa dataa määrittelemään esimerkiksi ominaislämmönkulutusta, sähkötehoa, komponenttien painehäviöitä, höyryn ja veden virtauksia jne. Suorituskykymittauksen dataa voidaan käyttää mm.

- Varmistamaan että sopimusehdot/ takuut tulevat täytetyksi.
- Osoittamaan että komponenttien suorituskyky pysyy ja muutokset tulevat näkyväksi, myös vuosihuollon tai muiden testien yhteydessä.

- Havaitsemaan muutokset höyrynsiirrossa (korroosio, kerrostumat jne.) jolloin kohdat voidaan paikallistaa sekä korjata kustannustehokkaasti
- Suositusten tekemiseen liittyen kunnossapitoon sekä määrittämään mitkä osat järjestelmässä vaikuttavat suorituskyvyn heikkenemiseen.

Höyryturbiinin ominaislämmönkulutus on parametri, jota käytetään yleisesti määrittelemään termistä suorituskykyä höyryturbiinille ja vesi-/ höyrypiirille. Ominaislämmönkulutuksen määrittämiseksi pitää määritellä tarvittavat mittaukset (paineet, lämpötilat, virtaukset ja sähkötehot). Ominaislämmönkulutus riippuu vahvasti olosuhteista ja monien laitteiden suorituskyvystä. Siksi on tärkeää ottaa huomioon korjauskertoimet, jotta voidaan vertailla eri aikoina tehtyjä mittauksia keskenään sekä tehdä niistä oikeita päätelmiä. ASME 6 PTC- standardissa on esitetty korjauskertoimet sekä höyry- vesipiirille, että höyryturbiinille.

Täyden mittakaavan ASME 6 PTC testissä käytetään tarkkuusmittauksia sekä tarkkoja mittausohjeita. Kun standardia käytetään sopimusehtojen täyttämiseksi, mittauksen epävarmuus halutaan mahdollisimman pieneksi. Tässäkin testissä pitää ottaa huomioon olosuhteista aiheutuvat korjauskertoimet, jotka on erikseen määritelty.

Vaihtoehtoinen testi on osa ASME PTC6-2004 standardia. Se on vaihtoehto täyden mittakaavan testille, kuitenkin vaikuttamatta liikaa mittaustarkkuuteen. Erona on, että tarvittavien tarkkuusmittausten lukumäärä on pienempi ja siten mittauksen kustannukset pienemmät. Toisena erona on primäärivirtausmittauksen sijainti. Korjauskertoimet tai korjauskäyrät ovat yksinkertaisempia vaihtoehtoisessa mittauksessa. Sekä täyden mittakaavan testiä, että vaihtoehtoista testiä käytetään uusien ydinvoimalaitoksen takuumittauksissa. Vaihtoehtoisessa mittauksessa käytetään myös laitoksen omia mittauksia ja se on yksinkertaisempi toteuttaa. Vaihtoehtoinen mittaus on nykyään enemmän käytössä uusille ydinvoimaloille.

ASME PTC 6S standardi on yksinkertaistettu ohje rutiininomaiselle höyryturbiinin suorituskykymittaukselle. Se on kehitetty erityisesti suorituskyvyn monitorointiin. Tämä testi

perustuu enemmän mittauksien toistettavuuteen ja niissä havaittuun poikkeamaan, kuin mittauksen absoluuttiseen virheettömyyteen. Tärkeät mittaukset liittyen PTC 6S mittauksiin:

- Tarkka paine ja lämpötila HP (High Pressure) ja IP (Intermediate Pressure) sisääntulolle
- Lauhduttimen paine
- Generaattoriteho, tehokerroin
- Lauhde- tai syöttövesivirtaus
- Paine ja lämpötila syöttövettä lämmittävissä väliotoissa
- Syöttöveden lopullinen lämpötila ja paine
- Lauhduttimen hotwellin lämpötila

Tässä mittauksessa on huomioitava, että mittauksen luotettavuuden lisäämiseksi tulee vuodot eristää prosessista virtausmittauksen ja turbiinin sulkuventtiilien välillä.

Edellä mainittujen mittausten ja kokeiden lisäksi on olemassa ulostulon kapasiteettitesti, joka eroaa siinä, että primäärivirtausmittausta ei vaadita vaan määritetään höyryvirtaus turbiinille.

Ydinvoimalaitoksen ero esimerkiksi kivihiiuvoimalaitokseen on siinä, että höyryn ominaisuudet ovat erilaiset. Ydinvoimalaitos tarvitsee paljon suuremman höyryvirtauksen, jotta se voi saavuttaa halutun tehotason. Korkeapaineturbiinille menevä höyry on kylläistä ja höyrynkosteus aiheuttaa häviöitä ja haasteita lämpötilan mittaukselle. Korkeapaineturbiinin jälkeen tarvitaan kosteudenerottimet sekä välitulistimet poistamaan kosteus höyrystä, jotta kosteus ei aiheuta eroosiota matalapaineturbiinille.

Jotta varmistetaan jatkuva hyvä suorituskyky turbiinilaitokselle, jatkuva suorituskykymitaus on yleistä. Ydinvoimalaitoksella on suhteellisen helppoa määrittää missä kohtaa prosessissa on tapahtunut heikkenemistä. Ydinvoimalaitoksia ajetaan normaalisti tasaisella tehoajolla. Kun generaattorin teho korjataan korjauskertoimien avulla, voidaan nähdä nopeasti, onko laitoksen heikentymistä tapahtunut. Korjauskertoimista löytyy esimerkkejä OL3-laitoksella käytettävistä korjauskertoimista liitteistä 7,8 ja 9. Niiden käyttö on kuvattu käyttöönoton D4-vaiheen aikana tehtävässä suorituskykytestissä sekä takuukokeessa (kappaleet 3 ja 6). OL3-laitoksella säätö tapahtuu generaattoritehoa säätämällä. Muutos hyötysuhteessa näkyy suoraan reaktoritehossa. Seuraavia mittauksia tarvitaan rutiininomaiseen suorituskyvyn seurantaan:

- Generaattoriteho
- Syöttövesivirtaus
- Syöttöveden lämpötila
- Syöttöveden paine
- Höyrynpaine
- Höyryn lämpötila
- Turbiinin ulostulolämpötila
- Turbiinin säätöventtiilien asennot

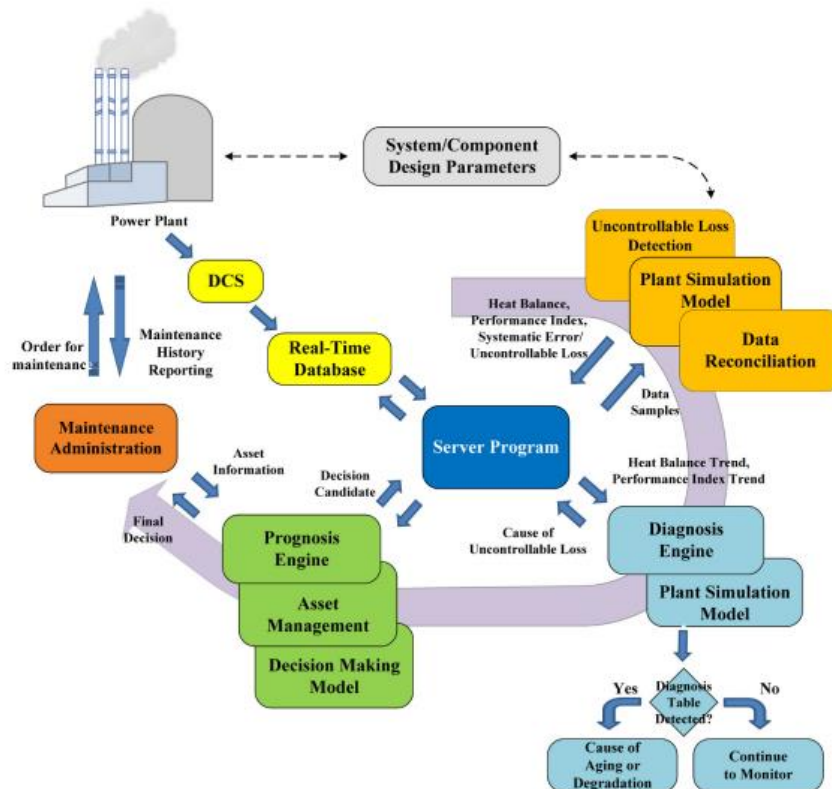
Yleisesti voidaan sanoa, että turbiinilaitoksen testaus tuottaa tärkeää tietoa sekä laitoksen omistajalle, että toimittajille ja valmistajille. Laaja-alainen testaaminen on mahdollista ja sekä laitoksen, että komponenttien testaamiseen on olemassa erilaisia testejä. Tulevaisuudessa potentiaalinen vaihtoehto on prosessista saatava valmiiksi käsitelty ja analysoitu reaaliaikainen data, joka antaa tarkempaa tietoa turbiinin suorituskyvystä, komponenttien elinikästä, käytettävyydestä ja tukea kunnossapidon suunnitteluun. Reaaliaikainen data tukee päätöksentekoa ja ohjaa laitoksen käyttötoimintaa enemmän yksilöidyksi niin, että ympäristön vaatimat tarpeet otetaan paremmin huomioon. Esimerkiksi laitoksen ylösajo tai alasajo



voidaan tehdä vähemmän aggressiivisesti, jos halutaan lisätä tärkeiden komponenttien elinikää. Vastaavasti voidaan lisätä laitoksen tehonsäätöominaisuuksia ja kykyä tehdä nopeampia tehon muutoksia lisäten räsästä komponenteille. (Tanuma, 2017.)

## 5.2 Ydinvoimalaitosten lämpöteknisen tehokkuuden valvonnan, diagnoosin sekä ennusteiden sovellus

Informaatioteknologian käytön lisääntyminen on edesauttanut tehokkaasti CBM:n (Condition-Based Maintenance) käyttöönottoa voimalaitoksilla. Suorituskykykokeet, jotka tehdään teollisten koodien tai standardien mukaan, voivat tuottaa luotettavaa tietoa, mutta niiden tekeminen vaatii resursseja ja ne voivat antaa tietoa enemmän menneestä kuin tulevasta. Jos voidaan tehdä oikea-aikaista suorituskyvyn monitorointia nykyaikaisilla data-analyysiteknikoilla, voidaan saavuttaa paremmin optimoitua käyttöä ja kunnossapitoa. Hyeonmin, Man, Gyunyoung, (2014) julkaisemassa artikkelissa on kerrottu raamit sekä kuvattu siihen liittyviä metodologeja paikan päällä tehtävään suorituskykyanalyysiin, joka eroaa tavanomaisesta suorituskyvyn valvonnasta. Ohjeet on tehty suorituskyvyn valvontaan ja hallintaan erityisesti ydinvoimalaitoksille, joissa on suuri höyryturbiini. Artikkelissa tuodaan esiin ero suorituskyvyn valvonnan ja suorituskykytestin välillä. Muutokset suorituskyvyssä tulevat paremmin esiin säännöllisessä valvonnassa, kun taas absoluuttisesti oikea mittaustulos saadaan aikaan standardien mukaan tehtävässä mittauksessa. Laitoksella tehtävän lämpöteknisen suorituskyvyn valvonnan prosessi ja kehys on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Laitoksella tehtävän lämpöteknisen suorituskyvyn valvonnan prosessi ja kehys (Hyeonmin, Man, Gyunyoung, 2014).

Kyseisessä artikkelissa esitetty kehys sekä metodit ovat käytössä jo monessa Etelä-Korealaisessa ydinvoimalaitoksessa sekä fossiilisessa voimalaitoksessa. Metodit ovat yleisesti sovellettavia mutta joissain tapauksissa niitä pitää yksilöidä kyseessä olevalle voimalaitokselle. Tärkeimpänä tekijänä tuotiin esiin, että on riittävästi luotettavia ja tarkkoja mitta-antureita. Tärkeimmissä mittauksissa tulisi olla redundanttiset mittauslaitteet. Seuraavaksi tärkein tekijä on teknologia, esimerkiksi mallit, jotka laskevat lämpötaseen aina kyseessä olevissa olosuhteissa. Vaikka laitostoimittajat toimittavat lämpötasediagrammit eri kuormille ja olosuhteisiin, niin koetaan ongelmalliseksi hallita lämpötehon suorituskyvyn analysointia, koska lämpötasemalli, jolla lämpötasediagrammit on tehty, ovat useasti laitostoimittajan omaisuutta. Artikkelin teon aikaan kyseistä konseptia ei ole kansainvälisesti tunnustettu ja sen tulokset voivat vaihdella suuresti riippuen kyvystä kehittää metodologiaa. Artikkelissa suositellaan hallinnollista tukea niin, että se tukee laitoksen suorituskyvyn hallintaa siten, että se jalkautuu päivittäiseksi käytännöksi. Yhtenä tärkeänä asiana tuotiin esiin, että sen sijaan että etsitään parasta suorituskyvyn hallinnan ratkaisua tai sovellusta, kasvatetaan asiantuntijoita,

jotka osaavat tuoda esiin hyötyjä ja haittoja liittyen suorituskyvyn hallintaan juuri kyseessä olevalla laitoksella. (Hyeonmin, Man, Gyunyoung, 2014.)

### 5.3 Kokemukset ja opit liittyen suorituskyvyn valvontaan ja optimointiin

IAEA (International Atomic Energy Agency) on kerännyt kokemuksia ja oppeja maailmalta liittyen suorituskyvyn valvontaan ja optimointiin ja kehittänyt niiden perusteella oman julkaisun, joka on julkisesti saatavissa. Julkaisun tavoitteena on tuoda esiin parhaat käytännöt ja kokemukset, jotka parantava laitoksen hyötysuhdetta ja luotettavuutta. Julkaisu keskittyy lämpöteknisestä suorituskyvystä vastuullisten insinöörien rooleihin ja vastuisiin, sekä vastuullisten insinöörien sidoksista muuhun organisaatioon. (IAEA,2021).

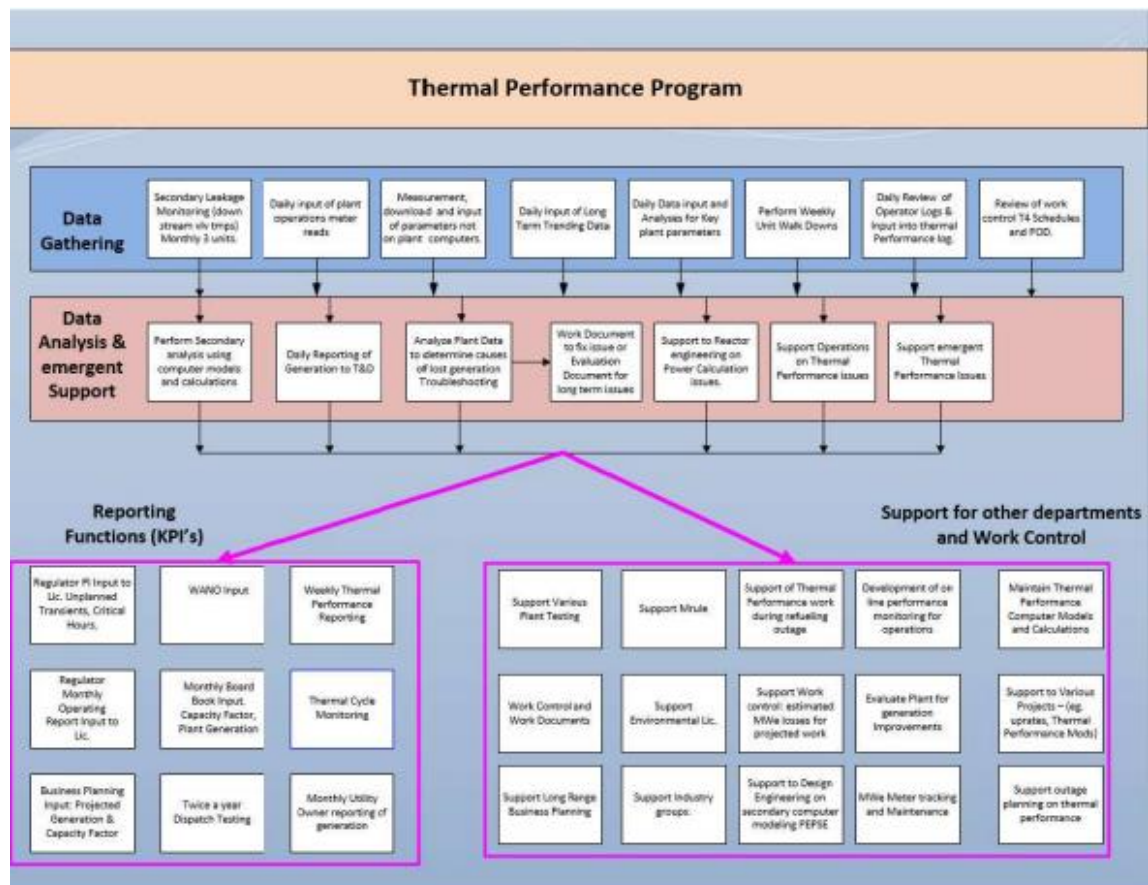
#### 5.3.1 Suorituskyvyn valvontaohjelma

Suorituskyvyn valvomiseksi tulisi olla oma ohjelma, jonka mukaan suorituskykyä valvotaan. Suorituskyvyn valvonta on kokonaisarviointia sähkön tuotannosta ja siihen käytettävän energian suhteesta [kJ/kWh]. Ohjelman perustana on:

- Laitoksen hyötysuhteen parantaminen
- Nostaa sähkötehoa
- Suorituskyvyn nopea palauttaminen
- Aikainen tunnistaminen luotettavuuteen heikentävistä tekijöistä
- Lyhyt takaisinmaksuaika
- Maksimoida alkuperäisen investoinnin tuotto
- Uuden teknologian hyödyntäminen, omaisuusarvon kasvattaminen

Ohjelman takana oleva kehitys vaatii laajaa ymmärrystä laitoksen suunnittelusta, käytöstä, kunnossapidosta, olosuhteista ja termisestä tieteestä.

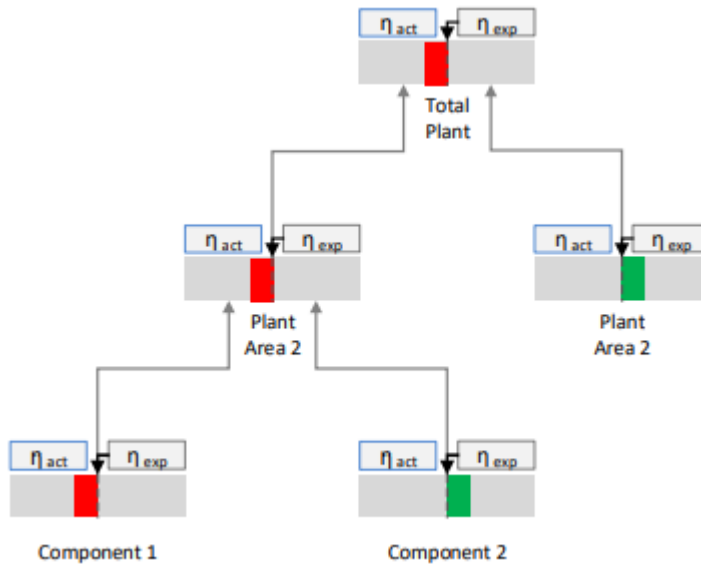
Suorituskyvyn valvontaa on kuvattu eri näkökulmista ja tarkoituksiperistä. Tällaisia ovat esimerkiksi normaali käyttötila, pitkäaikainen suorituskyvyn arviointi, laitoksen verifikaatio-testi, jälkiasennusten vaikutus arviointiin sekä kuormanseuranta laitoksen ajotapana. Raportoinnissa suositellaan tuomaan esiin sitä, että tunnistetaan menetetty sähköteho MWe, korjaavan työn vastuu ja aika jota tehon menetys koskee. Kuvassa 18 on esitetty esimerkki suorituskyvyn valvontaohjelmasta. Päätoimintoina on datankeruu, datan analysointi, raportointitoiminnot ja mittarit, sekä tuki muille osastoille sekä työhallintaan.



Kuva 18. Suorituskyvyn valvontaohjelma. (IAEA, 2021)

Suorituskyvyn arviointia tulisi tehdä päivittäin ja luoda rutiinit sen tekemiseksi. Arviointi voidaan jakaa kolmeen tasoon: ylätasoon, tarkennettuun tasoon sekä komponenttitasoon.

Kuvassa 19. on esitetty tulosten analysointia sekä kolme eri tasoa. Kuvan avulla nähdään, miten laitostason poikkeama voidaan tunnistaa komponenttitasolla.

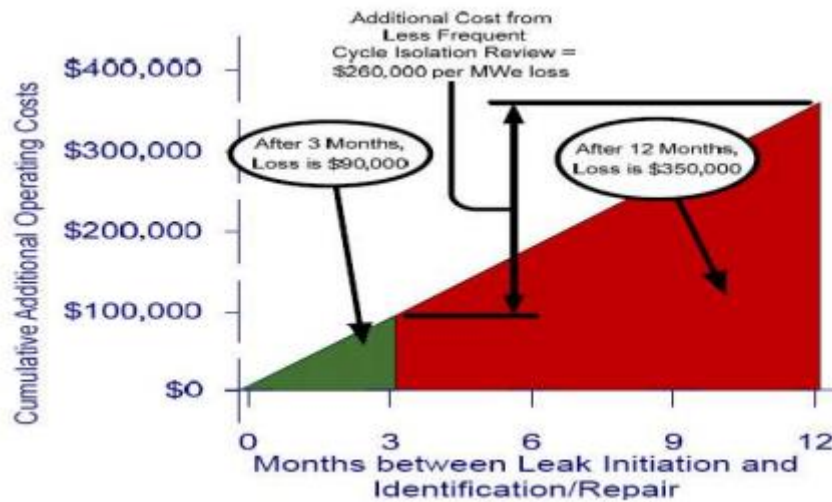


Kuva 19. Suorituskyvyn valvontaohjelma. (IAEA, 2021)

Keskeisiä suorituskykyindikaattoreita ovat kapasiteettikerroin [ $CF$ ], terminen suorituskykyindikaattori [ $TPI$ ] sekä päivittäinen bruttolämpö [ $DGHR$ ].

Valvontaa voidaan tehdä määräaikaikokeina, jatkuvana on-line valvontana, ennen ja jälkeen vuosihuollon tai laitostenmuutoksien. Vuosihuoltojen yhteydessä testi tehdään tyypillisesti 30 päivää ennen ja jälkeen vuosihuollon. Testissä analysoidaan sekä laitoksen suorituskykyä kokonaisuutena, että jokaista komponenttia liittyen sekundääripiiriin.

Yhtenä isona kokonaisuutena julkaisussa käsitellään vuotohäviöitä. Vuotohäviö on suoraan pois sähköntuotannosta ja siten vaikuttaa myös hyötysuhteeseen. Venttiilin sisäistä vuotoa voi olla vaikeaa tunnistaa ja siksi tulee olla menettelyt, joiden avulla valvotaan vuotohäviöitä ja tunnistetaan ne. Kuvassa 20. on havainnollistettu vuotohäviön merkitystä taloudellisuuteen sekä vuotokohteiden tunnistamisen ja korjaamisen merkitystä.



Kuva 20. Vuotohäviön tunnistamisen ja korjaamisen taloudellinen merkitys. (IAEA,2021).

ASME PTC standardia pidetään yleisimpänä testinä määrittäessä suorituskykyä ydinvoimalaitoksissa, kuten toin esiin myös kappaleessa 5.1. Myös Etelä-Korealaisten kehittämää suorituskykydiagnostiikkaa tuodaan esiin yhtenä vaihtoehtoisena metodina. (IAEA,2021).

### 5.3.2 Tärkeimpien komponenttien suorituskyky

Pääkomponenttien suorituskyky voidaan jakaa kahteen osaan. Ydintekniseen höyryntuottojärjestelmään ja sekundääripiiriin. Ydinteknisen höyryntuottojärjestelmän tärkeimpänä tekijänä voi pitää reaktorin lämpötehon mittausta. Toinen tärkeä tekijä on höyrystimien suorituskyky. Reaktorin lämpöteho  $RTP$  lasketaan painevesilaitoksessa seuraavalla kaavalla:

$$RTP = m_{fv} \cdot (h_{ms} - h_{fv}) + m_{bd} \cdot (h_{bd} - h_{fw}) + Q_{misc} - Q_p - Q_{pZR} \quad (5)$$

jossa  $Q_{pZR}$  on paineistimeen tuotu lämpöteho [kJ/h],  $Q_p$  on pääkiertopumppujen tuoma lämpöteho [kJ/h],  $Q_{misc}$  on ympäristön häviöt [kJ/h],  $m_{fw}$  on syöttövesivirtaus [kg/h],  $h_{ms}$  on päähöyryn entalpia [kJ/kg],  $h_{fv}$  on syöttöveden entalpia [kJ/kg],  $m_{bd}$  on höyrystimen ulospuhalluksen massavirta [kg/h] sekä  $h_{bd}$  on ulospuhalluksen entalpia [kJ/kg].

Sekundääripiiriin tuotu lämpöteho  $STP$  lasketaan seuraavasti:

$$STP = m_{fv} \cdot (h_{ms} - h_{fv}) + m_{bd} \cdot (h_{bd} - h_{fw}) \quad (6)$$

Sekundääripiiriin tuodun lämpötehon laskennassa on huomioitava, että se pitää sisällään höyrystimen ulospuhalluksen, mutta ilman lämmön talteenottoa sen sisältämä energia menee hukkaan. OL3- laitoksella otetaan lämpö talteen.

Höyrystimien kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$  määritetään seuraavasti:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_m} \quad (7)$$

$$Q = m_{fv} \cdot (h_{ms} - h_{fv}) + m_{bd} \cdot (h_{bd} - h_{fw}) \quad (8)$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{\ln \left[ \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{cold} - T_{sat}} \right]} \quad (9)$$

jossa  $A$  on höyrystimen lämmönsiirtopinta-ala [ $m^2$ ],  $\Delta T_m$  on logaritminen lämpötilaero [ $^{\circ}C$ ],  $T_{hot}$  on primäärijäähdytteen kuuman haaran lämpötila [ $^{\circ}C$ ],  $T_{cold}$  on primääripiirin kylmän haaran lämpötila [ $^{\circ}C$ ],  $T_{sat}$  on saturaatiolämpötila höyrystimen ulostulopaineessa [ $^{\circ}C$ ].

Lämmönsiirtovastus  $R_f$  lasketaan seuraavasti:

$$R_f = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \quad (10)$$

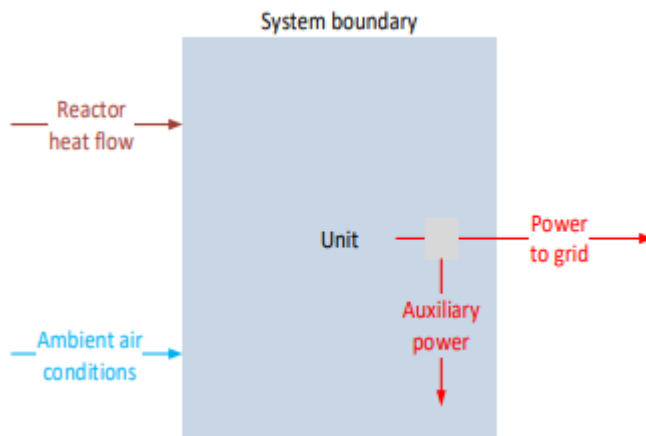
jossa  $U_0$  on lämmönsiirtokerroimen suunnitteluarvo.

Lisäksi tulee seurata seuraavia parametrejä:

- Höyryn paine höyrystimen jälkeen
- Höyryn entalpia höyrystimen jälkeen
- Syöttöveden entalpia ennen höyrystintä
- Höyryn virtaus
- Kuuman haaran lämpötila
- Kylmän haaran lämpötila
- Höyrystimen ulospuhallusvirtaus
- Primääripiirin virtaus

Hyötysuhde on yksi tärkeä indikaattori, kun käsitellään laitoksen kykyä muuntaa polttoaineen sisältämää energiaa sähköenergiaksi. Indikaattorina voidaan käyttää termistä

hyötysuhdetta tai laitostason hyötysuhdetta, mikä kertoo, miten suuri osuus on tuotetun sähkötehon sekä polttoaineesta saatavan lämpötehon välillä. Laitostason hyötysuhdetta arvioitaessa on tärkeää tehdä järjestelmän rajaus huolellisesti. Kuvassa 21 on havainnollistettu rajauksista yksinkertaisen kaavion avulla. Tässä on huomioitava, että kaikki komponentit rajauksen sisäpuolella vaikuttavat omakäyttösähkön määrään ja siten hyötysuhteeseen.



Kuva 21. Järjestelmän rajapinnat (IAEA,2021)

Korjattua bruttotehoa  $P_{gross,meas}$  pidetään parempana indikaattorina, kuin  $MHR$  arvoa arvioitaessa sekundääripiirin suorituskykyä ja se lasketaan seuraavasti:

$$P_{gross,corr} = (P_{gross,meas} + \Delta_{pf}) \cdot \frac{1}{f_1} \cdot \frac{1}{f_2} \cdot \frac{1}{f_3} \cdot \frac{1}{f_{MWt}} \quad (11)$$

Jossa  $P_{gross,corr}$  on korjattu bruttoteho generaattorin jälkeen [kW],  $P_{gross, meas}$  on mitattu bruttoteho generaattorin jälkeen [kW],  $f_1$  on generaattorin tehokertoimen korjauskerroin [kW],  $f_2$  on höyrynpaineen korjauskerroin,  $f_3$  on korjauskerroin MP- turbiinin ulostulopaineelle tai jäähdytysveden lämpötilalle ja  $f_{MWt}$  on korjauskerroin höyrystimien lämpöteholle.

Turbiinin suorituskyvyn valvontaa pidetään haasteellisena. Turbiinin isentrooppista hyötysuhdetta on vaikea valvoa johtuen höyryn kosteudesta. Höyryn paisuntasuhdetta voidaan käyttää yhtenä indikaattorina, jonka avulla voidaan analysoida turbiinin suorituskykyä kokonaisuutena. KP- turbiinin ensimmäisen siiven sekä MP- turbiinin viimeisen siiven



väläinen painesuhde voi vaihdella riippuen höyryn virtauksesta, mutta muiden siipien välillä painesuhteen tulisi olla vakio. Höyryn virtauskerroin  $K_{stg}$  tulee olla vakio riippumatta käyttötilasta.

$$K_{stg} = m_{stg} \cdot \sqrt{\frac{p_{stg}}{v_{stg}}} \quad (12)$$

jossa  $m_{stg}$  on höyryn massavirta turbiinivaiheelle [kg/h],  $p_{stg}$  on höyryn paine turbiinivaiheelle [bar, a] ja  $v_{stg}$  on höyryn ominaistilavuus turbiinivaiheelle.

Kosteudenerottimen tehokkuutta  $\eta_{MS}$  [%] voidaan valvoa seuraavan kaavan avulla:

$$\eta_{MS} = \frac{m_{msdrn}}{m_{csin,steam} \cdot \%M_{csin}} = \frac{m_{msdrn}}{m_{csin,moisture}} \quad (13)$$

jossa  $m_{msdrn}$  on kosteudenerottimen vesivirtaus [kg/h],  $m_{csin, steam}$  on höyryvirtaus kosteudenerottimeen [kg/h],  $M_{csin}$  on kosteudenerottimeen tulevan höyryn höyrypitoisuus [%] ja  $m_{csinmoisture}$  on höyryn sisältämän veden määrä ennen kosteudenerotinta [%].

Välitulistimen suorituskykyä  $TTD_{rht}$  [°C] (Terminal Temperature Difference) voidaan arvioida seuraavasti:

$$TTD_{rht} = T_{heating} - T_{csout} \quad (14)$$

jossa  $T_{heating}$  on lämmittävän höyryn saturaatiolämpötila [°C] ja  $T_{csout}$  on lämmitettävän höyryn poistumislämpötila [°C]. Tässä on kuitenkin huomioitava se, että tämä ei suoraan toimi, jos kyseessä on kaksivaiheinen välitulistus. OL3- laitoksessa on kaksivaiheinen välitulistus. Tällöin voidaan arvioida välitulistimen 2. vaiheen  $TTD$  arvoa suoraan lämmittävän höyryn lämpötilan avulla. On epäkäytännöllistä arvioida 1. vaiheen  $TTD$  arvoa, koska 1. ja 2. vaiheen välissä on harvoin lämpötilamittausta. Välitulistimen suorituskykyä voidaan arvioida myös lämmitettävän höyryn paineen laskun avulla seuraavasti:

$$\% \Delta p_{cs} = \frac{P_{csin} - P_{csout}}{P_{csin}} \quad (15)$$

jossa  $\% \Delta p_{cs}$  on paineenpudotus prosentteina,  $P_{csin}$  on lämmitettävän höyryn paine [bar, a] ja  $P_{csout}$  on lämmitettävän höyryn paine välitulistimen jälkeen [bar,a]. Kuvassa 22 on esitetty esimerkin avulla diagnostiikkaa laskennan sekä mittausten analysoinnissa.

Possible cause of MSR problems	Moisture separator effectiveness	Reheater outlet temp.	Cycle steam press. drop	Moisture separator level	Heating steam flow	Reheater drain temp
MS chevron failure	☒	☒	☒	→		
Excess moisture in the incoming steam MS drain system restrictions	☒	☒	☒	☒		
Reheater tube bundle uplift Reheater bypass due to Shroud buckling		☒	☒			
Reheater tube leaks		☒	→		☒	☒
Reheater drain system leaks Emergency drain valve open or leaking		☒	→		☒	☒
Excessive leak of heating steam drain valve Heating steam flow restrictions on reheater heating steam supply line (supply valves not fully open, dropped valve seat, foreign object damage lodged in valve)		☒	→		☒	☒
Reheater tube fouling		☒	→		☒	→

Kuva 22. Välitulistimen suorituskyvyn arviointia ja diagnostiikkaa (IAEA,2021)

Lauhduttimen suorituskykyä voidaan arvioida lauhduttimen paineen avulla. Sillä on suora vaikutus sähköntuotantotehoon. Lauhduttimen teho voi heikentyä likaantumisen seurauksena tai tuubivuotojen vuoksi, joita sitten joudutaan tulppaamaan. Lauhduttimessa voi olla vuotoja, joiden vuoksi tuubeihin voi kerääntyä kaasua ja siten heikentää lauhduttimen tehoa. Jäähdytysveden lämpötilalla ja virtauksella on myös suora vaikutus lauhduttimen tehoon. Suorituskyvyn arvioinnissa on yleisesti käytössä *CLF*- kerroin (Cleanliness Factor), ja se lasketaan seuraavasti:

$$Q_{meas} = m_{CW} \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1) = \sum_{i=1}^n Q_{in,i} - \sum_{j=1}^n Q_{out,j} \quad (16)$$

jossa  $Q_{meas}$  on lauhduttimen lämpökuorma [kJ/h],  $m_{cv}$  on jäähdytysveden massavirta [kg/h],  $C_p$  on jäähdytysveden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK],  $t_2$  on jäähdytysveden lämpötila lauhduttimen jälkeen [°C] ja  $t_1$  on jäähdytysveden lämpötila ennen lauhduttinta [°C].

$$LMTD = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_s - t_1}{t_s - t_2}\right)} \quad (17)$$

jossa  $LMTD$  on logaritminen lämpötilaero [°C] ja  $t_s$  on saturaatiolämpötila lauhduttimen paineessa [°C].

$$U_{meas} = \frac{Q_{maes}}{A_s \cdot LMTD} \quad (18)$$

jossa  $U_{meas}$  on lämmönsiirtokerroin [ $W/m^2K$ ],  $A_s$  on jäähdytysputkien lämmönsiirtopinta-ala [ $m^2$ ].

$$CLF_{meas} = \frac{U_{meas}}{U_{uc,test} \cdot F_{w,test} \cdot F_M} \quad (19)$$

$F_{w,test}$  on korjauskerroin jäähdytysveden lämpötilalle ja  $F_M$  on korjauskerroin materiaalille.

Korkeapaineisten esilämmittimien suorituskykyä voidaan arvioida *TTD* (Terminal Temperature difference) tai *DCA* (Drain Cooler Approach) avulla seuraavasti:

$$TTD_{htr} = T_{ext,sat} - T_{fwout} \quad (20)$$

jossa  $T_{ext,sat}$  on väliottohöyryn saturaatiolämpötila [ $^{\circ}C$ ] ja  $T_{fwout}$  on syöttöveden lämpötila [ $^{\circ}C$ ] esilämmittimien jälkeen.

$$DCA_{htr} = T_{drn} - T_{fwout} \quad (21)$$

jossa  $T_{drn}$  on lämmittävän veden lämpötila esilämmittimen jälkeen [ $^{\circ}C$ ],  $T_{fwout}$  on syöttöveden lämpötila ennen esilämmitystä [ $^{\circ}C$ ].

Julkaisussa on kuvattuna laaja-alaisesti käytössä olevia metodeja suorituskyvyn valvontaan ja esimerkkien avulla kuvattu eri tekijöiden vaikutusta suorituskykyyn. Julkaisussa on myös tuotu hyvin esiin tulosten analysointia ja diagnostiikkaa, jonka avulla voidaan tuloksia analysoida. (IAEA,2021).

## 6. OL3 Takuumittaus

OL3- laitoksella tullaan tekemään käyttöönoton jälkeen takuumittaus, jossa todetaan, että laitoksen suorituskyky täyttää sille sopimuksessa asetetut tavoitteet. Takuumittaus itsessään ei kuulu laitossopimukseen vaan se tehdään lisätilauksena. Takuumittaus tehdään koeohjelman mukaan. Tässä kappaleessa käydään läpi takuumittaukseen liittyvää koeohjelmaa. Takuumittaus tehdään tarkkuusmittauksilla sekä tarkkojen ohjeiden mukaan ja näin ollen se tulee antamaan mahdollisimman oikean kuvan laitoksen suorituskyvystä. Takuumittaus tulee tehdä 12kk:n sisällä PTO:n (Provisional Take Over) eli kaupallisen käytön aloittamisesta (Kick-off meeting, 2019).

### 6.1 Reaktoripuolen koeohjelma

Varsinaisen koeohjelman on toimittanut Areva ja sillä varmistetaan ja todennetaan että laitos täyttää sille asetetut ehdot ja vaatimukset liittyen suorituskykyyn. Koeohjelma on 295 sivuinen dokumentti ja tässä osiossa käydään läpi olennaisimpia kohtia dokumentista. Tässä työssä on viitattu koeohjelman A revisioon. Takuumittauksessa analysoidaan tuloksia sekä reaktoripuolella että turbiinipuolella. Areva vastaa reaktoripuolen mittauksista ja Siemens turbiinipuolen mittauksista. Tässä kappaleessa on esitetty periaatteet Arevan toimittamalle koeohjelmalle ja kappaleessa 6.2 kerrotaan turbiinipuolen koeohjelmasta. Siemensin koeohjelma on varsinaisen koeohjelman liitteenä. Varsinaisen koeohjelman mukaan sekä Areva että Siemens määrittelevät *NRO*- sekä *MHR*-arvot hieman eri tavalla. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.) Tässä tutkimustyössä käsitellään ensimmäistä versioita koeohjelmasta ja on huomioitava, että koeohjelmaa kehitetään ja siihen tulee muutoksia. Osana lopputyötä olen toiminut työryhmässä, joka kommentoi koeohjelmaa ja osallistuu sen rakentamiseen. Koeohjelmassa näkyy se, että sen avulla todennetaan laitossopimuksessa olevia pykäläiä ja se, että koeohjelman rakentamiseen osallistuu sekä Areva että Siemens, omista lähtökohdistaan. Koeohjelman harmonisointi näiden toimijoiden välillä on koeohjelman kehitystyössä yksi keskeisimpiä

kehityskohteita. Koeohjelmassa on käsitelty myös epävarmuusanalyysi, sekä tarkasteltu yksityiskohtaisesti mittalaitteita ja niiden asennusta.

### 6.1.1 Tavoitteet

Kokeen tavoitteena on tehdä mittaukset reaktori- ja turbiinipuolella liittyen lämpötaseeseen. Mittaukset tehdään samoilla tehotasoilla kuin käyttöönottovaiheessa D eli 50 %:n, 90 %:n ja 100 %:n tehotasolla. Mittaustulosten analysoinnissa tulee ottaa huomioon mittaus- ja standardiolosuhteiden eroavaisuudet, jotka on määritelty laitossopimuksessa. Standardiolosuhteet on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Laitoksen standardiolosuhteet. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

Ilman lämpötila	23°C
Suhteellinen ilmankosteus	70 %
Jäähdytysveden lämpötila komponenttien ja rakennusten jäähdyttämiseen	18°C
Meriveden pinta - min pinta	N60 - 1,60 m
Lauhduttimen jäähdytysveden virtaus	52692 kg/s
Lauhduttimen jäähdytysveden sisäänmenolämpötila	5°C
Generaattorin jännite	27 kV
Generaattorin taajuus	50 Hz
Generaattorin tehokerroin	0,9
Generaattorin H <sub>2</sub> paine	500 kPa
Lisävesivirtaus	0
Ulospuhallusvirtaus	0

Huomiota tulee erityisesti kiinnittää generaattorin tehokertoimeen sekä meriveden lämpötilaan, joilla on suora vaikutus turbiinin ulostulotehoon. Reaktoripuolen ja turbiinipuolen välinen rajapinta tulee ottaa huomioon mittauksissa ja laskennassa. Rajapinta on sovittu olevan höyrylinjassa sekä syöttövesilinjassa, metrin ulkopuolella fyysisestä reaktoripuolen rajapinnasta.

Yleiset säännöt mittauksille pitävät sisällään mm. seuraavia tekijöitä. Laitoksen tulee olla tasaisella tehoajolla ja täyttää mittaukselle ennalta asetetut olosuhdevaatimukset. Ennen jokaista mittausta tehdään alustava kahden tunnin ajo, jossa:

- NSSS (Nuclear Steam Supply System) on hyväksyttävissä olosuhteissa testin tekoon.
- Tehdään käyttöönoton koeohjelmalla CWS31 sydämen lämpötehon laskenta, jolla varmistetaan mittausten stabiilisuus ja kelpoisuus. (Secondary heat balance commissioning worksheet, 2021).
- Laitosteho on toleranssien sisällä:
  - 100 + 0/-0,5 % NP (Nuclear Power)
  - 90 +0,5/-0,5 % NP
  - 50 +0,5/-0,5 % NP
- Tarkastetaan mittaukset ja testilaitteet

Alustava kahden tunnin mittausjakso voidaan todeta hyväksytyksi, mikäli mittaus täyttää kaikki tarkan mittausjakson vaatimukset. Yhteensä tehdään kaksi erillistä mittausta. Jokaisella tehotasolla lopullinen arvo lasketaan keskiarvona kahden tunnin mittauksesta. Alustava mittaus tulee tehdä heti kun laitos on stabiilissa tilassa ja teho on halutun toleranssin sisällä. Lisäksi CWS31 tulee olla tehty.

Laitoksen tulee kyetä jatkuvaan käyttöön 1626,7 MWe *NRO* (Net Rated Output) - arvolla. *NRO* on määritelty kaavassa 5 ja *NRO* - arvolle on hyväksytty 1 %:n toleranssi.

$$NRO = P_{gross,turbine,100\%NP} - P_{AUX,NI,100\%NP} - P_{AUX,TI,100\%NP} \quad (22)$$

Liitteessä 15 on esitettyä yksinkertaistettu kaavio OL3- laitoksen sähköjärjestelmästä havainnollistamaan *NRO*:n laskentaa. Liitteessä 16 on PICS näyttökuvaa samasta aiheesta.

Ominaislämmönkulutus on määritetty samalla tavalla käyttöönoton aikana tehtävässä suorituskykymittauksessa.  $MHR$  - arvolle on hyväksytty 1,5 %:n toleranssi.

$$MHR = 0,7 \cdot HR_{100\%} + 0,2 \cdot HR_{90\%} + 0,1 \cdot HR_{50\%} \quad (23)$$

jossa:

$HR_{100\%}$ : Ominaislämpökapasiteetti 100 %:n teholla (9517 kJ/kWh)

$HR_{90\%}$ : Ominaislämpökapasiteetti 90 %:n teholla (9619 kJ/kWh)

$HR_{50\%}$ : Ominaislämpökapasiteetti 50 %:n teholla (10306 kJ/kWh)

(Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

#### 6.1.2 Testin hyväksymiskriteerit

Koe arvioidaan hyväksytyksi, jos seuraavat ehdot täyttyvät:

- Mittausjakso kestää vähintään kaksi tuntia.
- Ei lisävettä reaktoripiiriin.
- Ei lisävettä lauhduttimeen
- Ei ulospuhallusvirtausta
- Jokaisessa mittausjaksossa hylättyjen mittausarvojen lukumäärä SHBM- mittauksessa (Secondary Heat Balance Measurement System) on  $\leq 5$  %.
- Jokaisessa mittausjaksossa syöttöveden virtausmittaus on  $\leq 3$  % poikkeaman sisällä keskiarvoon verrattuna SHBM- mittauksessa.
- $NRO \geq 1610,4$  MWe
- $MHR \leq 9760$  kJ/kWh

*NRO* - sekä *MHR* - arvoissa on huomioitu sallittu toleranssi. *NRO* - arvon tulee olla mittauksen jälkeen korjattu, jotta sitä voidaan verrata laitossopimuksessa määriteltyihin olosuhteisiin. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

### 6.1.3 Testin aloittamisen ennakkoehdot

Testin aloittamiselle on annettu seuraavat ennakkoehdot, jotka tulee täyttyä:

- Reaktori- ja turbiinipuolen parametrit on säädetty.
- Primääripiirin vuoto täyttää TTKE:n (Turvallisuusteknisten Käyttöehtojen) vaatimuksen 3.4.9, ja on riittävän matala, että primääripiiriin ei tarvitse pumpata lisävettä vähintään yhden tunnin aikana.
- Sekundääripiirin vuotomäärä on määritelty. Vuotomäärä on riittävän matala, että lisävettä lauhduttimeen ei tarvita vähintään yhden tunnin aikana.
- Höyrystymien kemia täyttää TTKE:n vaatimuksen 3.10.4 ja on riittävän matala, jotta voidaan suorittaa kolmen tunnin mittausjakso.
- Laitoksen tulee olla vakaa viimeisen 24 tunnin aikana (primääripiirin lämpötila), ja halutulla tehotasolla viimeiset kaksi tuntia.
- Reaktorin tehotaso (xenon-tasapaino) ja generaattorin teho (taajuus ja  $\cos \phi$ ) ovat vakaita.
- Ei määrääaikaiskokeita tai muita kokeita ja testejä suunniteltuna halutuilla tehotoilla mittausten aikana.
- Koeohjelmassa määritelty testilaitteisto on käytettävissä ja kalibroitu.
- Sekundääripuolen lämpötaseen mittausjärjestelmä on käytettävissä, sekä kalibroitu.
- Sähkökaapit (kiskot ja katkaisijat) jotka vaaditaan tehon mittaukseen testin aikana, tulee olla hyvissä ajoin instrumentoituna helpottamaan tehoanalyysointia



ja vähentämään asennusaikaa ennen mittauksen tekoa. Mittausaika 5 min/kisko sekä 10 min/ pumppu.

Lisäksi on erityisiä ennakkoehtoja liittyen testin tekemiseen:

- Höyrystimen ulospuhallus tulee olla kiinni vähintään 2 tuntia ennen mittausjakson alkua (max. 8 tuntia). Höyrystimien kemiaa tulee valvoa jatkuvasti QUC- järjestelmällä testien aikana. On mahdollista, että höyrystimien kemia poikkeaa kokeen aikana TTKE:n vaatimuksesta 3.10.4.
- KBA- järjestelmän pinnansäätötankin (30KBA20 CL950 XQ01) pinnan tulee olla välillä 1,95–2,0 m ja lisäveden syötön automaattitoiminto tulee olla pois päältä. Säiliön KBA20BB001 pinnan tulee pysyä yli yhden metrin, etteivät pumput KBA31AP001/KBA32AP001 mene suojauksen takia pois päältä.
- Sähkötehojen mittaukset reaktoripuolella tulee olla tehtynä käyttöönotto-ohjeen CWS14 mukaan (Commissioning Worksheet for motors of rotating machines. 2021) (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

#### 6.1.4 Reaktoripuolen lämpötase

Takuukokeen koeohjelmassa olevat mittaukset tehdään standardin ASME PTC 32.1 mukaan seuraavilla poikkeamilla;

- ASME:n höyrytaulukon sijaan käytetään laskennassa IAPWS97 mukaista taulukkoa (IAPWS, 1997).
- Mittausjakson kesto on vähintään kaksi tuntia.

Jokainen reaktoripuolen lämpötase pitää sisällään seuraavien parametrien määrittelyn:

- NSSS (Nuclear Steam Supply System) lämpöteho [ $\text{MW}_{\text{th}}$ ]
- Reaktorisydämen lämpöteho [ $\text{MW}_{\text{th}}$ ]
- Höyryn massavirta ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa [ $\text{kg/s}$ ]
- Höyrynkosteus ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa [%]
- Höyryn entalpia ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa [ $\text{kJ/kg}$ ]
- Höyryn paine ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa [ $\text{kPa}$ ]
- Painehäviö ennalta määritetyn syöttövesilinjan ja höyrylinjan reaktoripuolen rajapintojen välillä [ $\text{kPa}$ ]
- Painehäviö päänhöyryn kuristimen yli [ $\text{kPa}$ ]
- Omakäyttösähkön määrä [ $\text{kW}$ ]
- Energiahäviöt reaktoripuolella [ $\text{kW}_{\text{th}}$ ]
- Reaktoripuolen netto häviölämpöteho tai energian määrä jäähdytteestä [ $\text{MW}_{\text{th}}$ ]
- Syöttöveden paine reaktoripuolen rajapinnassa [ $\text{kPa}$ ]
- Reaktoripuolen hyötysuhde [%]

Koeohjelmassa on määritelty ja esitetty miten kaikki mitataan ja lasketaan. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

#### 6.1.5 Testin tekeminen

Ennen testin tekoa kirjataan reaktoripuolen järjestelmien tila. Digitaalisten signaalien lista on sama lista, joka tarkastetaan käyttöönottoaiheen D aikana tehtävän suorituskykykokeen

yhteydessä. Analogisissa signaaleissa on eroavaisuuksia verrattuna käyttöönottoaiheen D aikana tehtäviin mittauksiin. Tallennettavat analogiset signaalit on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Tallennettavat analogiset signaalit. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

<b>KKS Tunnus</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Yksikkö</b>
3 0JSB00 FE721X XQ60	Generaattoriteho	MW
3 0MKA01 CE903A XQ01	Generaattorin pätöteho	MW
3 0ACA00 CE003 XQ01	Pätöteho	MW
3 0JSA00 FF755X XQ60	Höyryvirtaus SG1	kg/s
3 0JSB00 FF755X XQ60	Höyryvirtaus SG2	kg/s
3 0JSC00 FF755X XQ60	Höyryvirtaus SG3	kg/s
3 0JSD00 FF755X XQ60	Höyryvirtaus SG4	kg/s
3 0JSC00 FP756 XQ60	Höyrynpaine	barg
3 0LAB40 CP002 XQ01	Syöttöveden paine ennen esilämmitystä	barg
3 0JEA10CF730X XQ90	Syöttövesivirtaus SG1	kg/s
3 0JEA20CF730X XQ90	Syöttövesivirtaus SG2	kg/s
3 0JEA30CF730X XQ90	Syöttövesivirtaus SG3	kg/s
3 0JEA40CF730X XQ90	Syöttövesivirtaus SG4	kg/s
3 0JSN20 EC943X XQ51	Säätövastusten teho	%
3 0KBA20 CL950 XQ01	Tilavuudensäätötankin pinta	m
3 0QUC11 XQ001 XQ01	Johtokyky SG1	μS/cm
3 0QUC12 XQ001 XQ01	Johtokyky SG2	μS/cm
3 0QUC13 XQ001 XQ01	Johtokyky SG3	μS/cm
3 0QUC14 XQ001 XQ01	Johtokyky SG4	μS/cm
3 0QUC20 CQ002 XQ01	Natriumpitoisuus	ppb
3 0QUC20 CQ003 XQ01	Natriumpitoisuus	ppb
3 0LCG10 CF001 XG01	Ulospuhallusvirtaus SG 1	kg/s
3 0LCG20 CF001 XG01	Ulospuhallusvirtaus SG 2	kg/s
3 0LCG30 CF001 XG01	Ulospuhallusvirtaus SG 3	kg/s
3 0LCG40 CF001 XG01	Ulospuhallusvirtaus SG 4	kg/s

Taulukossa 9 on esitettyinä mittaukset, joita tarvitaan sekundääripuolen lämpötaseen mitauksessa (CWS 31).

Taulukko 9. Sekundääripuolen lämpötaseen mittauksessa tarvittavat mittaukset (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

<b>KKS Tunnus</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Yksikkö</b>
3 0LAB60 CF001	Syöttövesilinjan 1 virtaus	m <sup>3</sup> /h
3 0LAB60 CT002	Syöttövesilinjan 1 lämpötila	°C
3 0LBA10 CP003	Höyrylinjan 1 paine	barg
3 0LAB70 CF001	Syöttövesilinjan 2 virtaus	m <sup>3</sup> /h
3 0LAB70 CT002	Syöttövesilinjan 2 lämpötila	°C
3 0LBA20 CP003	Höyrylinjan 2 paine	barg
3 0LAB80 CF001	Syöttövesilinjan 3 virtaus	m <sup>3</sup> /h
3 0LAB80 CT002	Syöttövesilinjan 3 lämpötila	°C
3 0LBA30 CP003	Höyrylinjan 3 paine	barg
3 0LAB90 CF001	Syöttövesilinjan 4 virtaus	m <sup>3</sup> /h
3 0LAB90 CT002	Syöttövesilinjan 4 lämpötila	°C
3 0LBA40 CP003	Höyrylinjan 4 paine	barg
3 0LAB90 CP003	Syöttövesilinjan 4 paine	barg

Testin alussa varmistetaan, että laitos on ennalta määritetyssä tilassa. Seuraavaksi kirjataan QUC-mittauksista johtokyky ja natriumpitoisuus ja varmistetaan, että ne täyttävät TTKE-vaatimukset. Varmistetaan kemialta, että höyrystimien ulospuhallus voidaan sulkea 12 tunniksi. Ulospuhalluksen eristämisen jälkeen annetaan laitoksen stabiloitua kaksi tuntia. Stabiili tila varmistetaan seuraavien parametrien avulla: jäädytteen keskimääräinen lämpötila, höyrystimien pinnat, säätösauvojen asennot ja paineistimen pinta. Tämän jälkeen tehdään vielä sekundääripuolen lämpötaseen mittaus (CWS 31), jolla varmistetaan laitoksen tehosta ja stabiilisuudesta.

Alustava mittaus aloitetaan laittamalla KBC-pumput manuaalikäytölle, millä estetään automaattinen lisäveden syöttö piiriin. Tehdään neljä sekundääripuolen lämpötaseen mittausta kahden tunnin aikana, joista jokainen mittaus kestää 20 minuuttia. Tehdään omakäyttösähkön kulutusmittaukset: jokaiselle kiskolle yksi mittaus, jossa luetaan keskimääräinen arvo viiden minuutin mittauksen aikana. Mittauksen päätyttyä kerätään TOPASista mittaustiedot ja lasketaan keskiarvot mittauksista. Samalla tarkastetaan, että mittaukset ovat valmiita ja

käyttökuntoisia. Lopuksi laitetaan myös KBC-pumput takaisin automaatile. Lopuksi varmistetaan, että alustava mittaus on validi.

Seuraavaksi tehdään ensimmäinen suorituskykymittaus, joka noudattaa samaa ohjelmaa kuin valmistava mittaus. Toinen suorituskykymittaus on valinnainen, jos valmistava mittaus on jo ollut validi mittaus. Toinen mittaus noudattaa samaa ohjelmaa kuin valmistava ja ensimmäinen mittaus.

Mittausten lopuksi palautetaan höyrystimien ulospuhallus ja kirjataan ylös aika, jonka ulospuhallus oli suljettuna. Kirjataan ylös LCQ-mittauksista johtokyky ja natriumpitoisuudet sekä varmistetaan että höyrystimien kemia täyttää TTKE-vaatimukset. Mittauksen sekvenssi on esitetty liitteessä 17. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

#### 6.1.6 Tulosten arviointi

- Reaktoripuolen netto lämpötehohäviöt tai energian määrä, joka poistuu jäähdytteestä häviöinä, koostuu seuraavista lämpöhäviöistä: Pääkiertopumppujen lämpökilvet, KBA- järjestelmän korkeapainejäähdyttimet, primääripiirin vuodot ja lämpöhäviöt suojarakennukseen.
- Reaktorisydämen lämpötehon määrittelyssä otetaan huomioon pääkiertopumppujen ja KBA- järjestelmän pumppujen sekä paineistimen säätövastuksien tuoma lämpöteho systeemiin. Pumppujen tuoma lämpöteho on määritelty käyttöönottovaiheen D4 aikana käyttöönotto-ohjeen CI PER D02 mukaisesti ja näitä arvoja käytetään takuumittauksen analysoinnissa. Säätövastuksien tuoma lämpöteho lasketaan, kun tiedetään maksimi lämpöteho 707,7kW.
- NSSS (Nuclear Steam Supply System) lämpöteho perustuu mittausten perusteella laskettuun arvoon.
- Reaktoripuolen hyötysuhde perustuu mittausten perusteella laskettuun arvoon.

- Höyrinpaine ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa korjataan koeohjelmassa annettujen korjauskertoimien avulla.
  - – 0,427bar (100 % reaktoriteho)
  - – 0,322bar (90 % reaktoriteho)
  - – 0,067bar (50 % reaktoriteho)
- Höyrinkosteus ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa on määritelty käyttöönottovaiheen D4 aikana käyttöönotto-ohjeen CI PER D02 mukaisesti ja näitä arvoja käytetään takuumittauksen analysoinnissa.
- Höyrin entalpia saadaan määritettyä koeohjelmassa määritellyn höyrytaulukon avulla laskemalla, kun tiedetään kosteus ja paine:

$$H_{rajapinta}^{höyry} = H^{höyry} \cdot (1 - M) + M \cdot H^{vesi} \quad (24)$$

jossa  $M$  on höyrinkosteus [%] ja  $H$  [kJ/kg] on entalpia.

- Syöttöveden paine reaktoripuolen rajapinnassa saadaan mittaamalla.
- Painehäviö ennalta määritetyn syöttövesilinjan sekä höyrylinjan reaktoripuolen rajapintojen välillä saadaan laskemalla aikaisemmin laskettujen arvojen perusteella.
- Painehäviö päänhöyrin kuristimen yli lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\Delta(\text{mbar}) = \text{Physical\_range}_{30\text{JEAi0CF730}} \cdot \left[ \frac{30\text{JEAi0CF730X.XQ90}}{i\&C\_range_{30\text{JEAi0CH730}}} \right]^2 \quad (25)$$

jossa:

30JEAi0CF730X.XQ90 on höyryvirtaus [kg/s]

i&C\_range<sub>30JEAi0CH730</sub> on mitta-alue [kg/s]

Physical\_range<sub>30JEAi0CF730</sub> määritetään käyttöönoton aikana [mbar]

- Höyrin massavirta ennalta määritetyssä höyrylinjassa reaktoripuolen rajapinnassa saadaan mittaamalla.

- Omakäyttösähkön kulutus saadaan mittaamalla. Liitteessä 18 on esitetty tarvittavat mittapisteet.

Koeohjelman liitteessä on avattu tarkemmin metodit ja perusteet laskennalle sekä mittauksille. Koeohjelmassa on myös mittauspöytäkirjat liitteenä. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

#### 6.1.7 Testin tulokset

Mittausten lopuksi kerätään kaikki tarvittava tieto valmiisiin mittauspöytäkirjoihin. Omaislämpökapasiteetti *MHR* ja nettosähköteho *NRO* määritellään samalla metodilla kuin käyttöönottovaiheen D4 aikana tehtävässä suorituskykykokeessa. Laskennassa käytetään myös samoja korjauskäyriä.

Lopuksi tarkastetaan täyttääkö *MHR* sekä *NRO* seuraavat ehdot:

$$MHR \leq 9760 \text{ KJ/kWh}$$

$$NRO \text{ 100\%:n reaktoriteholla} \geq 1610,4 \text{ MWe}$$

(Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021).

Tässä on huomioitava, että arvot poikkeavat käyttöönottovaiheen D4 aikana tehtävän suorituskykymittauksen arvoista (kts. kpl 3.2) (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

## 6.2 Turbiinipuolen koeohjelma

Turbiinipuolen koeohjelma on varsinaisen koeohjelman liitteenä. Se perustuu standardiin ASME PTC6. Koeohjelmaa on täydennetty lisäksi standardeilla VDI 3920 (VDI 3920:1981–

12) ja ASME PTC 19.5. Koeohjelmassa on esitetty kokeen vaatimukset, olosuhteet ja laskentametodit. Olosuhteet ja vaatimukset ovat samat kuin varsinaisessa koeohjelmassa. Lisänä on korjauskerroin ikääntymiselle, jota käytetään, jos takuukoe tehdään vähintään 3kk kaupallisen käytön aloittamisesta. Korjauskerroin ikääntymiselle on esitetty liitteessä 19. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

### 6.2.1 Tavoitteet

Suorituskykymittaus tulee tehdä samaan aikaan reaktoripuolella ja turbiinipuolella. Netto-sähköteho  $NRO$  määritetään seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 P_{net,LBV} &= 1626,7 \text{ MW}, 100\%:n \text{ lämpöteholla} \\
 P_{net,LBV} &= P_{gross,TI} - P_{AUX,NI} - P_{AUX,TI} \quad (26) \\
 P_{gross,TI} &= 1720,6 \text{ MW} \\
 P_{AUX,NI} &= 40,954 \text{ MW} \\
 P_{AUX,TI} &= 52,974 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Ominaislämmönkulutus  $MHR$  määritetään seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 HR_{load\ case} &= \frac{Q_{thermal,load\ case}}{P_{net,load\ case}} \quad (27) \\
 Q_{thermal,load\ case} &= \text{Lämpöteho turbiinilaitokselle} \\
 HR_{Mean, LBV} &= 9616 \text{ KJ/kwh} \\
 HR_{Mean, LBV} &= 0,7 \cdot HR_{100\%} + 0,2 \cdot HR_{90\%} + 0,1 \cdot HR_{50\%} \quad (28)
 \end{aligned}$$

Taulukossa 10 on esitetty nimellisuoritusarvoja eri tehotasoilla. Laitossopimuksessa on annettu sekundääripiirin suorituskyvyn takuuarvot lämpötasekaavioilla. Lämpötasekaaviot



ovat esitettynä liitteissä 20–22. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

Taulukossa 10 on esitetty arvoja rajapinnassa eri tehotasoilla. Rajapinnalla tarkoitetaan fyysisestikin kohtaa turbiini- ja reaktorilaitoksen välillä. Se liittyy laitossopimukseen ja siihen, että vaikka TVOn näkökulmasta on vain yksi laitostoimittaja, niin käytännössä Areva kuitenkin vastaa reaktoripuolesta sekä Siemens turbiinipuolesta ja kumpikin osapuoli vastaa oman alueen suorituskyvystä. Tämä näkyy myös siinä, että kumpikin osapuoli haluaa takuumittauksessa määrittellä asioita hieman eri tavalla. Rajapinta on siis tietty sopimuksessa määritelty kohta höyry- ja syöttövesilinjoissa reaktorilaitoksen ja turbiinilaitoksen välillä.

Taulukko 10. Nimellissuoritusarvoja eri tehotasoilla.

	Yksikkö	100 %:n generaattoriteho	90 %:n generaattoriteho	50 %:n generaattoriteho
Höyrystimien ulospuhallus	kg/s	0	0	0
Höyrystimien lämpöteho	MW	4320,0	3919,1	2272,8
Reaktoriteho	MW	4300	3895,1	2248,8
Omakäyttöteho turbiinilaitos	MW	52,974	49,794	33,882
Omakäyttöteho reaktorilaitos	MW	40,954	40,954	40,954
Jäähdytysveden lämpötila	°C	5	5	5
<b>Syöttövesi rajapinnassa</b>				
Massavirta	kg/s	2449,01	2199,49	1216,84
Lämpötila	°C	230,20	225,90	204,40
Paine	bara	90,44	95,45	102,50
Entalpia	kJ/kg	992,30	972,70	875,50
<b>Höyry höyrystimen jälkeen</b>				
Massavirta	kg/s	2449,01	2199,49	1216,84
Höyryn kosteus	%	99,75	99,75	99,75
Paine	bara	78,00	80,30	87,60
Entalpia	kJ/kg	2757,91	2754,54	2743,26
<b>Höyry rajapinnassa</b>				
Massavirta	kg/s	2449,01	2199,49	1216,84
Höyryn kosteus	%	99,60	99,62	99,68
Paine	bara	76,60	79,20	87,30
Entalpia	kJ/kg	2757,71	2754,36	2742,89

### 6.2.2 Testiolosuhteet

Takuukokeen tuloksen virheettömyys riippuu paljon siitä, kuinka onnistuneesti sekundääripiiri ja sen vuodot saadaan eristettyä. Eristykset ja sen toteuttaminen tulee sopia hyvissä ajoin ennen takuukokeen suorittamista. Jos vuotoa ei saada eristettyä, niin vuodon suuruus tulee mitata tai arvioida tarkasti. Vuodot tulee sisällyttää pää- tai sekundäärivirtausmäärän laskuihin. Myös tunnistamattomat vuodot tulee määritellä ja sisällyttää pää- tai sekundäärivirtausmäärän laskuihin, jos katsotaan tarpeelliseksi.

Jotta vuodot saadaan mahdollisimman pieneksi, tulee vuototesti tehdä noin neljä viikkoa ennen takuukoetta, jolloin jää vielä riittävästi aikaa tehdä huolto- kunnossapitotöitä vuotaville venttiileille. Vuotokokeessa suljetaan venttiileitä ja vuoto määritetään mittaamalla kahden tunnin ajan lämpötilaa suljetun venttiilin molemmin puolin. Vuototestin jälkeen määritellään vielä tarkemmin takuukokeessa suljettavat venttiilit sekundääripiirin osalta. Takuukokeessa tehdään ensin sekundääripiirin eristykset ja laitoksen stabiloinnin jälkeen lisäveden syöttö sekä ulospuhallus eristetään. Lauhduttimen pintaa valvotaan ja pinnanmuutoksen perusteella määritetään tunnistamaton vuoto. Vuotomäärän tulee olla alle 0,1 % päänhöyryvirtauksesta. Hyväksymisraja pohjautuu ASME PTC 6 standardiin. Jos vuotomäärä on suurempi, tulee käynnistää toimenpiteet vuodon pienentämiseksi, jotta se täyttää ASME-standardin vaatimukset. Jos vuotomäärää ei saada täyttämään standardin vaatimusta, koe hylätään ja tehdään uudestaan, kunnes vuotomäärä on sallituissa rajoissa. Jäähdytysveden lämpötilan vaihtelun vuoksi koe olisi suositeltavaa tehdä iltapäivällä, jolloin jäähdytysveden lämpötilan muutokset ovat pienempiä. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

### 6.2.3 Instrumentointi ja kalibrointi

Mittapistekaavio on esitetty liitteessä 23. Mittapisteeet koostuvat virtaus-, paine-, pinta- ja tehomittauksista. Tarkempi mittapisteluettelo on esitetty varsinaisessa koeohjelmassa ja pitää sisällään n. 300 mittapistettä sekundääripiiristä sekä n. 60 mittausta sähköjärjestelmästä. Takuukoeohjelmassa todetaan, että mittapisteen lukumäärä ja niiden sijainnit riittävät lämpö- ja massavirtataseiden kokonaisvaltaiseen arviointiin, jotta voidaan todeta, että välitulustusjärjestelmä vastaa suunniteltua. Takuukoeohjelmassa määritetyllä laitoskonfiguraatiolla ja mittapisteillä on mahdollista noudattaa VDI 3920-standardia kohtuullisella ponnistelulla. Mittapistekaavion mittaukset koostuvat koetta varten asennetuista tarkkuusmittauksista.

- Lämpötilamittaukset tehdään kalibroiduilla termoelementeillä ja kalibroiduilla resistansitermoelementeillä.
- Painemittaukset tehdään kalibroiduilla tarkkuuspaineantureilla.

- Paine-eromittaukset tehdään kalibroiduilla paine-eroantureilla.
- Mitatut arvot kerätään HP Agilent- tyyppisillä tiedonkeruujärjestelmillä.
- Sähköpuolelta mitataan teho-, jännite- ja virta-arvoja.

TXP-järjestelmän (normaali prosessiautomaatio) avulla kerätään käyttödataa kuten pinta-arvoja, venttiilien asentotietoja ja magnetointivirran arvoja. Reaktoripuolella mitataan ultraäänimittauksilla syöttövesivirtauksia ennen höyrystimiä mittapisteillä 30LAB60/70/80/90CF001 ja höyrynpaineita höyrystimien jälkeen mittapisteillä 30LBA10/20/30/40CP001. Syöttöveden virtausmittaus muodostaa perustan pähöyryvirtauksen määrittämiseksi. Ultraäänimittauksen lisäksi syöttövesilinjoihin on asennettu mittauslaipat 30LAB60/70/80/90CF701, joilla saadaan redundanttinen mittaustulos sekä voidaan varmentaa mittausten luotettavuus. Vertailun vuoksi arvioidaan välitulistimien ja syöttövesitankin lämpötaseet perustuen lauhdevirtaukseen, mikä tasapainotetaan olemassa olevilla virtauksensäätölaitteilla lauhdelinjoissa.

Mittapisteiden keruu tehdään datankeruujärjestelmässä 10 tai 15 sekunnin jaksoilla. Manuaalinen mitta-arvon lukeminen tehdään viiden minuutin välein ja lopullisena mittaustuloksena käytetään tunnin keskiarvoa.

Mittapisteiden tulee olla kalibroituja ja kalibroinnin tulee täyttää standardin DIN EN ISO/IEC 17025 tai vastaavan vaatimukset. Kalibrointi on voimassa kaksi vuotta. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

#### 6.2.4 Tulosten laskenta ja arviointi

Ensimmäiseksi korjataan tuotettu sähköteho liitteiden 8 ja 9 perusteella. Höyryn kosteusprosentti määritetään käyttöönottovaiheessa D. Jos mittaustulos on silloin hyväksyttävissä, käytetään tulosta myös takuumittauksessa eikä uudelleenmäärittystä tarvita.

Lämpöteho turbiinipuolelle määritetään seuraavasti:

$$Q_{therm,load\ case} = \dot{m}_{MS} \cdot h_{MS} - \dot{m}_{FW} \cdot h_{FW} = (\dot{m}_{FW} - 0,3 \cdot \dot{m}_{Loss}) \cdot h_{MS} - \dot{m}_{FW} \cdot h_{FW} \quad (29)$$

jossa:

$\dot{m}_{FW}$ : Syöttövesivirtaus (30LAB60/70/80/90CF001)

$\dot{m}_{MS}$ : Päähöyryvirtaus (syöttövesivirtaus miinus höyryvuodot, joista oletetaan että 30 % konaisvuodoista on putkihäviöitä. kts. IEC-953-2, 1990–12, kappale 1.4)

$h_{ms}$ : Päähöyryn entalpia, päähöyrynpaineen 30MAA11/21/31/42CP421 sekä höyrynkosteuden perusteella.

$h_{FW}$ : Syöttöveden entalpia. Määritellään 30LAB60/70/80/90CP701 sekä 30LAB60/70/80/90CT209 mittapisteiden perusteella.

Tunnistamattomat vuodot määritellään seuraavasti:

$$\dot{m}_{Loss} = \Delta h_{HW} \cdot A_{HW} \cdot \rho_{h20} + \dot{m}_M \quad (30)$$

jossa:

$\Delta h_{HW}$ : pinnanmuutos lauhduttimen hotwellissa [m/s]

$A_{HW}$ : Lauhduttimen hotwellin pinta-ala [m<sup>2</sup>]

Sähkötehon määrittelyssä tulee ottaa huomioon, että tehokertoimen ( $\cos \phi$ ) tulisi olla 0,9. Jos tehokertoimen arvoa 0,9 ei voida käyttää, tulisi harkita generaattorin häviöiden korjausta. Korjauskertoimet on annettu liitteissä 8 ja 9.

Jäähdytysvesivirtaus määritellään seuraavasti:

$$Q_{thermal} - P_{ST,shaft} = Q_{CW} \quad (31)$$

jossa:

$Q_{thermal}$ : Turbiinipuolelle tuotettu lämpöteho [kJ/s]

$P_{ST, shaft}$ : Höyryturbiinin akseliteho [kW]

$Q_{CW}$ : Lämpöteho jäähdytysveteen [kJ/s]

Höyryturbiinin akseliteho määritetään seuraavasti:

$$P_{ST, shaft} = \left[ \frac{P_{ST, gross, pfn}}{\eta_{gen, pfn}} \right] + P_{ML} \quad (32)$$

jossa:

$P_{ST, gross, pfn}$ : Höyryturbiinin bruttoteho, korjattuna tehokertoimella

$P_{ML}$ : Mekaaniset häviöt, n.2500 kW

$\eta_{Gen, pfn}$ : Generaattorin hyötysuhde, korjattuna tehokertoimella

Jäähdytysveden lämpötilaero määritellään seuraavasti:

$$\Delta\vartheta_{CW} = \vartheta_{CW, ulos} - \vartheta_{CW, sisään} \quad (33)$$

jossa:

$\vartheta_{CW, sisään}$ : Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta [K]

$\vartheta_{CW, ulos}$ : Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen [K]

Jäähdytysveden massavirta [kg/s] määritetään seuraavasti:

$$q_{mCW} = \frac{Q_{CW}}{(C_{p, CW} \cdot \Delta\vartheta) \cdot 1000} \quad (34)$$

jossa:

$C_{p, CW}$ : Veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

Merivesipumppujen aiheuttamaa entalpian nousua ei oteta huomioon.

Lauhduttimen alijäähtyminen tarkastetaan laskemalla, jotta vältetään liiallinen lauhteen jäähtyminen. Kylläistä lämpötilaa, joka pohjautuu lauhduttimen paineeseen, verrataan hotwellin lämpötilaan lauhduttimen alaosassa.

Lauhduttimen tiiveys ja tyhjän tehokkuus tarkastetaan käyttöönottovaiheessa D. Kokeen suoritus on kuvattu käyttöönotto-ohjeessa 30MAG TI D01. Koe tehdään 50 %:n teholla ja rajana paineen nousulle on 1,3mbar/min tyhjänimupumppujen ollessa pysäytettynä.

Vertailu takuuarvoihin määritellään seuraavasti:

$$P_{ST,gross,corr} = P_{ST,gross,pfn} \cdot \left( \frac{1 + \sum_{i=1}^n f_i}{100} \right) \quad (35)$$

jossa:

$$n = 1$$

$P_{ST,gross,corr}$ : Antoteho korjattuna referenssitilaan [MW]

$P_{ST,gross,pfn}$ : Antoteho korjattuna tehokertoimella [MW]

$f_i$ : korjauskerroin

Nettosähköteho määritellään seuraavasti:

$$P_{net,corr} = P_{ST,gross,corr} - P_{AUX,NI} - P_{AUX,TI} - P_{net,ikäntyminen} \quad (36)$$

jossa:

$P_{AUX,NI}$ : Reaktoripuolen omakäyttöteho

$P_{AUX,TI}$ : Turbiinipuolen omakäyttöteho

$P_{net, ikääntyminen}$ : Korjauskäyrä on esitetty liitteessä 19. Oletetaan olevan 0,27·kuukausien määrä kaupallisen käytön aloittamisen jälkeen, alkaen 3kk kaupallisen käytön aloituksesta.

(Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)

### 6.2.5 Testin hyväksymiskriteerit ja raportointi

Testin hyväksymiskriteereinä *NRO*- sekä *MHR*- arvoille:

$$P_{net,corr} \cdot 1,01 > P_{LBV}$$

$$\text{jossa } P_{LBV} = 1626,7 \text{ MW}$$

$$HR_{mean,corr} \cdot 0,985 < HR_{LBV}$$

$$\text{jossa } HR_{LBV} = 9616 \text{ kJ/kWh}$$

Takuukokeesta luovutetaan esiraportti neljän päivän kuluttua testin päättymisestä. Lopullinen raportti luovutetaan neljän viikon kuluttua testin päättämistä. (Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021.)



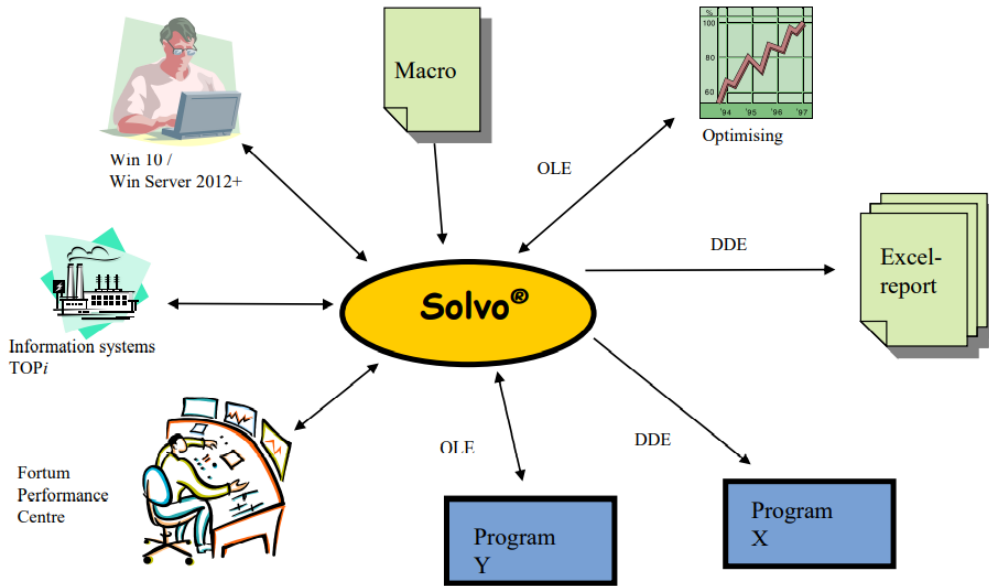
## 7. Simulointityökalujen käyttö suorituskyvyn valvonnassa

OL3- laitoksella on käytettävissä kaksi eri voimalaitosprosessin suunnittelu- ja optimointityökalua. Työkalut saadaan käyttöön käyttöönoton jälkeen. Fortum toimittaa Solvo-ohjelmiston ja Siemens toimittaa Krawal-ohjelman. Siemens ei ole toimittanut vielä materiaalia Krawal- ohjelmasta, joten sitä ei voida tässä työssä tutkia.

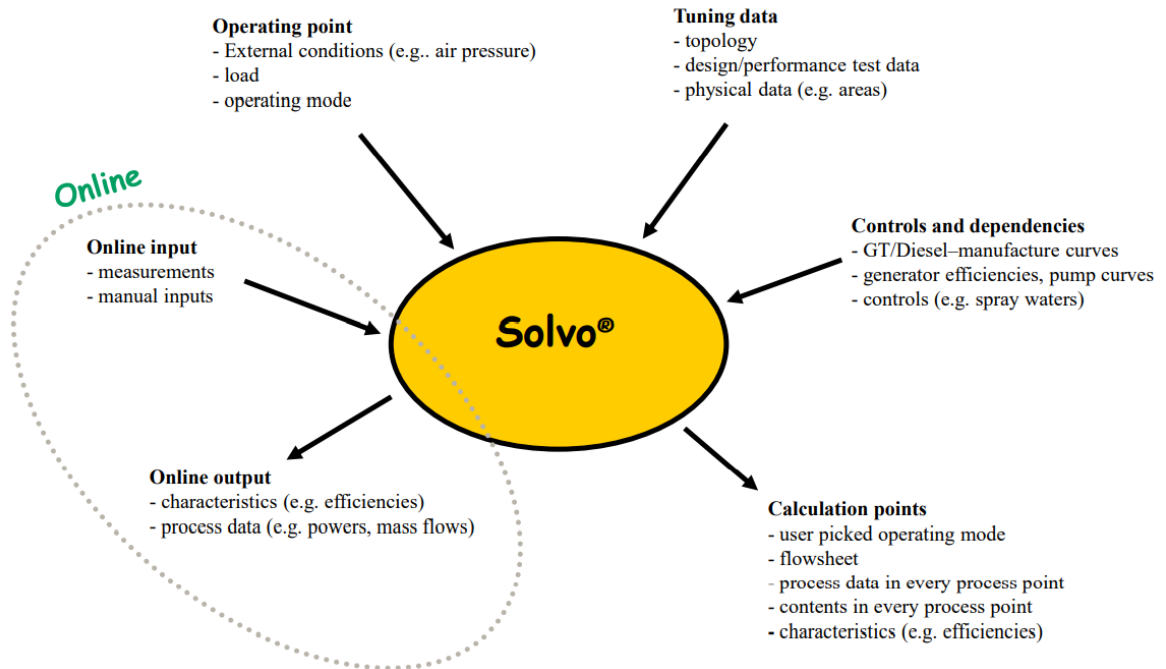
### 7.1 Fortum Solvo

Solvo mainostaa itseään monipuolisena lämpöteknisenä tasapainotilojen simulaattorina. Ohjelmaa voidaan käyttää apuna esimerkiksi voimalaitosprosessien suunnittelussa, muutoksien hallinnassa, optimoinnissa, kunnonvalvonnassa, koulutuksessa ja prosessi-investointeja arvioitaessa. (Fortum, 2019)

Solvon laskenta perustuu massa- ja energiavirtojen tasapainotilaan sekä laitteiden toimintaa kuvaavien yhtälöiden ratkaisuun. Ohjelmisto koostuu yli 170 komponentin moduulikirjastosta pitäen sisällään venttiilejä, putkistoa lämmönvaihtimia, turbiinilohkoja ja jäähdytystornejä. Pienemmilläkin syöttötiedoilla pääsee jo liikkeelle, mutta laskentaa pystytään tarkentamaan, kun laskentatietoa lisätään. Modulaarisuus edesauttaa muunneltavuutta. Mallia pystytään virittämään, kun tiedetään yksikin piste (takuu- tai suunnittelupiste). Tämä mahdollistaa prosessin tarkastelua eri ajo- ja osakuormapisteissä. Simulointilaskelman avulla pystytään korjaamaan painehäviöt, lämmönsiirtokertoimet ja asteisuuksia vastaamaan uusia olosuhteita. Ohjelmalle on mahdollista saada tukea ja käyttökoulutusta. Työkalun avulla voidaan lisätä henkilöstön ymmärrystä ja tietämystä, kun voidaan simuloida etukäteen prosessimuutoksia ja vertailla vaihtoehtoja etukäteen. Eri ajotilanteille voidaan määritellä optimoituja prosessiarvoja. Optimoinnin avulla voidaan parantaa käyttötaloutta ja laitoksen hyötysuhdetta. Kunnossapitotarpeita voidaan määritellä ja optimoida paremmin työkalun avulla. Tuloksia voidaan tulostaa ja viedä jatkokäsittelyyn Excel- ohjelmistoon. Solvon rajapinnat on havainnollistettu kuvassa 23. Solvoon syötettäviä ja siitä ulos saatavia parametrejä on havainnollistettu kuvassa 24. (Fortum Power and Heat Oy, 2020).



Kuva 23. Fortumin Solvo-ohjelmiston rajapinnat (Fortum Power and Heat Oy, 2020).



Kuva 24. Fortumin Solvo-ohjelmistoon syötettäviä ja siitä ulos saatavia parametrejä. (Fortum Power and Heat Oy, 2020).

## 7.2 Laitoksen suorituskyvyn arviointi prosessimallin avulla

Tämä on yksi metodeista, jota voidaan hyödyntää laitoksen suorituskyvyn arvioinnissa ja valvonnassa. Metodissa arvioidaan lämpötehoa, jonka sekundääripiiri muuttaa sähkötehoksi. Prosessimallin kehittämiseksi tarvitaan tarkkoja mittauksia, jotka malliin syötetään. OL3-laitoksella takuukokeen mittaustuloksia tullaan käyttämään referenssinä prosessimallin virittämässä. Luotettavan prosessimallin kehittäminen ja ylläpito vaatii resursseja. Metodia voidaan käyttää osana laitoksen suorituskyvyn valvontaa.

Oikean laitoksen ”digitaalinen kaksonen” on järjestelmällinen sovellus kaavoja ja datan käsittelyä. Kunhan se saadaan viritettyä oikein, sen avulla voidaan saada hyvä kuva fyysisistä suureista sekä sekundääripiirin suorituskyvystä. (IAEA, International Atomic Energy, 2022). Seuraavassa on kuvattu eroavaisuuksia prosessimallin sekä digitaalisen kaksosen välillä.

Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli, joka heijastaa tarkasti fyysistä prosessia. Sitä voidaan käyttää tuotantoprosessien eri vaiheissa ja hyvin monipuolisesti apuna liiketoiminnassa verrattuna perinteiseen malliin. Digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää esimerkiksi seuraavissa vaiheissa: tuotekehitys, markkinointi, kunnonvalvonta, perehdytys ja koulutus. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan seurata reaaliajassa voimalaitoksen tilaa. (LUT, 2020).

Mallin käyttämisessä apuna suorituskyvyn arvioinnissa on etuja verrattuna pelkän laskennan käyttämiseen. Sen avulla saadaan tietoa veden tilasta missä tahansa prosessin pisteessä. Siten voidaan arvioida kaikkien komponenttien suorituskykyä myös erikseen. Kun mittaustiedot on syötetty, saadaan automaattisesti tietoa prosessin tilasta ja mittareista, joiden avulla suorituskykyä voidaan arvioida. Pääasia prosessimallin kehittämisessä on valita riittävä fyysinen kuvaus prosessin tasosta, joka mallinnetaan ja jonka taso on riittävä tuottamaan odotettuja fyysisiä arvoja. Mitä tarkempi malli on, sitä enemmän syötettävää dataa tarvitaan. Datan kerääminen ja syöttäminen malliin sen virittämiseksi voi olla työlästä, varsinkin jos se tehdään määrääjain. Fysiikkaan perustuva prosessimalli antaa kuvan täydellisestä prosessista.

Oikea prosessi kuitenkin toimii eri tavalla kuin malli. On vaikeaa mallintaa kaikkia mahdollisia ilmiöitä, joita oikeassa prosessissa on. Erot oikean prosessin ja prosessimallin välillä ovat aina olemassa oikeiden mitta-antureiden ja mallista saatavien arvojen välillä. Paras hyöty saadaan, kun käytetään termodynaamista prosessimallia tietyssä stabiilissa käyttötilassa, jota voidaan verrata laitoksen referenssitilaan. Täten saadaan vähennettyä malliin syötettävää datan määrää. Referenssitila on paras odotettu tila prosessille. Tätä tilaa ei välttämättä tarvitse määrittellä erikseen käyttöönnotossa. Käyttöönoton aikaisten arvojen odotetaan oleva lähellä referenssitilaa, mutta ne usein silti eroavat toisistaan. Käyttötila ja prosessiparametrit referenssitilassa pitävät sisällään prosessin sisäiset olosuhteet sekä ympäristöstä aiheutuvat olosuhteet. Referenssitilan sisäiset ja ulkoiset olosuhteet tulee määrittellä selkeästi. Määrittelyn jälkeen ja laitoksen ollessa stabiloidussa, referenssitilaa vastaavassa käyttötilassa, vertailu voidaan tehdä referenssitilan ja oikean prosessin välillä. Samat eroavaisuudet syötetään prosessimalliin, jolloin saadaan prosessimalli viritettyä. Vertaamalla eroavaisuuksia oikean prosessin ja referenssitilan välillä voidaan tunnistaa häviöitä sähköntuotannossa. Ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

Ulkoiset häviöt: esimerkiksi lämpötehon tuotanto, tehokerroin, jäähdytysveden lämpötila.

Sisäiset häviöt: esimerkiksi lauhduttimen likaantuminen, liian suuri höyrystimen ulospuhallusvirtaus.

Tuntemattomat häviöt: ulkoisten ja sisäisten häviöiden jälkeen jäljelle jäävät häviöt sähköntuotannossa.

Vertailu oikean prosessin ja referenssitilan välillä on tarpeen tehdä säännöllisesti esimerkiksi kerran viikossa tai kuukaudessa. Vertailun avulla saadaan tietoa prosessin tilasta ja komponenttien suorituskyvystä, jolloin pystytään tarkentamaan kohtia prosessissa, jotka vaikuttavat heikentävästi suorituskykyyn. Vertailut auttavat prosessimallin kehittämisessä pitkällä aikavälillä ja tekevät näkyväksi, miten prosessi käyttäytyy vertailujen välillä. Näiden vertailujen avulla voidaan prosessimallia päivittää ilman, että tarvitsee tehdä erikseen kohdennettuja tarkkuusmittauksia mallin kalibrointia varten.

Seuraavia asioita tulee ottaa huomioon, kun vertaillaan mallia ja oikeaa voimalaitosprosessia:

- Prosessi ei ole omavarainen, vaan vaatii osaavaa ihmistä sekä analysoimaan tuloksia, että kehittämään prosessia ja pitämään sitä yllä.
- Mitta-anturin lukeman virhe tai inhimillinen virhe mittatulosten syöttämisessä aiheuttaa poikkeaman myös prosessimallissa.
- Prosessi tuo vaatimuksia niin instrumentoinnille, organisaatiolle kuin myös mallinnukselle. Anturit tulee kalibroida säännöllisesti ja kalibroinnille tulee olla tietty taajuus kunnossapito-ohjelmassa. Organisaatiossa tulee olla ohjeet ja menettely selvillä, miten mittaukset tehdään. Laitoksen tulee olla stabiili mittausten aikana.
- Datan avulla tulee tunnistaa poikkeamat suorituskyvyssä ja tulee laatia toimintasuunnitelma poikkeamien korjaamiseksi.
- Mallin rakentaminen ja kehittäminen vaatii sekä taloudellista panostusta, että panostusta henkilöstöön. Panokset ovat luonnollisesti suurempia, jos ei ole useampia samanlaisia laitoksia, joissa voidaan hyödyntää samaa mallia.
- Laitosmuutokset tulee viedä myös malliin ja muutokset tulee määritellä huolellisesti. (IAEA, International Atomic Energy, 2022).

## 8. OL3 suorituskyvyn valvonta ja laitosmittaukset

Tässä työssä olen tuonut esiin laitoksen ominaisuuksia liittyen laitosmittauksiin, tutustunut OL1-/OL2- laitoksilla tehtäviin mittauksiin ja OL3- laitoksen käyttöönoton aikaisiin mittauksiin, takuukokeeseen sekä hakenut maailmalta esimerkkejä ja ideoita suorituskyvyn valvontaan liittyen. Sen pohjalta käsitelen tässä kappaleessa suuntaviivoja ja ehdotuksia OL3- laitoksella tehtävään suorituskyvyn valvontaan ja laitosmittauksiin vuosihuoltojen yhteydessä. OL3- laitoksen käyttöönoton valmistumisen aikataulu on siirtynyt eteenpäin tämän tutkimustyön aikana ja käyttöönoton aikaisia suorituskyvykokeiden tuloksia ei ole päästy hyödyntämään tässä työssä eikä myöskään validoimaan käytännössä metodia suorituskyvyn määrittämiseksi.

Tämän tutkimustyön aikana on vahvistunut näkemys siitä, että suorituskyvyn valvonta ja laitosmittaukset vuosihuoltojen yhteydessä liittyvät vahvasti samaan kokonaisuuteen, eli hyvään laitoksen suorituskyvyn ylläpitoon ja kehittämiseen. Kumpaakin tulee tehdä laitoksen omilla mittauksilla ja pyrkimyksenä on hakea muutosta, ei absoluuttista totuutta. Ei ole tarkoituksenmukaista analysoida mittauksen stabiilisuutta tai mittauksen epävarmuutta. Kun suorituskyvyssä nähdään muutosta heikompaan, syy siihen tulee analysoida ja korjaavat toimenpiteet tulee määritellä. Korjaavien toimenpiteiden ajankohta tulee myöskin määritellä. Suorituskyvyn jatkuvan valvonnan kautta voidaan suunnitella tarkempia mittauksia vuosihuoltojen yhteydessä tehtäviin mittauksiin. Ajantasainen kuva prosessin tilasta ja komponenteista antaa aikaa suunnitella vuosihuoltojen yhteydessä tehtäviä mittauksia. Ennen vuosihuoltoa tehtävissä mittauksissa ei pitäisi tulla enää vastaan yllätyksiä, joiden perusteella olisi tarpeen suunnitella lisätöitä vuosihuoltoon. Vuosihuollon jälkeisillä mittauksilla vahvistetaan, että laitoksen suorituskyky on vähintään yhtä hyvä kuin ennen vuosihuoltoa ja että toteutetut korjaukset, laitosmuutokset ja huollot ovat onnistuneita.

Laitoksen suorituskyvyn valvonta koostuu laitostason mittaustiedosta. Jos siinä huomataan poikkeamaa, viedään analyysi tarkemmaksi ja tarvittaessa komponenttitason analyysiksi. Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien mittausten tulee olla tarkempia mittauksia, ja niitä

voidaan räätälöidä sen mukaan mitä töitä vuosihuollossa tehdään. Suorituskyvyn valvonta tulee kehittymään teknisesti, hallinnollisesti ja myöskin organisaatiotasolla käyttöönoton edistyessä. Tämä on jatkuvaa työtä sekä kehittämistä ja vaatii yritykseltä panostuksia, jotta sitä voidaan tehdä laadukkaasti. TVO on selvästi osoittanut, että se haluaa asiaan panostaa ja kehittää suorituskyvyn valvontaa osana laitoksen turvallista käyttöä.

## 8.1 Suorituskyvyn valvonta tehoajolla

Käyttövuorot valvovat ydinvoimalaitoksen käyttöä jatkuvasti ja omalta osaltaan valvovat täten myös laitoksen suorituskykyä. OL3- laitoksella on pääpaino edelleen laitoksen käyttöönotossa. Käyttöhenkilökunta valvoo laitosta ja reagoi muutoksiin. On kuitenkin huomioitava, että jos ei tule prosessihälytystä tai poikkeama ei tule esiin kiertoiltojen tarkastuksessa tai käyttömiesten kierroksilla, suorituskyvyn heikkenemisen huomaaminen perustuu sattumaan. Sen vuoksi olisi hyvä lisätä laitostason suorituskykyindikaattorit myös vuoron kiertoiltaan. Päivävuorossa voidaan tehdä tarkemmat analyysit suorituskyvyn poikkeamista. Kokemuseräisesti voi todeta, että toistaiseksi OL3- laitoksella käyttötoiminnassa korostuvat turvallisuuteen liittyvät tekijät. Tämä on ydinvoimalaitoksen käyttötoiminnassa toki edellytyskin, mutta mitä lähempänä laitoksen normaalia käyttöä ollaan, sitä enemmän tulisi ottaa mukaan suorituskykyyn liittyviä tekijöitä, turvallisuudesta kuitenkin tinkimättä. Esimerkkinä voi tuoda esiin vuodonvalvonnan, jota tehdään toistaiseksi vain primääripiiristä ja se perustuu TTKE-ehtoihin ja turvallisuuteen, eikä niinkään laitoksen suorituskykyyn. Laitostason suorituskykyindikaattoria voitaisiin käsitellä myös aamukokouksissa, jolloin eri organisaatioille välittyä ajankohtainen kuva laitoksen suorituskyvystä.

Jotta laitoksen tilaa voidaan verrata lähtötilanteeseen, tulee referenssituloksina käyttää käyttöönoton yhteydessä tehtävää suorituskykykoetta tai myöhemmin tehtävää takuukoetta, joita käsiteltiin aikaisemmissa kappaleissa. Tulevan käytön aikainen suorituskyvyn valvonta tehdään laitoksen omilla mittauksilla ja se soveltuu hyvin myös päivittäiseen mittaukseen. Taulukossa 11. esitetyt mittapisteet riittävät päivittäiseen laitostason suorituskyvyn valvontaan.

Taulukko 11. Päivittäinen suorituskyvyn valvonta.

KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
3 OJSB00 FJ610X XQ61	Reaktorin lämpöteho	%
3 0MKY10 DE503 ZQ01	COS PHI	
3 0PAB01 CT001 XQ01	Meriveden lämpötila	°C
3 ACA00 CE003 XQ01	Nettoteho	MW
3 0BBT01 CE003 XQ01	Laitosmuuntajan pätöteho	MW
3 0BBT02 CE003 XQ01	Laitosmuuntajan pätöteho	MW

Reaktorin lämpötehomittaus kalibroidaan määräaikauskokeilla NTM JR146-2 tai JR192-2, ja se tehdään joko 12 kalenteripäivän välein tai korkeintaan 8EFPD (Effective Full Power Day) välein. Täydellä teholla mittaus suoritetaan käytännössä kerran viikossa. Tätä kalibrointimittausta pidetään luotettavana ja sitä tullaan käyttämään myös takuukokeessa. (Laminpää, 2022). Luotettavin tulos termisestä tehosta saadaan heti kalibroinnin jälkeen. Reaktorin lämpötehon määrittelyyn käytetään taulukossa 12 esitettyjä mittauksia.

Taulukko 12. Reaktorin lämpötehon määrittelyyn liittyvät mittaukset (Secondary heat balance commissioning worksheet, 2021)

Höyrystin	KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
1	3 0LAB60 CF001	Syöttövesivirtaus	m <sup>3</sup> /h
1	3 0LAB60 CT002	Syöttöveden lämpötila	°C
1	3 0LCQ10 CF001	Höyrystimen ulospuhallusvirtaus	kg/s
1	3 0LBA10 CP003	Höyrynpaine	barg
2	3 0LAB70 CF001	Syöttövesivirtaus	m <sup>3</sup> /h
2	3 0LAB70 CT002	Syöttöveden lämpötila	°C
2	3 0LCQ20 CF001	Höyrystimen ulospuhallusvirtaus	kg/s
2	3 0LBA20 CP003	Höyrynpaine	barg
3	3 0LAB80 CF001	Syöttövesivirtaus	m <sup>3</sup> /h
3	3 0LAB80 CT002	Syöttöveden lämpötila	°C
3	3 0LCQ30 CF001	Höyrystimen ulospuhallusvirtaus	kg/s
3	3 0LBA30 CP003	Höyrynpaine	barg
4	3 0LAB90 CF001	Syöttövesivirtaus	m <sup>3</sup> /h
4	3 0LAB90 CT002	Syöttöveden lämpötila	°C
4	3 0LCQ40 CF001	Höyrystimen ulospuhallusvirtaus	kg/s
4	3 0LBA40 CP003	Höyrynpaine	barg



Ideana päivittäisessä suorituskyvyn valvonnassa on, että mitattu nettoteho korjataan meriveden lämpötilan ja generaattorin tehokertoimen *COS PHI* korjauskertoimilla ja tuloksena saadaan nimellisteho.

Korjauskäyrät ovat esitettynä liitteissä 7–9. Ominaislämmönkulutus saadaan, kun jaetaan reaktorin lämpöteho nimellisteholla. Pääindikaattoreina on siis nimellisteho *NRO* sekä ominaislämmönkulutus *MHR*.

Omakäyttömuuntajien tehomittausten avulla voidaan nähdä muutoksia laitoksen omakäyttötehossa. Siinä tulee ottaa huomioon muutokset, jotka aiheutuvat järjestelmistä, joita käytetään vain satunnaisesti. Yksi tällaisista järjestelmistä on KBF- järjestelmä, jonka avulla käsitellään jäähdytettä ja erotetaan boori varastointitankeissa olevasta jäähdytteestä.

Päivittäisessä suorituskyvyn valvonnassa ei ole tarpeen tehdä mittausjaksoja ja laskea keskiarvoa mittauksista. Riittävän luotettava lukema saadaan, jos laitos on stabiilissa tilassa ja lukuarvot luetaan tietynä ajankohtana.

Jos laitostason suorituskyvyssä ilmenee heikkenemistä, on päivävuoron tehtävä viedä analyysi pidemmälle ja selvittää syy suorituskyvyn heikkenemiseen.

## 8.2 Laitosmittaukset vuosihuoltojen yhteydessä.

Mittauksilla arvioidaan laitoksen tilaa ennen ja jälkeen vuosihuollon. Tämän vuoksi mittaukset tehdään laajempaan ja niitä voidaan räätälöidä tarpeen mukaan. Mittaukset tehdään lähtökohtaisesti laitoksen omilla mittauksilla. Laitosmuutosten yhteydessä voidaan mittauksia tehdä tarkemmilla mittauksilla ja hyödyntää standardeja niihin liittyvien mittausten suunnittelussa. Mittausajankohtaa päätettäessä tulee ottaa huomioon kappaleissa 2.6.2 sekä 2.6.3 esitetyt tekijät.

### 8.2.1 Mittausolosuhteet ja mittausten suoritus

Laitostason mittaus tehdään samalla periaatteella kuin kappaleessa 7.2. Erona kuitenkin on, että mittaukset voidaan lukea pidemmältä mittausjaksolta, josta lasketaan keskiarvot. Mahdolliset poikkeamat mittaustuloksissa tulee selvittää, jotta mittaus on riittävän luotettava. Ennakkoehdoina mittauksille:

- Laitosmittaukset ennen vuosihuoltoa on hyvä tehdä ennen venytysajon alkamista ja 100 %:n reaktoriteholla, tai lähellä sitä.
- Laitoksen tulee olla stabiili, ACT (Average Coolant Temperature)  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .
- Laitoksen tulee olla turvallisuusteknisten käyttöehtojen sekä käyttökirjan mukaisessa tilassa ja suorituskykyyn vaikuttavat tekijät, kuten hälytykset, kirjataan ylös.
- Tarkin tulos mittauksille saadaan, kun mittaukset tehdään samaan aikaan kun reaktorin lämpöteho kalibroidaan. Reaktorin lämpötehon kalibrointia varten tehtävä mittaus kestää 20 minuuttia ja mittauksen leimausväli on viisi sekuntia. Käytetään samaa mittausjaksoa ja mittausväliä myös muissa mittauksissa.
- Kirjataan ylös paineistimen vastusten, KBA-järjestelmän pumppujen sekä satunnaisesti käytössä olevien järjestelmien tilatiedot.
- Kirjataan ylös edellinen lukema primääripiirin tunnistetusta ja tunnistamattomasta vuodosta.
- Sekundääripiirin vuoto arvioidaan lauhduttimen pinnan muutoksesta pidemmällä aikavälillä.
- Takuukokeen yhteydessä on suunniteltu tehtävän sekundääripiirin eristys, jonka avulla voidaan mitata tunnistamaton vuoto ja löytää mahdollisesti vuotavat venttiilit. Eristyksen yhteydessä, siihen liittyvä ohje validoidaan ja varmistetaan sen toimivuus käytännössä. Sekundääripiirin vuodon suuruudesta riippuen voidaan sekundääripiirin eristys tehdä tarvittaessa ja varmistaa sekä paikallistaa sekundääripiirin vuodot validoidun ohjeen avulla.

- Generaattorin napajännitteen säätö tulee olla automaattilla. Tällöin 400kV:n kantaverkon jännitteen vaihtelu ei vaikuta *COS PHI* arvoon. Tällöin loisteho pysyy vakiona ja se lisää mittausten stabiilisuutta ja luotettavuutta. Liitteessä 16 olevasta PICS- näyttökuvasta nähdään generaattorin säätömahdollisuudet.

### 8.2.2 Mittaustietojen keruu

TOPAS- järjestelmän avulla voidaan luoda mittausjakso, haluttu mittausväli ja mittausryhmät halutuille mittauksille. TOPAS- järjestelmä tallentaa kaikki tapahtumat kovalevyille ja kovalevyn tullessa täyteen, poltetaan tallennettu tieto DVD:lle. TOPAS hakee automaattisesti tietoa myös poltetuilta DVD- levyiltä. Näin ollen arkistoitua laitosdataa voidaan hakea jälkeempään vielä pitkänkin ajan jälkeen, jos halutaan analysoida mittaustuloksia tai laajentaa mittauksia jälkikäteen. Liitteessä 24 on esitetty näyttökuva TOPAS- työkalun käytöstä. Mittausdata voidaan viedä Excel- ohjelmaan käsiteltäväksi.

Primääripiirin vuotomäärää valvotaan rutiininomaisesti kerran vuorokaudessa ja kirjataan viimeisin tulos ylös. Toistaiseksi luotettavimmaksi metodiksi on osoittautunut vuotomäärään arvioiminen KBA20BB001 tankin pinnanmuutoksen avulla. Sekundääripiirin vuotomäärä voidaan arvioida lauhduttimen pinnanmuutoksen avulla.

### 8.2.3 Mitattavat kohteet ja tulosten analysointi

Laitostason suorituskykyindikaattoreiden lisäksi arvioidaan tärkeimpien komponenttien kuten höyrystimien, lauhduttimien, korkeapaine-esilämmittimien ja kosteudenerottimen suorituskykyä. Tämän lisäksi seurataan omakäytösähkön kulutusta.

Kappaleessa 5.3.2 on esitetty indikaattori höyrystimen suorituskyvyn arvioimiseksi. Höyrystimen kokonaislämmönsiirtokertoimen laskenta on esitetty kaavoissa 7,8 ja 9.

Höyrystimen lämmönsiirtopinta-ala on  $7960\text{m}^2$  (Framatome,2021). Mittapisteeet, jotka tarvitaan höyrystimen laskennassa, on esitetty taulukossa 13. Tämän lisäksi käytetään apuna taulukon 12 mittaustuloksia, joiden avulla määritellään laskennassa tarvittavat syöttöveden ja höyryn entalpiat. Määrittelyssä käytetään apuna IAPWS97 mukaista taulukkoa (IAPWS, 1997).

Taulukko 13. Mittapisteeet höyrystimen suorituskyvyn laskentaa varten.

Höyrystin	KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
1	3 OJEC10 FT601	Kuuman haaran lämpötila	°C
1	3 OJEC10 FT602	Kylmän haaran lämpötila	°C
1	3 OJSA00 FF755X	Höyryvirtaus	kg/s
2	3 OJEC20 FT601	Kuuman haaran lämpötila	°C
2	3 OJEC20 FT602	Kylmän haaran lämpötila	°C
2	3 OJSB00 FF755X	Höyryvirtaus	kg/s
3	3 OJEC30 FT601	Kuuman haaran lämpötila	°C
3	3 OJEC30 FT602	Kylmän haaran lämpötila	°C
3	3 OJSC00 FF755X	Höyryvirtaus	kg/s
4	3 OJEC40 FT601	Kuuman haaran lämpötila	°C
4	3 OJEC40 FT602	Kylmän haaran lämpötila	°C
4	3 OJSD00 FF755X	Höyryvirtaus	kg/s

Kosteudenerottimen tehokkuuden laskenta on esitetty kaavassa 13. Höyrynvirtausta eikä myöskään höyryn kosteutta mitata korkeapaine- ja matalapaineturbiinin välillä. Kaavan 13 mukaista suorituskyvyn arviointia ei voi siis tehdä laitosmittauksilla. Välitulistin on kaksivaiheinen, joten myöskään kaavan 14 mukainen arviointi ei sovellu käytettäväksi.

Välitulistimen suorituskykyä voidaan arvioida vertailemalla prosessiparametrejä referenssivaihtoihin. Kaavan 15 mukainen suorituskyvyn arviointi voidaan tehdä vertaamalla höyrynpaineen arvoja ennen ja jälkeen välitulistimen. Ennen välitulistinta olevat painemittaukset ovat ennen välitulistinta 3 OLBj61 BB001 olevassa putkilinjassa. Välitulistinta 3 LBJ62 BB001 ennen olevassa putkilinjassa ei ole asennettu painemittauksia. Suorituskykyä arvioidaessa voidaan käyttää yhteistä painemittausta 3 OLBC10CP001. Taulukossa 14. on esitetty prosessiarvoja välitulistimen suorituskyvyn arviointiin.

Taulukko 14. Mittapisteet välitulistimen suorituskyvyn arviointiin.

Välitulistin	KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
3 0LBJ61 BB001	3 0LBC10 CP001	Höyrynpaine ennen kosteudenerotinta	barg
3 0LBJ61 BB001	3 0LBB10 CT001	Höyryn lämpötila välitulistimen jälkeen	°C
3 0LBJ61 BB001	3 0LBB10 CP001	Höyryn paine välitulistimen jälkeen	barg
3 0LBJ62 BB001	3 0LBB20 CT001	Höyryn lämpötila välitulistimen jälkeen	°C
3 0LBJ62 BB001	3 0LBB20 CP001	Höyryn paine välitulistimen jälkeen	barg
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ76 CF001	Vaihe 1 höyryvirtaus	kg/s
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ76 CP001	Vaihe 1 höyrynpaine	barg
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ77 CF001	Vaihe 1 höyryvirtaus	kg/s
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ77 CP001	Vaihe 1 höyrynpaine	barg
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ61 CF001	Vaihe 2 höyryvirtaus	kg/s
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ61 CP011	Vaihe 2 höyrynpaine	barg
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ61 CT011	Vaihe 2 höyryn lämpötila ennen välitulistinta	°C
3 0LBJ61 BB001	3 0LBJ61 CT026	Vaihe 2 höyryn lämpötila välitulistimen jälkeen	°C
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ62 CF001	Vaihe 2 höyryvirtaus	kg/s
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ62 CP011	Vaihe 2 höyrynpaine	barg
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ62 CT011	Vaihe 2 höyryn lämpötila ennen välitulistinta	°C
3 0LBJ62 BB001	3 0LBJ62 CT026	Vaihe 2 höyryn lämpötila välitulistimen jälkeen	°C
3 0LBJ61 BB001	3 0LCT11 CT001	Kosteudenerottimessa poistetun veden lämpötila	°C
3 0LBJ62 BB001	3 0LCT21 CT001	Kosteudenerottimessa poistetun veden lämpötila	°C

Lauhduttimen suorituskykyä voidaan arvioida kaavojen 16,17 ja 18 avulla. Niissä lasketaan lämpökuorma, logaritminen lämpötilaero ja lämmönsiirtokerroin. Kaavassa 19 esitetyn CLF- kertoimen laskemiseksi tarvittaisiin arvoja HEI standardista (Standards for Steam Surface Condensers, Heat Exchange Institute, 2017), mikä ei ole tällä hetkellä saatavissa TVOlla, joten sitä ei määritellä tässä tarkemmin. Meriveden jäähdytysvirtausta ei mitata laitosmittauksilla mutta suunnitteluarvo yhdellä pumpulla on 13173 kg/s ja normaalilla tehoajolla on kaikki neljä pumpua käynnissä. Lauhduttimien lämmönsiirtoala on 108037 m<sup>2</sup> (Areva, 2021). Lauhduttimen suorituskyvyn arviointiin tarvittavat mittapisteet on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Lauhduttimen suorituskyvyn arviointiin tarvittavat mittapisteet.

<b>KKS Tunnus</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Yksikkö</b>
3 0PAB001 CT001	Meriveden lämpötila ennen lauhdutinta	°C
3 MAG10FP002	Lauhduttimen paine	bara
3 MAG20FP002	Lauhduttimen paine	bara
3 MAG30FP002	Lauhduttimen paine	bara
3 0PAB31 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C
3 0PAB32 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C
3 0PAB33 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C
3 0PAB34 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C
3 0PAB35 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C
3 0PAB36 CT001	Meriveden lämpötila lauhduttimen jälkeen	°C

Korkeapaineisten esilämmittimien suorituskykyä voidaan arvioida kaavoissa 20 ja 21 esitettyjen *TTD*- sekä *DCA*- arvojen avulla. OL3- laitoksella on kaksi korkeapaineista esilämmittyslinjaa käytössä, kuten liitteenä 2 olevassa kuvassa on havainnollistettu. Yksi linja koostuu A6- ja A7- esilämmittimestä sekä välitulistimen toisen vaiheen jäähdyttimestä. Taulukossa 16 on esitetty mittapisteet korkeapaine-esilämmittimien suorituskyvyn arviointiin. Taulukossa olevien mittausten perusteella voidaan arvioida kumpaakin esilämmitysketjua ja jostaista lämmönvaihdinta erikseen. Väliottohöyryn saturaatiolämpötilan määrittelyssä käytetään apuna IAPWS97 mukaista taulukkoa (IAPWS, 1997).

Taulukko 16. Korkeapaine-esilämmittimien suorituskyvyn arviointiin tarvittavat mittapisteet.

Esilämmityslinja	KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
LAB31	3 0LAB31 CT001	Syöttöveden lämpötila ennen esilämmitystä	°C
LAB31	3 0LAB31 CT002	Syöttöveden lämpötila A6 esilämmittimen jälkeen	°C
LAB31	3 0LAB31 CT003	Syöttöveden lämpötila A7 esilämmittimen jälkeen	°C
LAB31	3 0LAB31 CT004	Syöttöveden lämpötila välitulistimen jäähdyttimen jälkeen	°C
	3 0LAB20 CP901	Syöttöveden paine ennen esilämmitystä	barg
	3 0LAB40 CP901	Syöttöveden paine esilämmityksen jälkeen	barg
LAB31	3 0LCS21 CT001	Välitulistimen 2. vaiheen höyryn lämpötila	°C
LAB31	3 0LCS21 CT002	Välitulistimen lauhteen lämpötila jäähdyttimen jälkeen	°C
LAB31	3 0LCS21 CF001	Välitulistimen lauhteen virtaus jäähdyttimen jälkeen	kg/s
LAB31	3 0LBQ71 CT001	Väliottohöyryn A7 lämpötila	°C
LAB31	3 0LCH71 CT001	A7 esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
LAB31	3 0LCH71 CF001	A7 esilämmittimen lauhteen virtaus	kg/s
LAB31	3 LBQ61 CT001	Väliottohöyryn A6 lämpötila	°C
LAB31	3 0LCH61 CT001	A6 esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
LAB31	3 0LCH71 CF001	A7 esilämmittimen lauhteen virtaus	kg/s
LAB32	3 0LAB32 CT001	Syöttöveden lämpötila ennen esilämmitystä	°C
LAB32	3 0LAB32 CT002	Syöttöveden lämpötila A6 esilämmittimen jälkeen	°C
LAB32	3 0LAB32 CT003	Syöttöveden lämpötila A7 esilämmittimen jälkeen	°C
LAB32	3 0LAB32 CT004	Syöttöveden lämpötila välitulistimen jäähdyttimen jälkeen	°C
LAB32	3 0LCS22 CT001	Välitulistimen 2. vaiheen höyryn lämpötila	°C
LAB32	3 0LCS22 CT002	Välitulistimen lauhteen lämpötila jäähdyttimen jälkeen	°C
LAB32	3 0LCS22 CF001	Välitulistimen lauhteen virtaus jäähdyttimen jälkeen	kg/s
LAB32	3 0LBQ72 CT001	Väliottohöyryn A7 lämpötila	°C
LAB32	3 0LCH72 CT001	A7 esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
LAB32	3 0LCH72 CF001	A7 esilämmittimen lauhteen virtaus	kg/s
LAB32	3 LBQ62 CT001	Väliottohöyryn A6 lämpötila	°C
LAB32	3 0LCH62 CT001	A6 esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
LAB32	3 0LCH72 CF001	A7 esilämmittimen lauhteen virtaus	kg/s

Lisäksi voidaan arvioida suorituskykyä yksittäisten mittapisteiden avulla, jotka voivat olla venttiilien asentoja, virtausmittauksia, painemittauksia, sähkötehomittauksia tai lämpötilamittauksia. Lämmönvaihtimien suorituskyvyn arviointiin voidaan käyttää muuallakin kuin korkeapaine-esilämmittimissä *DCA*- tai *TTD*- arvoja. Esimerkkinä yksittäisen mittapisteen tarkkailusta voidaan nostaa esiin generaattorin vetypaine, jolla on suora vaikutus

suorituskykyyn. Liitteessä 25 on esitetty mittapistelistä, jonka avulla saadaan tarkempi kuvaus sekundääripiirin olosuhteista.



## 9. Johtopäätökset

Tutkimustyön tavoitteena oli kehittää vuosihuoltojen yhteydessä suoritettavat mittaukset suorituskyvyn valvontaan. Keskeisimmät johtopäätökset on esitetty myös tiivistettynä kapaleen lopuksi. Työtä on tehty aikana, jolloin OL3-laitoksen käyttöönotossa on ladattu polttoaine reaktoriin, reaktori on tehty kriittiseksi, generaattori on tahdistettu verkkoon ja laitostehoa on nostettu n. 60 %:n teholle. Olen toiminut vuorossa reaktoriohjaajana ja tehnyt tutkimustyötä suorituskykymittauksista vuorossa työskentelyn ohella. Laitosprojektin käyttöönotto on viivästynyt ja se on vaikuttanut siihen, miten suorituskykyyn liittyviä mittauksia on päästy tekemään käytännössä ja arvioimaan laitoksen suorituskykyä käyttöönoton aikana. Tässä työssä on luotu raakaversio mittauksista ja menettelyistä, joita voitaisiin tulevaisuudessa tehdä vuosihuoltojen yhteydessä sekä käyttöjakson aikana.

Taustana mittauksille on käytössä olleet menettelyt OL1- ja OL2-laitoksella, käyttöönoton aikaiset suorituskykymittaukset OL3- laitoksella, OL3- takuumittaus sekä kokemukset siitä miten muualla maailmassa valvotaan suorituskykyä. Työn tavoitteena oli tehdä kevyempi menettely verrattuna OL1- ja OL2- laitosten mittauksiin sekä hakea mittauksilla tietoa muutoksista laitoksen suorituskyvyssä, eikä niinkään kiinnittää huomiota mittauksen virheen tai luotettavuuden arviointiin tieteellisellä menetelmällä ja siten hakea absoluuttisesti oikeaa mittaustietoa prosessista. Tavoitteena oli luoda työkalu suorituskyvyn arviointiin, jonka perusteella voidaan analysoida tarkemmin muutoksen syitä ja voidaan tehdä päätöksiä korjaavista toimenpiteistä. Tarkoituksena oli muodostaa mittaukset laitoksen kiinteillä prosessimittauksilla eikä käyttää erikseen lisättäviä tarkkuusmittareita arvioitaessa suorituskykyä.

Metodit suorituskyvyn arvioinnissa ja mittaamisessa jatkuvat tämän työn jälkeenkin ja ne rakentuvat samalla kun käyttöönoton aikaiset mittaukset ja kokeet saadaan tehtyä. Myös takuukokeen koeohjelma on vielä kehitysasteella. Takuukokeen yhteydessä saatavat kokemukset tulee analysoida ja ottaa huomioon tulevaisuudessa tehtävässä suorituskyvyn valvonnassa. On tärkeää, että suorituskykyyn kiinnitetään organisaatiossa huomiota, tunnustetaan tekijät ja laaditaan oikeat mittarit suorituskyvyn arvioimiseksi. Mitä reaaliaikaisempaa

tietoa saamme suorituskyvystä, sitä nopeammin pystymme käynnistämään korjaavia toimenpiteitä suorituskyvyn palauttamiseksi.

Laitostason suorituskyvynvalvontaa voidaan tehdä käyttövuorossa ja sen tekeminen voitaisiin lisätä kiertolistaan ja käsitellä aamukokouksissa. Tarkempaa analyysiä voidaan tehdä esimerkiksi viikkotasolla päivävuorossa olevan henkilöstön toimesta. Tällöin pystytään seuraamaan suorituskykyä koko käyttöjakson aikana ja käynnistämään hyvissä ajoin työsuunnittelu vuosihuoltoa varten.

Työssä tuli tarkasteltua suorituskykyyn liittyviä tekijöitä laajemmin kuin työn otsikko antaa ymmärtää. Työn edetessä sisältö laajentui vuosihuoltojen yhteydessä tehtävistä mittauksista käsittelemään suorituskyvyn valvontaa myös päivittäin.

Ydinvoimalaitosta pyritään ajamaan 100 %:n teholla sen käyttöjakson aikana. OL3- laitosta saatetaan käyttää pienemmällä tehotasolla ulkoisten tekijöiden kuten järjestelmäsuojan tai sähkömarkkinoiden vuoksi. Laitosmittaukset tulisi tehdä täydellä 100 %:n teholla, jotta tuloksia voidaan verrata keskenään. Mittaukset, joita käytetään suorituskyvyn arvioinnissa, tulee kalibroida säännöllisin väliajoin, jotta mittaukset ovat mahdollisimman luotettavia. Mittaukset tulee käydä läpi kunnossapidon kanssa ja tarkastaa mittalaitteiden kalibrointiväli. On tärkeää, että laitos on stabiilissa tilassa, kun mittauksia tehdään. Vuotojen arvioinnissa voidaan käyttää apuna käyttövuoron ylläpitämää raportointia. Sitä tulee kehittää vielä sekundääripiirin osalta. On tärkeää, että väliaikaisesti käytössä olevat järjestelmät kirjataan ylös, koska ne vaikuttavat laitoksen omakäyttösähkön kulutukseen ja siten nettotehoon, joka valtakunnan verkkoon syötetään.

LCQ- järjestelmä, höyrystimen ulospuhallusjärjestelmä, on yksi esimerkki järjestelmästä, jonka käyttötila mittauksen aikana on noussut esiin keskusteluissa. Takuumittauksen aikana sen tulee olla eristetty, koska se on sopimuksessa määritelty. Näkemys liittyen käyttöönoton aikana tehtäviin mittauksiin ja tulevaisuudessa tehtäviin mittauksiin on, että järjestelmä pidetään käytössä. LCQ- tankista höyry johdetaan syöttövesisäiliöön ja taas vesi ajetaan lämmönvaihtimen, ja suodatuksen kautta takaisin sekundääripiirin kierto.

Lämmönvaihtimessa lämmitetään lauhdevettä, eli LCQ- ulospuhalluksen kautta poistuva energia otetaan lämmön talteenoton kautta hyödyksi prosessissa, ja näin sen aiheuttama prosessihäviö ei ole niin suurta. Järjestelmää tarvitaan huolehtimaan sekundääripiiriin vesikemialta ja varsinkin höyrytimen johtokyvyn kannalta sillä on suuri merkitys. Jos johtokyky ylittää TTKE- rajan, laitoksen käyttöön voi tulla käyttörajoituksia. Järjestelmän palautus eristyksen jälkeen kestää joitakin tunteja, mikä lisää järjestelmän epäkäytettävyysaika mittaukseen tarvittavan ajan lisäksi.

Laitoksen prosessimittausdataa saadaan muokattua ja käsiteltyä TOPAS- järjestelmän avulla. Historiatiedot tallentuvat kovalevyille ja DVD- levyille, joten mittauksia voidaan tarkentaa ja lisätä helposti myös jälkikäteen. Mittausryhmät, ajankohdat ja mittausväli voidaan asettaa hakuehdoiksi ja siirtää mittaustiedot Excel- ohjelmaan jatkokäsittelyä varten.

Prosessimallin käyttäminen osana suorituskvyn valvontaa on yksi mahdollisuus liittyen tulevaisuuteen ja sen hyödyntäminen OL3- laitoksella on vasta hahmottumassa. Fortumin Solvo- ohjelmisto on tulossa käyttöön ja Siemensin mahdollisesti toimittamasta Krawal- ohjelmiston käyttämisestä tai ylipäätään sen toimittamisesta on vielä epävarmuuksia. Keskusteluja digitaalisen kaksoson tai termodynaamisen kaksoson hankinnasta on käyty toistaiseksi Framatomen ja Siemensin kanssa. Itse olen hankinnan kannalla, riippuen toki sopimuksen yksityiskohdista. Sen käyttö antaisi paljon mahdollisuuksia suorituskvyn valvontaan ja tukea oikea-aikaisiin päätöksiin liittyen korjaaviin toimenpiteisiin. Järjestelmän kehittäminen, rakentaminen ja ylläpito vaatii myös resursseja ja onkin tärkeää, että TVO kehittäisi sen yhdessä toimittajan kanssa, jolloin järjestelmän käyttöön, datan käsittelyyn ja ylläpitoon liittyvää palvelua ei tarvitsisi hankkia kokonaan toimittajalta, vaan omistajuus näkyisi järjestelmän käytössä. Digitaalisessa kaksosessa mittaustiedot viedään malliin reaaliaikaisena ja tuloksia verrataan referenssitilaan, jolloin saadaan suorituskvystä reaaliaikaista dataa. Tiedot voidaan viedä verkkoon ja pilveen ja tuloksia voidaan analysoida tarvittaessa toimittajan puoleltakin. Järjestelmän käyttöön liittyy tietoturvallisuuden kannalta tärkeitä kysymyksiä, jotka tulee aukottomasti ratkaista ennen päätöstä.

Laitosmittapisteiden valinnassa on pyritty saamaan mahdollisimman kattava kuva prosessista. Mittapisteiden avulla voidaan analysoida höyrytimien, lauhduttimen, kosteuden

erottimien, välitulistimen ja esilämmittimien suorituskykyä. Mittausten avulla voidaan tarkastella myös sekundääripiirin suurimpia yksittäisiä lämmönvaihtimia. Mittapisteyden valintaa tehdessä tuli esiin se, että suorituskyvyn valvontaan liittyviä mittauksia olisi tarpeen lisätä prosessiin. Esimerkkeinä lisättävistä mittauksista voidaan mainita meriveden virtausmittaukset sekä toiseen välitulistimeen liittyvä painemittaus. Tulevaisuudessa täytyy kartoittaa mitä mittauksia on tarpeen lisätä, jotta voidaan tehdä huolellista komponenttitason suorituskykyvalvontaa.

Vuosihuoltoa ennen tehtävällä mittauksella tarkastetaan prosessin tila ja välitetään organisaation sisällä tietoa poikkeamista. Tarpeen vaatiessa korjaavia töitä viedään työsuunnitelun kautta toteutukseen. Vuosihuollon jälkeisiä mittaustuloksia verrataan ennen vuosihuoltoa tehtäviin mittauksiin, jolloin nähdään tehtyjen töiden vaikutus suorituskykyyn. Mittauskohteita voidaan myös räätälöidä sen mukaan, mitä töitä ja mahdollisesti laitosmuutoksia vuosihuollossa tehdään. Varsinkin laitosmuutosten osalta voidaan harkita tarkempia mittauksia, jotta voidaan todentaa niihin liittyvät sopimusvelvoitteet myös täytetyksi. Näissä mittauksissa voidaan sopia, että niitä tehdään standardien mukaan. Yksi kehitysehdotus onkin kartoittaa, että TVO:lla käytettävissä kaikki oleelliset standardit ja niiden viimeisimmät versiot. ASME- standardien osalta tuli ainakin esiin puutteita.

Suorituskyvyn valvonta on tärkeä osa vastuullista ydinvoimalaitoksen käyttöä. Tuotetun energian määrää voidaan lisätä, kun pidetään huolta suorituskyvystä. OL3- laitoksen osalta voi pieneltä tuntuvat häviöt olla suuria, kun laitetaan asiat mittakaavaan. OL3- laitos on suuri tuotantoteholtaan ja prosentin suorituskyvyn parantamisella saadaan jo useita megawattitunteja parannettua energiantuotantoa, joka on pois esimerkiksi fossiilisesta energiantuotannosta. Onkin tärkeää, että käyttöönoton aikana luodaan jo menettelyitä tulevaisuutta varten ja ollaan valmiina laitoksen käyttöön. Suorituskyvyn valvonta on arkista työtä ja sitä voidaan kehittää jatkuvasti. On tärkeää ottaa myös oppia miten, suorituskyvyn valvontaa tehdään muilla laitoksilla ympäri maailman. On tärkeää, että laitoksen käyttöönotto viedään loppuun ja varmistetaan että suorituskyky on hyvä, kun laitos otetaan vastaan. Suorituskyky varmistetaan luotettavien mittausten avulla. Käyttöönoton aikana voidaan kehittää vuosihuoltojen yhteydessä tehtäviä mittauksia ja menetelmiä. Tarkastellaan myös uuden teknologian tuomat

mahdollisuudet suorituskyvyn valvomiseksi ja pyritään olemaan avoimia sen kehittämiseksi ja käytölle. Lopuksi on vielä tiivistettynä keskeisimmät havainnot työn aikana:

- Mittaustietoa laitoksen suorituskyvystä on tärkeää saada myös ajojakson aikana. Reaaliaikainen tieto suorituskyvystä tärkeää.
- Käyttöönoton aikaisten suorituskykymittausten tulokset ja metodi tulee arvioida.
- Takuukokeen tuloksien ja menettelyjen arviointi tulevassa suorituskyvyn arvioinnissa.
- Muutoksen arviointi suorituskyvyssä tärkeää, ei niinkään absoluuttisen totuuden tai mittauksen luotettavuuden arviointia.
- Mittaukset tehdään laitoksen kiinteillä prosessimittauksilla.
- Toimivien suorituskykyindikaattorien valinta suorituskyvyn arvioinnissa oleellista.
- Organisaation ja yrityksen panokset tärkeitä suorituskyvyn arvioinnissa. Tärkeää erottaa käyttövuoron tekemä suorituskyvyn arviointi ja syvällisempi analyysi, joka tehdään organisaatiossa päivätyönä.
- Järjestelmäsuojan ja sähkömarkkinoiden huomioiminen mittauksen ajankohdassa.
- Höyrystimen ulospuhallusjärjestelmä LCQ käytössä mittausten aikana.
- Validoidaan sekundääripiirin eristysohje takuumittauksen aikana ja käytetään myöhemmin, jos on tarpeen tehdä tarkempi vuodonvalvonta-analyysi.
- Vuodon määrittelyssä käytetään apuna käyttövuoron tekemää vuodonvalvontaraportointia.
- Suorituskyvyn valvontaan liittyvien mittausten kalibrointiväli tulee selvittää.
- Laitos tulee olla stabiilissa tilassa, kun suorituskykymittaus tehdään.
- Laitoksella on satunnaisesti käyviä järjestelmiä. Niiden tila tulee huomioida suorituskyvyn mittausten analysoinnissa ja pysäyttää mittausten ajaksi, jos mahdollista.

- TOPAS- työkalun avulla saadaan mittausdataa myös mittausten jälkeen, jos analyysiä halutaan syventää.
- Prosessimallin ja digitaalisen kaksosen käyttöä osana suorituskyvyn valvontaa tulee selvittää.
- Mittapisteitä tulee lisätä laitoksella, jos halutaan saada tarkempi kuva komponenttien suorituskyvystä.
- Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävät suorituskykymittaukset voidaan räätälöidä laitoksella tehtävien töiden mukaan.
- TVO:n standarditietokantaa tulee päivittää.
- Suorituskyvyn laadukkaalla valvonnalla ja korjaavilla toimenpiteillä voidaan parantaa sähköntuotantoa sekä saada aikaan taloudellista säästöä.
- Suorituskyvyn arvioimisen kehittäminen on jatkuva prosessi.

## Lähteet

TVO Oyj. 2021a. TVO-konserni [TVO:n [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 6.9.2021] Saatavissa: <https://www.tvo.fi/yhtio/hallintojajohtaminen/tvo-konserni.html>

TVO Oyj. 2021b. OL1 ja OL2 [TVO:n [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 24.1.2022] Saatavissa: TVO - Olkiluodossa tuotettiin viime vuonna noin kuudesosa Suomessa kulutetusta sähköstä

TVO Oyj. 2021c. OL3 [TVO:n [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 6.9.2021] Saatavissa: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3.html>

TVO Oyj. 2021d. Rakenne ja tekniset tiedot [TVO:n [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 7.9.2021] Saatavissa: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3/rakennejateknisetiedot.html>

TVO Oyj. 2021e. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 [TVO:n [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 7.9.2021] Saatavissa: <https://www.tvo.fi/ajankohtaista/julkaisut.html>

OL3- laitostuntemuksen perusteet kurssi. 2018: Teollisuuden voima Oyj.

OL3- laitostuntemuskurssi. OL3-turbiini apujärjestelmään sekä höyrynkulku höyrystelmältä lauhduttimeen. 2018: Teollisuuden voima Oyj.

OL3- Advanced course. Conventional island. 2011: Teollisuuden voima Oyj.

Mäkitalo, Ari. 2021. Merivesilämpötilojen vuorokausikeskiarvot. [yksityinen sähköposti] Lähetetty 20.9.2021 klo. 12.34.

OL3- laitostuntemuskurssi. Turbiinisaareke. 2018: Teollisuuden voima Oyj.

OL3- laitostuntemuksen syventävä kurssi. Konventionaaliset jäähdytysjärjestelmät. 2018: Teollisuuden voima Oyj.

Jaatinen- Värri, Ahti. 2018. Ydinvoimatekniikan peruskurssi: Lämpö- ja virtausoppi sekä lämmönsiirtimet. TVO Oyj. 81s.

OL3- laitostuntemuksen syventävä kurssi. Normaalit käyttötilanteet, ylös- ja alasajo. 2018: Teollisuuden voima Oyj.

Fingrid Oy. 2021. Olkiluoto 3:n järjestelmäsuoja [Fingridin [www.sivuilla.](http://www.sivuilla.fi)] [viitattu 11.10.2021] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/olkiluoto-3-kantaverkkoon/olkiluoto-3n-jarjestelmasuoja/>

TVO Oyj. 2021f. Muistio 191631, Suutehoakkuvarasto (BESS), esiselvitys. 27.1.2021. Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

TVO Oyj. 2021g. Operating manual, power operation OL3-2-1-1. Rev H. 15.4.2021. Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan

TVO Oyj. 2021h. OL3- vuosihuoltoryhmän pöytäkirja. 8.6.2021. Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Secondary Heat Balance commissioning worksheet (CWS31). Rev F. 25.2.2021. Saatavissa: TVO:n kronodoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

OL3 Plant efficiency test during commissioning phase D. Rev A. 26.3.2021. Saatavissa: TVO:n kronodoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

TI power transmission system, system description. FIN005-EDB-30BA, TI421621839. 2021. Saatavissa: TVO:n kronodoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Pirinen, Mirva, 2008. Laitosmittaukset turbiinilaitoksen suorituskyvyn seurantaan ydinvoimalaitoksen vuosihuoltojen yhteydessä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan koulutusohjelma.

TVO Oyj. 2021i. Laitosmittausten suorittaminen, laskenta ja raportointi. Asiakirjan Tunnus:139842. Julkaistu 27.6.2016. [viitattu 19.11.2021]. Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

IEC 60953-3:2001. Rules for steam turbine thermal acceptance tests, part 3: Thermal performance verification tests of retrofitted steam turbines. Switzerland: International Electrotechnical commission. ISBN 2-8318-6050-4

ASME 12.1-2015. 2015: Closed feedwater heaters. Performance Test codes codes report. USA: The American society of mechanical engineers. ISBN 9780791870501

ASME PTC 12.4-1992:1992. Moisture Separator reheaters. Performance test codes. USA: The American society of mechanical engineers. ISBN 0-7918-2205-2

ASME PTC 6-2004:2006. Performance Test Code 6 on Steam Turbines. Performance Test Codes. Revision of ASME PTC 6-1996. USA: The American Society of Mechanical engineers. ISBN 0-7918-2935-9



DIN 1943: 1975. Thermal acceptance tests of steam turbines. Standard by deutsche Institut Fur Normung E.V. (German National standard).

IEC 953-1:1990. Rules for steam turbine thermal acceptance tests, Part 1: Method A – High accuracy for large condensing steam turbines. Switzerland: International Electrotechnical commission.

IEC 60953-2:1990. Rules for steam turbine thermal acceptance tests, Part 2: Method B – Wide range of accuracy for various types and sizes of turbines. Switzerland: International Electrotechnical commission.

IEC 60953-3:2001. Rules for steam turbine thermal acceptance tests, Part 3: Thermal performance verification tests of retrofitted steam turbines. Switzerland: International Electrotechnical commission. ISBN 2-8318-6050-4

Tadashi Tanuma. 2017 Advances in steam turbines for modern power plants. Kappale 11, Steam turbine monitoring technology, validation, and verification for power plants. ISBN: 978-0-08-100325-1

Kim Hyeonmin, Gyun Na Man, Heo Gyunyoung. Application of monitoring, diagnosis, and prognosis in thermal performance analysis for nuclear power plants. Nuclear engineering and technology, VOL.46 NO.6. December 2014

OL3: Preparation of quarantine tests. Kick-off meeting, 12.11.2019.

Test procedure for the verification of the guaranteed performance on the OL3 NPP after PTO, 2021. Rev A. [viitattu 9.12.2021]. Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Commissioning Worksheet for motors of rotating machines. 2021, CWS14. FSS DC 0910 rev. D) Saatavissa: TVO:n olkidoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam.

VDI 3920: Thermal acceptance Tests on Turnkey Nuclear Power Plants with Steam turbines. 1981-12.

ASME PTC 19.5-2004(R2013). Flow measurements: Performance test codes. USA: The American Society of Mechanical engineers.

Fortum Power and Heat Oy, Tammikuu 2019. digital solutions. [viitattu 25.1.2022] Saatavissa: <https://www.fortum.fi/sites/default/files/documents/enext-digital-solutions-kontaktikortti-2019-fi.pdf>

Keränen, Seppo. 2021. Fortum Solvo. [yksityinen sähköposti] Lähetetty 9.12.2021 klo. 16:50.

Fortum Power and Heat Oy, Huhtikuu 2020. Solvo tool for process design and analyses of power plant processes. Powerpoint esitys.

Thermal performance Monitoring and optimization in nuclear power plants: Experience and lessons learned. IAEA, International Atomic Energy Agency, 2021 [viitattu 3.3.2022] Saatavissa: <https://www.iaea.org/publications/14896/thermal-performance-monitoring-and-optimization-in-nuclear-power-plants-experience-and-lessons-learned>

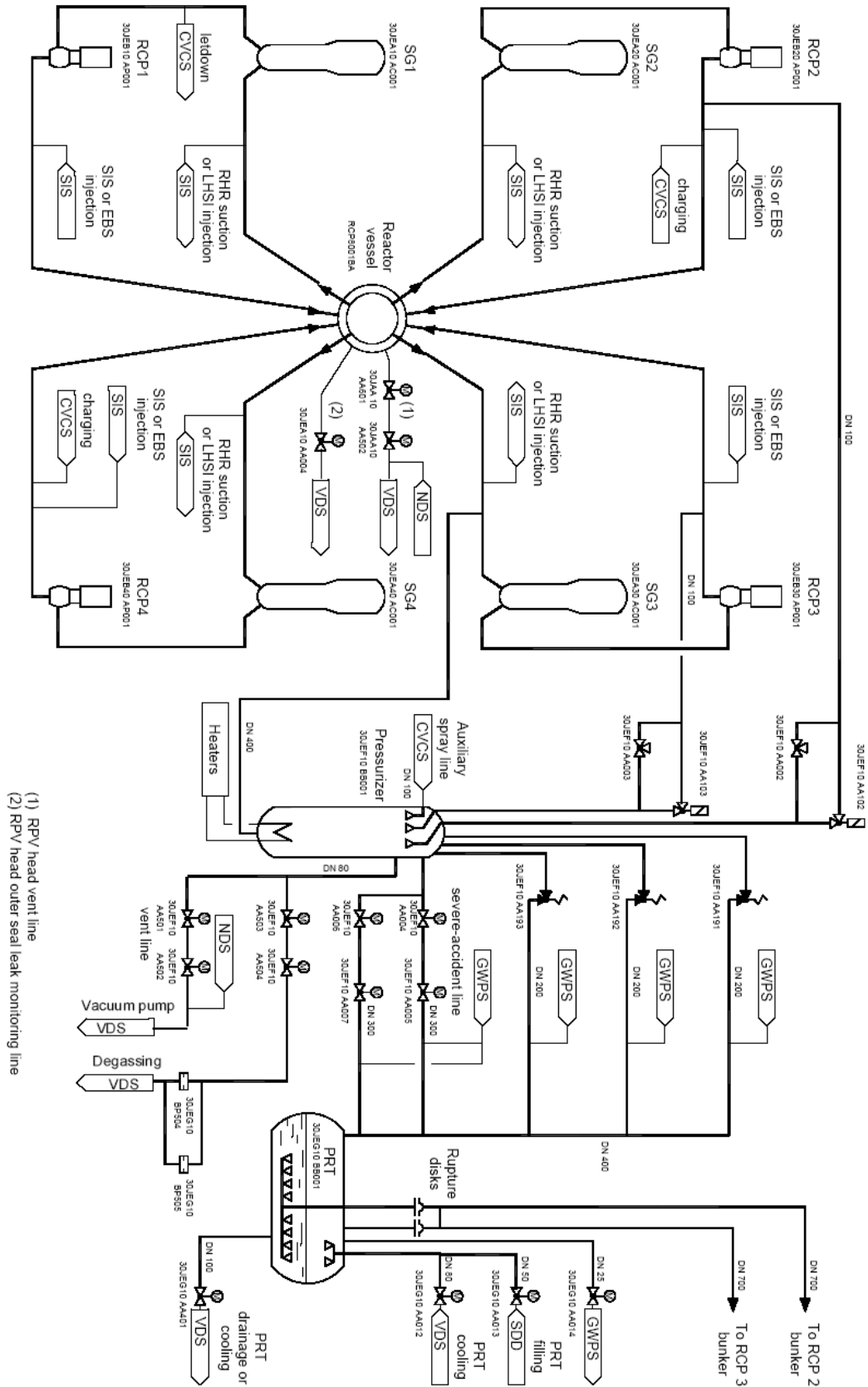
Lamminpää, Tommi. TVO 2022. [yksityinen sähköposti] Lähetetty 11.3.2022 klo. 15:09.

LUT, 2020. Digitaalinen kaksonen tulkitsee todellisuutta ja tehostaa toimintaa – älykkään mallinnuksen avulla säästetään aikaa ja rahaa. [viitattu 18.3.2022] Saatavissa: Digitaalinen kaksonen tulkitsee todellisuutta ja tehostaa toimintaa – älykkään mallinnuksen avulla säästetään aikaa ja rahaa.

Framatome. Reactor coolant system, system description. Revision W. s.221. Saatavissa: TVO:n kronodoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Areva. MAG, condensation system, system description. Revision W. s.36 Saatavissa: TVO:n kronodoc. Yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Liite 1: Primääripiirin virtauskaavio



# Liite 2: Vesihöyryprosessi

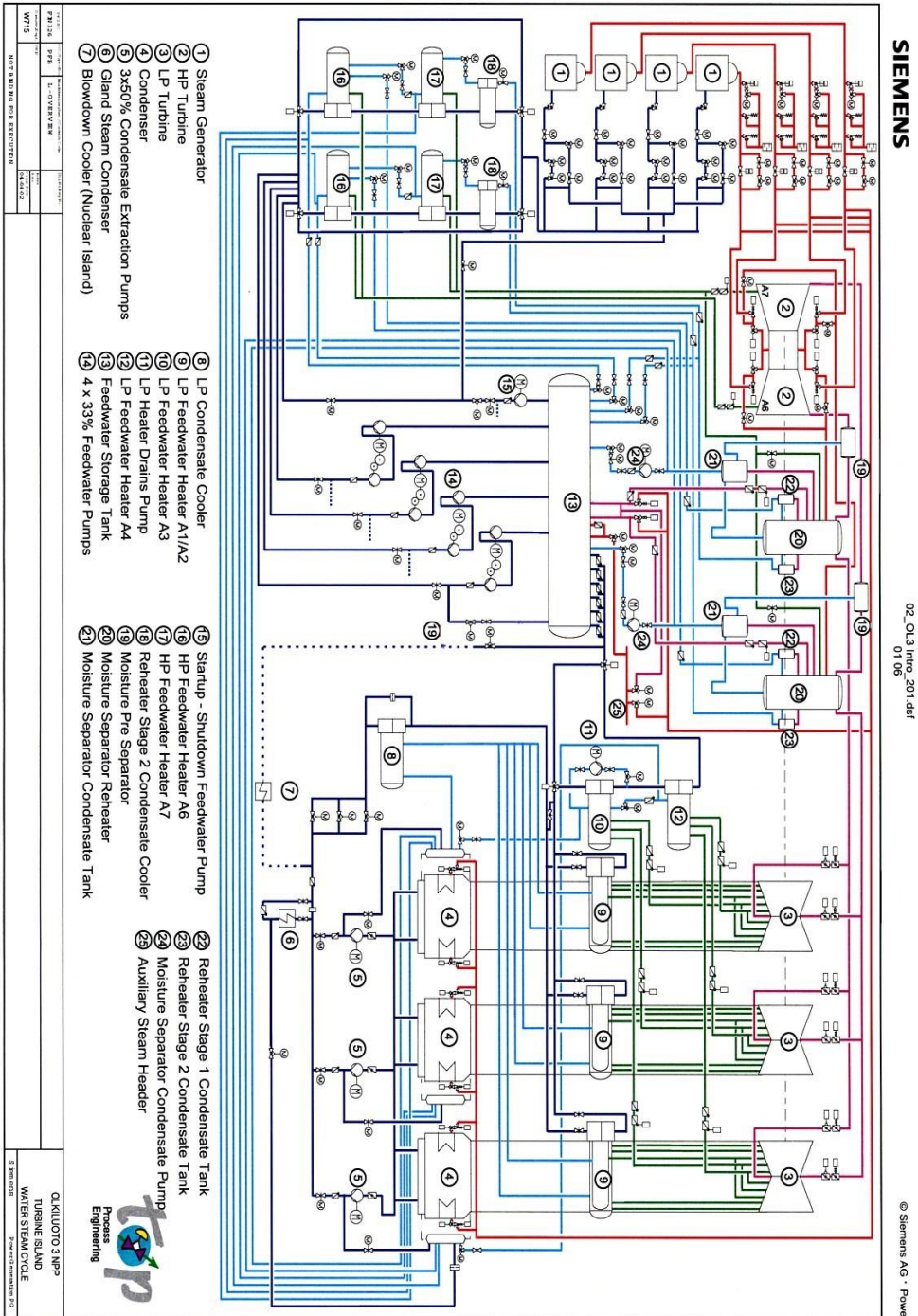
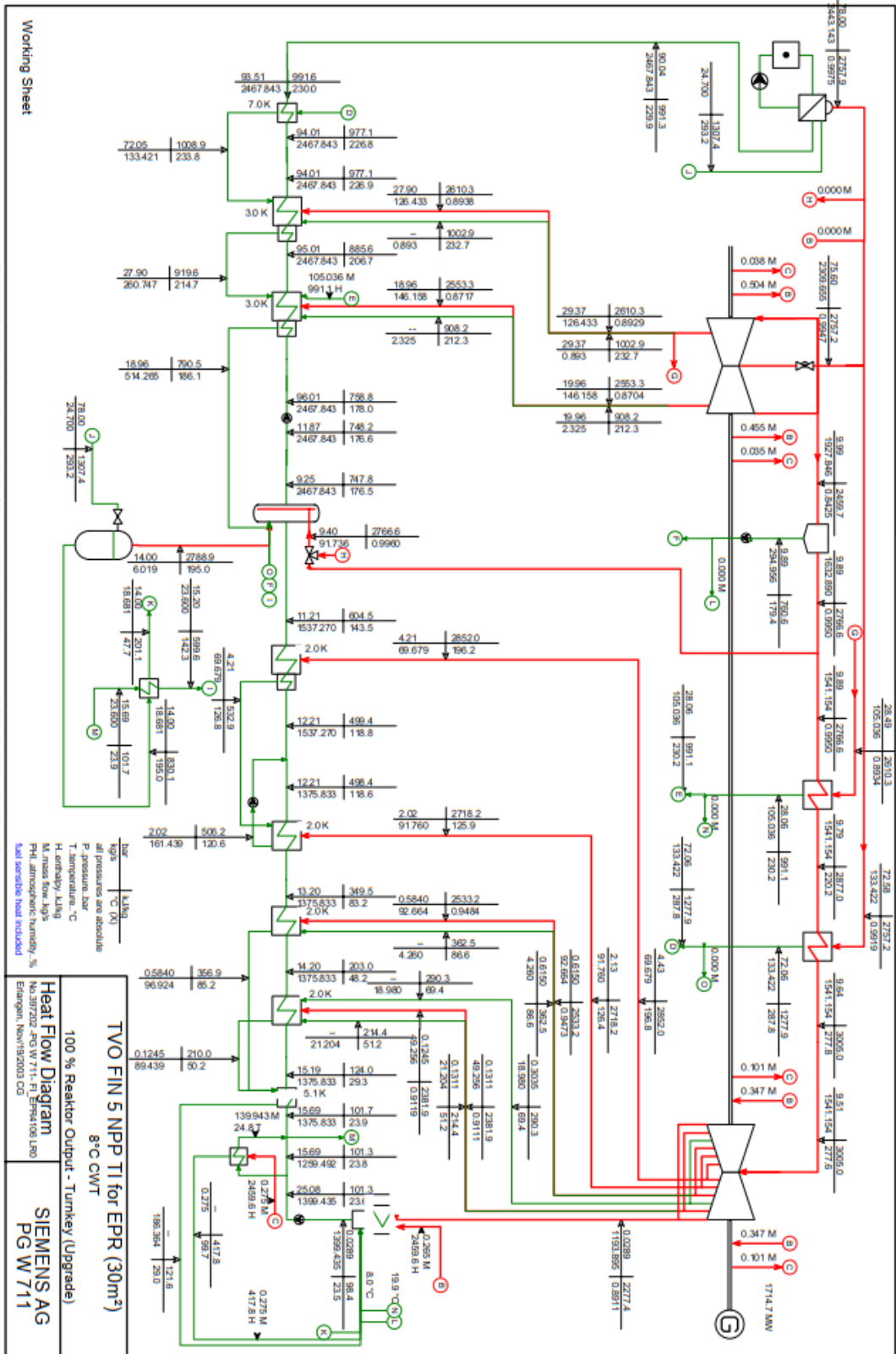


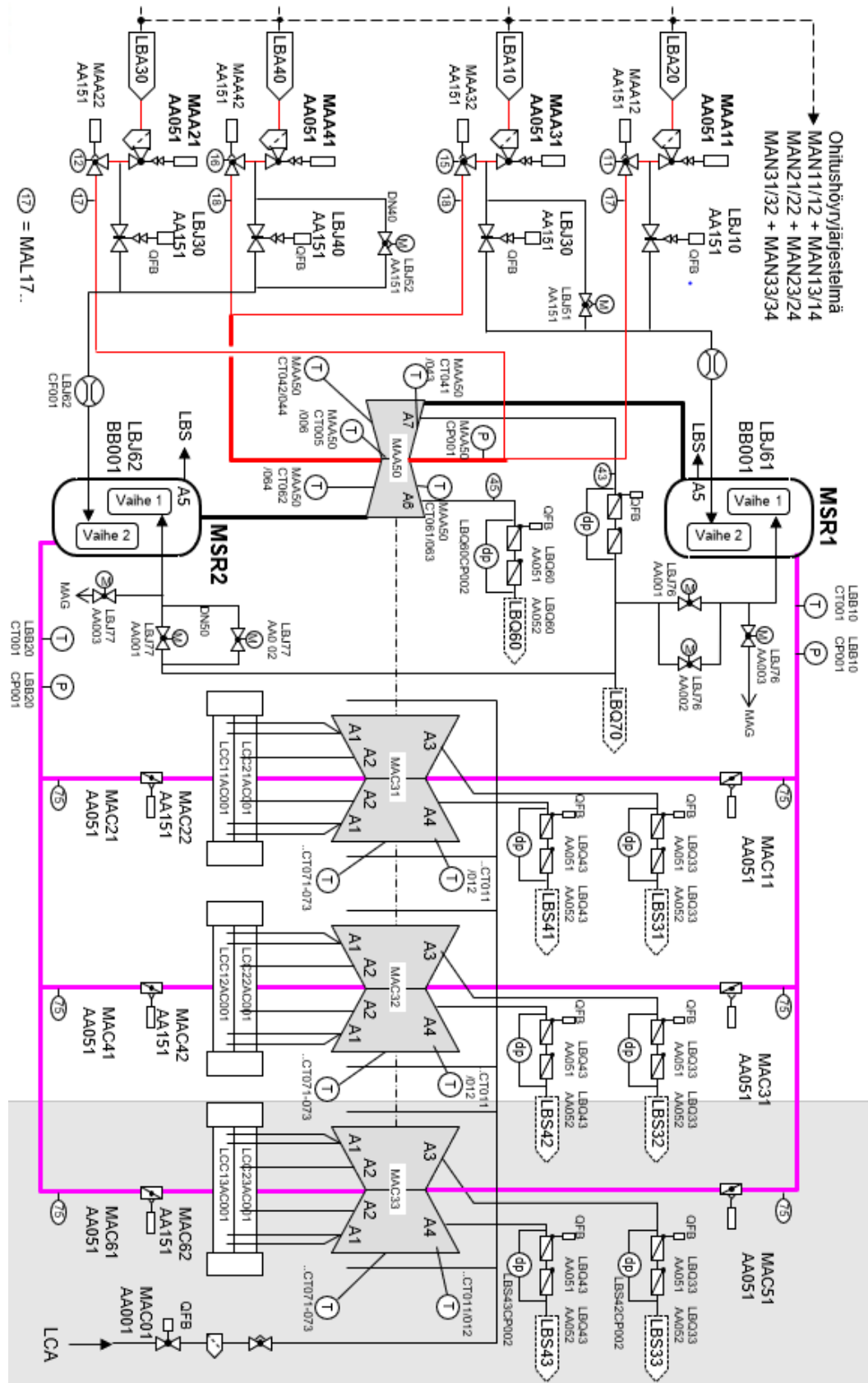
Fig. 2.1

Liite 3: Lämpötase 100 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 8°C lämpötilalla.



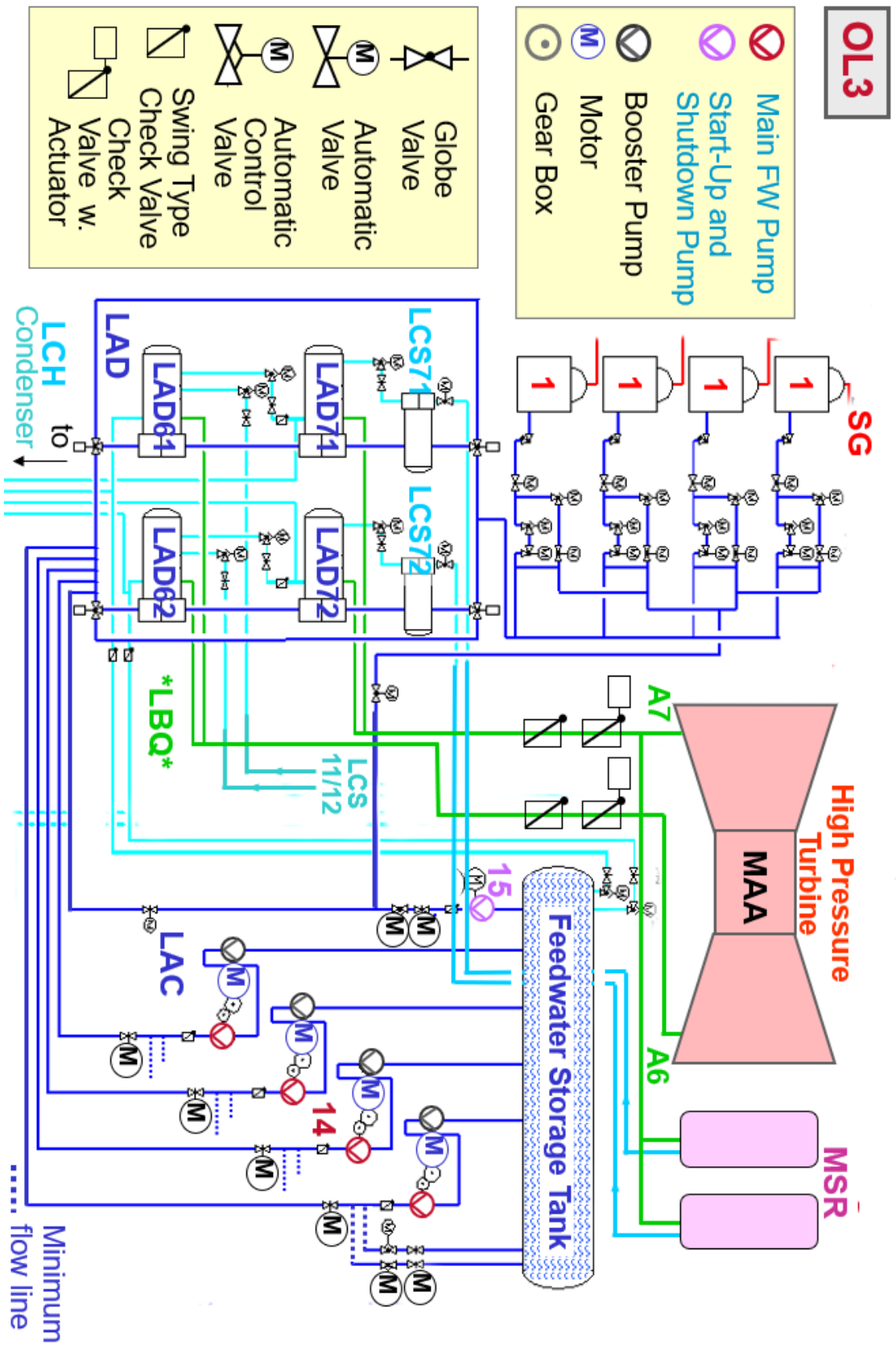
This document contains information that is proprietary to Siemens AG. Power Generation and may not be reproduced or disclosed in any form, orally or otherwise, in whole or in part, without the written permission of Siemens AG.

# Liite 4. Päähöyryjärjestelmä



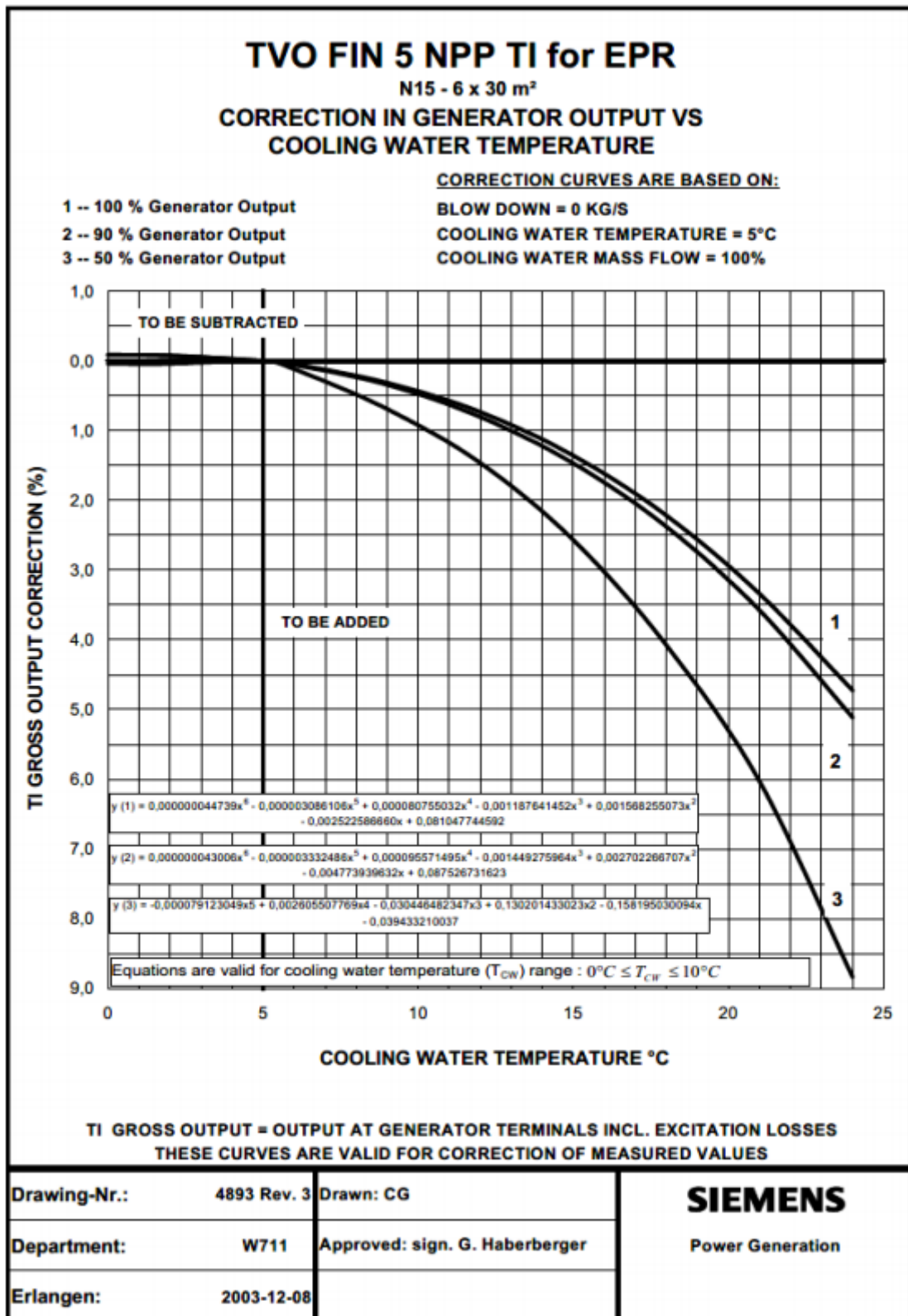


Liite 6. Pääsyöttövesijärjestelmä





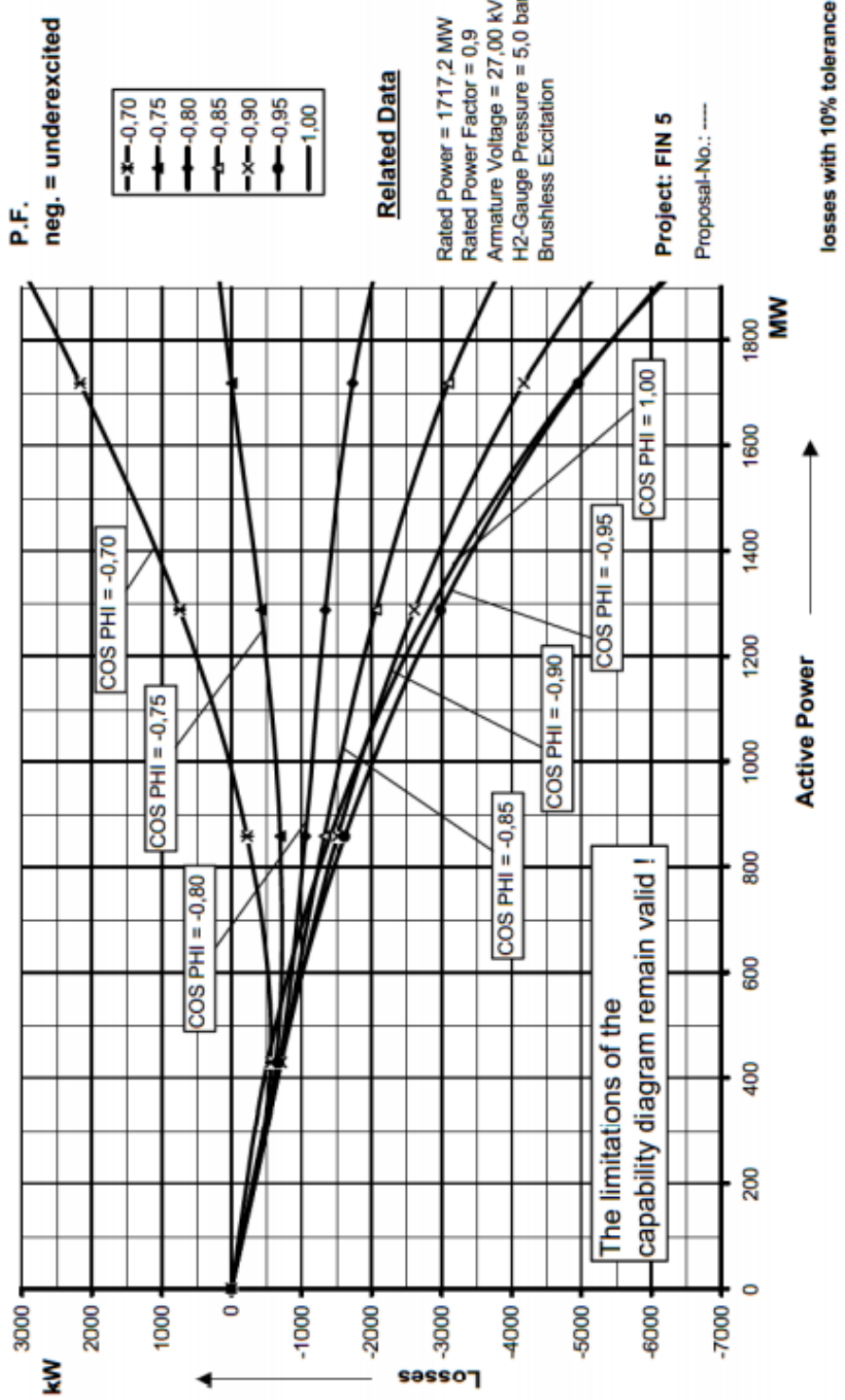
Liite 7. Generaattoritehon korjauskerroin.



Liite 8. Tehokertoimen korjauskäyrä

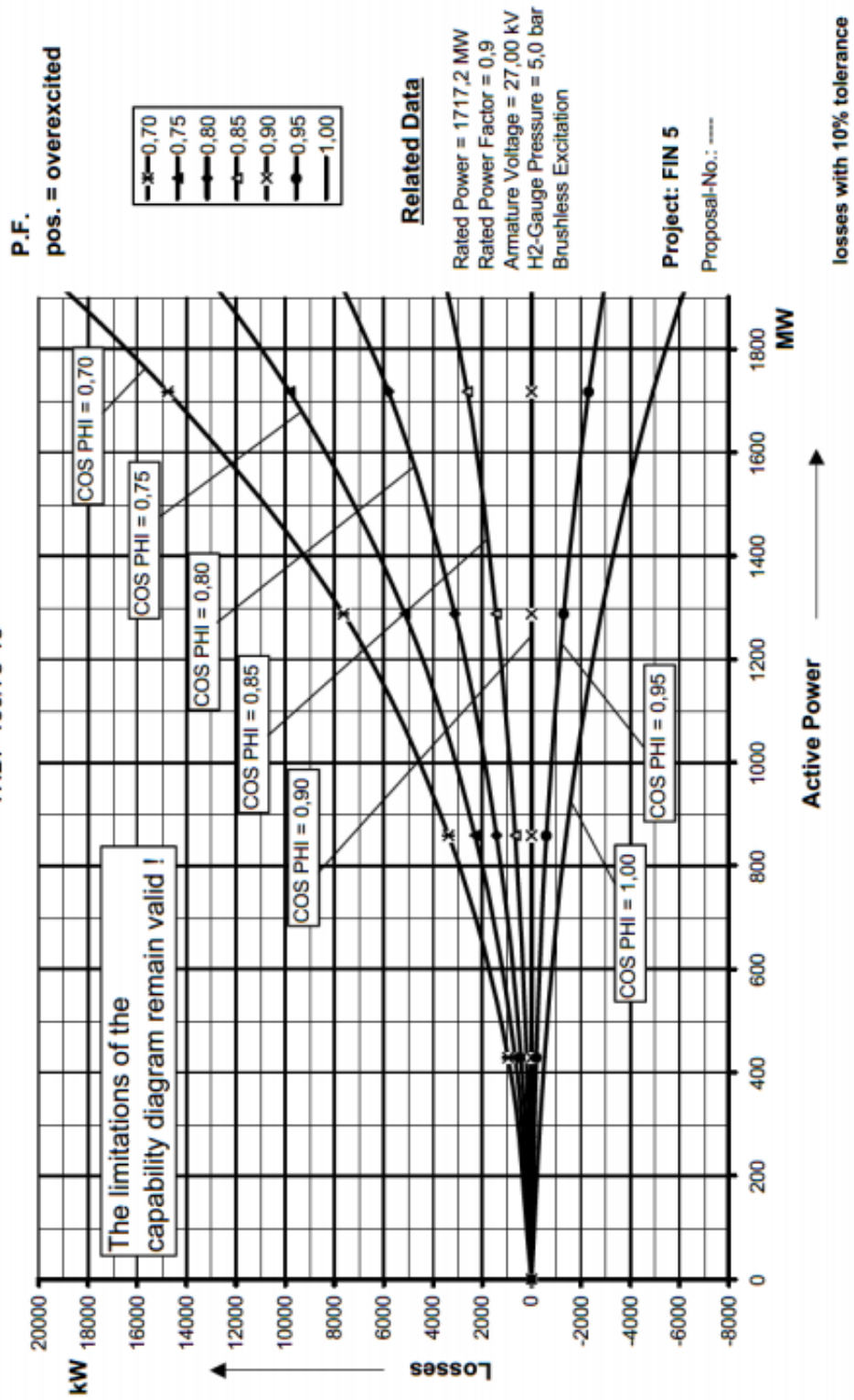
## Power Factor Correction Curves

THDF 190/78-15



## Power Factor Correction Curves

THDF 190/78-15



Liite 10. Tallennettavat binäärisignaalit. (OL3 plant efficiency test during commissioning phase D, 2021).

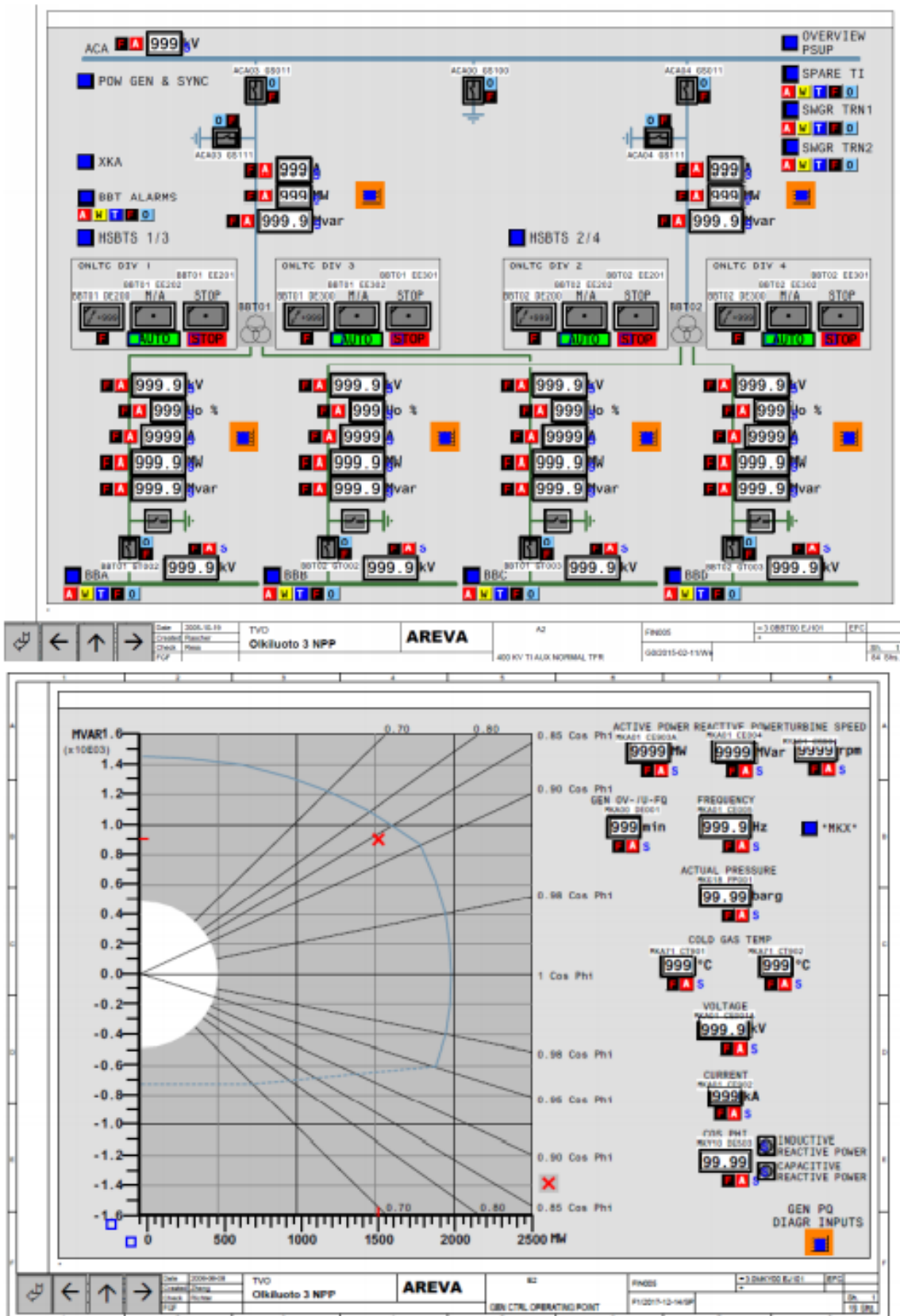
<b>KKS tunnus</b>	<b>Kuvaus</b>
3 0FAK11 AP001 XB01	Polttoainealtaan jäähdytyspumppu
3 0FAK12 AP001 XB01	Polttoainealtaan jäähdytyspumppu
3 0FAK21 AP001 XB01	Polttoainealtaan jäähdytyspumppu
3 0FAK22 AP001 XB01	Polttoainealtaan jäähdytyspumppu
3 0FAL21AP001 XB01	Polttoainealtaan pudistuspumppu
3 0FAL22AP001 XB01	Polttoainealtaan puhdistuspumppu
3 0JEB10AP001 XB01	Pääkiertopumppu
3 0JEB20AP001 XB01	Pääkiertopumppu
3 0JEB30AP001 XB01	Pääkiertopumppu
3 0JEB40AP001 XB01	Pääkiertopumppu
3 0JEF10AH231T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH232T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH233T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH234T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH331T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH332T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH333T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0JEF10AH334T XB01	Paineistimen lämmitysvastus
3 0KAA10AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KAA20AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KAA30AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KAA40AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KAA50AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KAA80AP001 XB01	Laitteiden jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 0KBA31AP001 XB01	Tilavuudensäätöjärjestelmän pumppu
3 0KBA32AP001 XB01	Tilavuudensäätöjärjestelmän pumppu
3 0KLA61AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA62AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA63AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA64AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA65AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA65AN002 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA66AN001 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLA66AN002 XB01	Suojarakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE05GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE06GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE07GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE08GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE51GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 0KLE53GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin

3 OKLE55GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 OKLE57GU001 XB01	Apurakennuksen ilmastointijärjestelmän puhallin
3 OKPL21AN001 XB01	Kaasumaisten jätteiden käsittelyjärjestelmän kompressori
3 OKPL22AN001 XB01	Kaasumaisten jätteiden käsittelyjärjestelmän kompressori
3 OPEB10AP001 XB65	Dieselvarmennetun merivesijärjestelmän pumppu
3 OPEB20AP001 XB65	Dieselvarmennetun merivesijärjestelmän pumppu
3 OPEB30AP001 XB65	Dieselvarmennetun merivesijärjestelmän pumppu
3 OPEB40AP001 XB65	Dieselvarmennetun merivesijärjestelmän pumppu
3 OPEB50AP001 XB65	Vakavien onnettomuuksien jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 OPEB80AP001 XB65	Vakavien onnettomuuksien jäähdytysjärjestelmän pumppu
3 OQKA10GH001C XJ01	Dieselvarmennettu kylmävesijärjestelmä
3 OQKA20GH001C XJ01	Dieselvarmennettu kylmävesijärjestelmä
3 OQKA30GH001C XJ01	Dieselvarmennettu kylmävesijärjestelmä
3 OQKA40GH001C XJ01	Dieselvarmennettu kylmävesijärjestelmä
3 OQNA11AP007 XB01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNA12AP013 XB01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNA21 GH001C XJ01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmä
3 OQNA22 GH001C XJ01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmä
3 OQNA21 AP023 XB01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNA22 AP033 XB01	Ilmastoinnin jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNB62 GH001C XJ01	Kaasumaisen jätteenkäsittelyjärjestelmän jäähdytysvesijärjestelmä
3 OQNB62 AP007 XB01	Kaasumaisen jätteenkäsittelyjärjestelmän jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNB63 GH001C XJ01	Kaasumaisen jätteenkäsittelyjärjestelmän jäähdytysvesijärjestelmän pumppu
3 OQNB63 AP017 XP017	Kaasumaisen jätteenkäsittelyjärjestelmän jäähdytysvesijärjestelmä
3 OSAC01 AH002A XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC01 AH002B XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC01 AH002C XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC01 AH002D XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC02 AH002A XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC02 AH002B XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC02 AH002C XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC02 AH002D XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC03 AH002A XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC03 AH002B XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC03 AH002C XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC03 AH002D XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC04 AH002A XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC04 AH002B XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC04 AH002C XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC04 AH002D XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin esilämmitys
3 OSAC01 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin puhallin
3 OSAC02 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin puhallin
3 OSAC03 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin puhallin
3 OSAC04 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmastoinnin puhallin

3 OSAC31 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmaston puhallin
3 OSAC32 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmaston puhallin
3 OSAC33 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmaston puhallin
3 OSAC34 AN001 XB01	Turvallisuusrakennuksen ilmaston puhallin



Liite 12. Näyttökuvat 3 OBBT00EJ101 ja 3 OMKY00EJ101.





Liite 13. OL1/OL2 Laskenta- Excelissä on seuraavat välilehdet:

- Info
- Mittapisteet
- Kalibrointikorjaukset
- Data\_ennen
- Data\_jälkeen
- Mindata\_pinnankorkeudet
- Lämpötilat
- Paineet
- Määrämittaukset
- Pgen\_korjaus
- Pgen korjaus\_koonti
- Vuodot
- 352–452 pumppausajat
- Tehokerroin\_korjaus
- venttiiliasennot
- Asteisuudet
- Esilämpövirrat
- Qm\_vertailu
- Raportoitavat
- Sisäiset\_vuodot
- Sähköteho
- Tarkasteluja

Liite 14. OL1/OL2 laitosmittausraporteissa tyypillisesti esitetyt asiat.

1. Yhteenveto
  - Tärkeimmät mittaustulokset sekä huomiot mittauksista
2. Tarkoitus
  - Mittausten tarkoitus: Miksi mittauksia tehdään?
3. Mittaukset
  - Kirjataan ylös mittaustapahtumat, erityisesti asiat, joilla on vaikutusta laskentaan tai analysointiin
  - Mittaustapahtumat ennen ja jälkeen vuosihuollon
4. Mittaustulokset
  - Excel- pohjaiseen laskentaan perustuvat tulokset
  - Yleistä mittaustuloksista, kuten asioita, joita on huomioitu laskennassa.
  - Mittausten stabiilisuus
  - Vuodot
  - Generaattoriteho
  - Mittausepävarmuus
  - Asteisuudet
  - KP-höyryturbiinin säätökammiopaine
  - Höyryn ja veden lämpötilat
  - Massavirrat
5. Tulosten tarkastelu
  - Tulosten analysointia mittaustulosten osalta
6. Johtopäätökset
  - Mitä johtopäätöksiä voidaan tehdä mittaustuloksista
7. Suositukset
  - Mitä suosituksia voidaan antaa laitosmittausten suorittamiseen jatkossa?  
Kehitysideat laitosmittauksiin tai voimalaitosprosessiin?
8. Liitteet
  - Vuotolaskentataulukot
  - Stabiilisuustarkastelu
  - Korjauksiin käytetyt korjauskäyrät ja yhtälöt

Liite 15. Yksinkertaistettu OL3- laitoksen sähkökaavio.

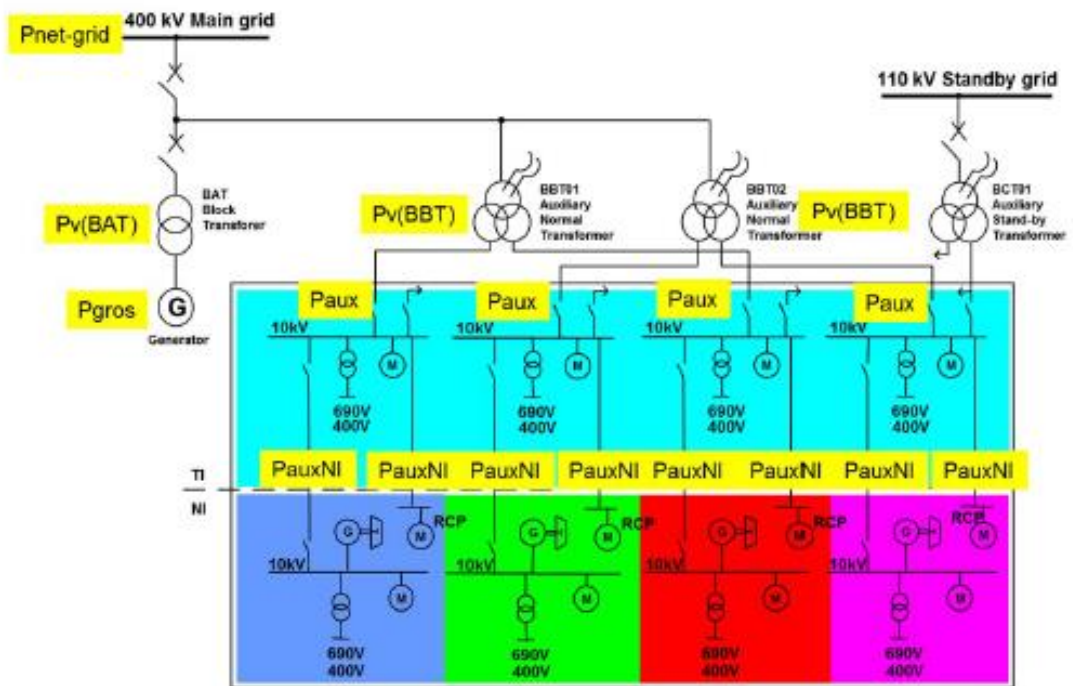


Fig.1: Simplified Single Line Diagram of OL3

Pgros = Gross electric power output of the main generator.

Pnet-grid = Power output of the plant at the connection point to the main grid

Paux = Power consumption of the auxiliary systems of the plant (TI+NI)

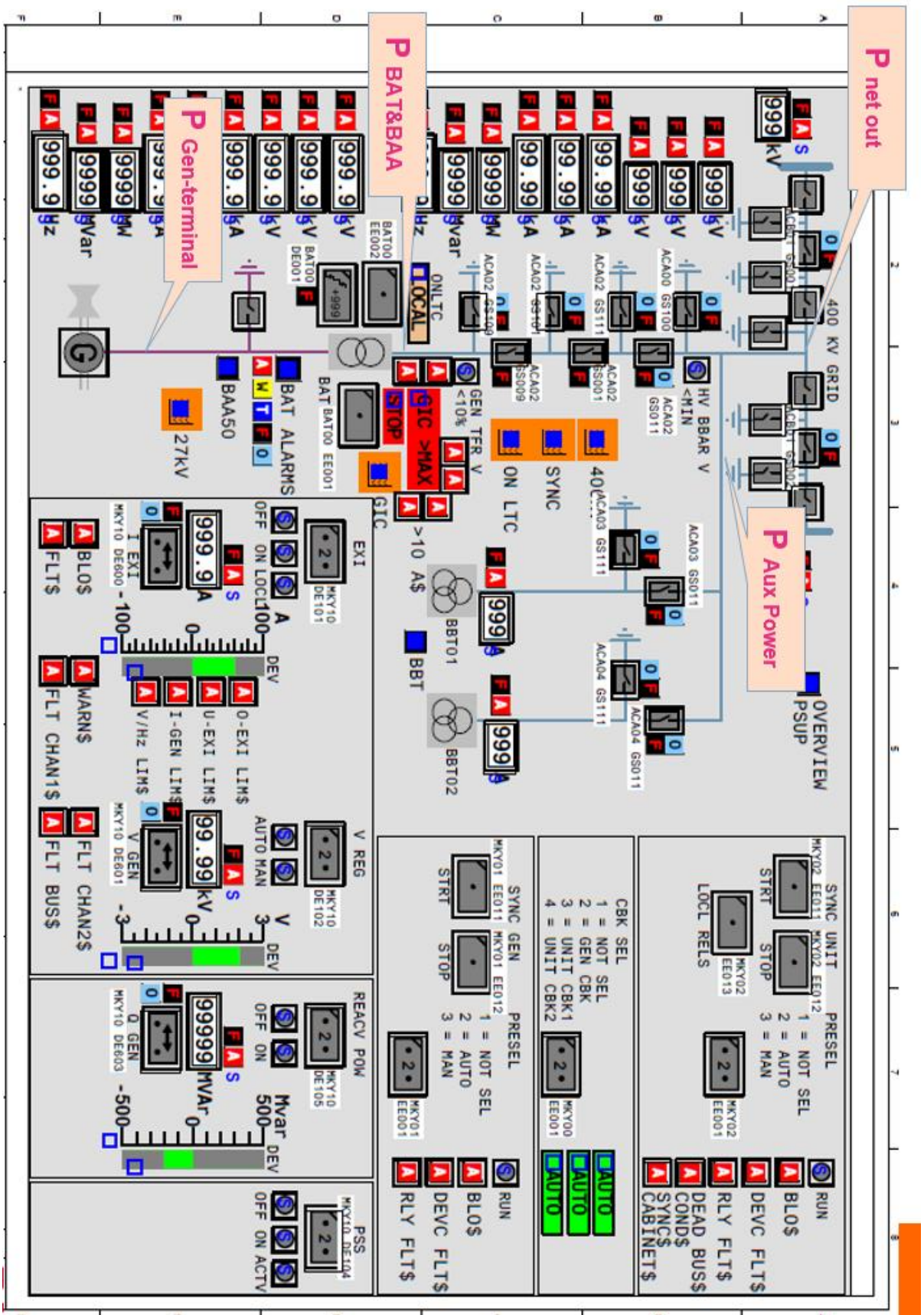
Pv(BAT) = Power loss of the main generator transformer BAT

Pv(BBT) = Power losses of the auxiliary normal transformers (BBT01 and BBT02)

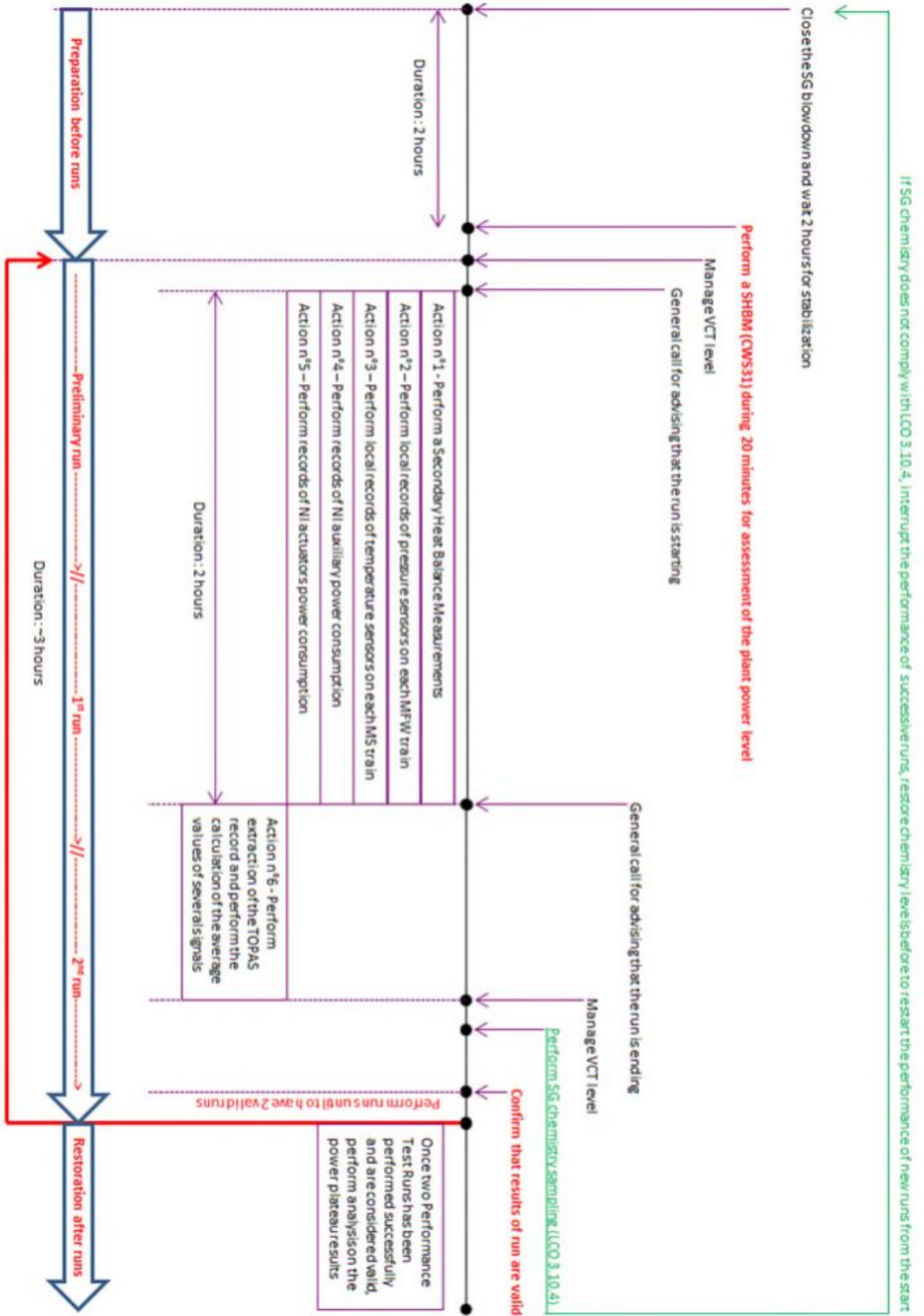
Formula:

$$P_{\text{net-grid}} = P_{\text{gros}} - P_{\text{aux}} - P_{\text{v(BAT)}} - P_{\text{v(BBT)}}$$

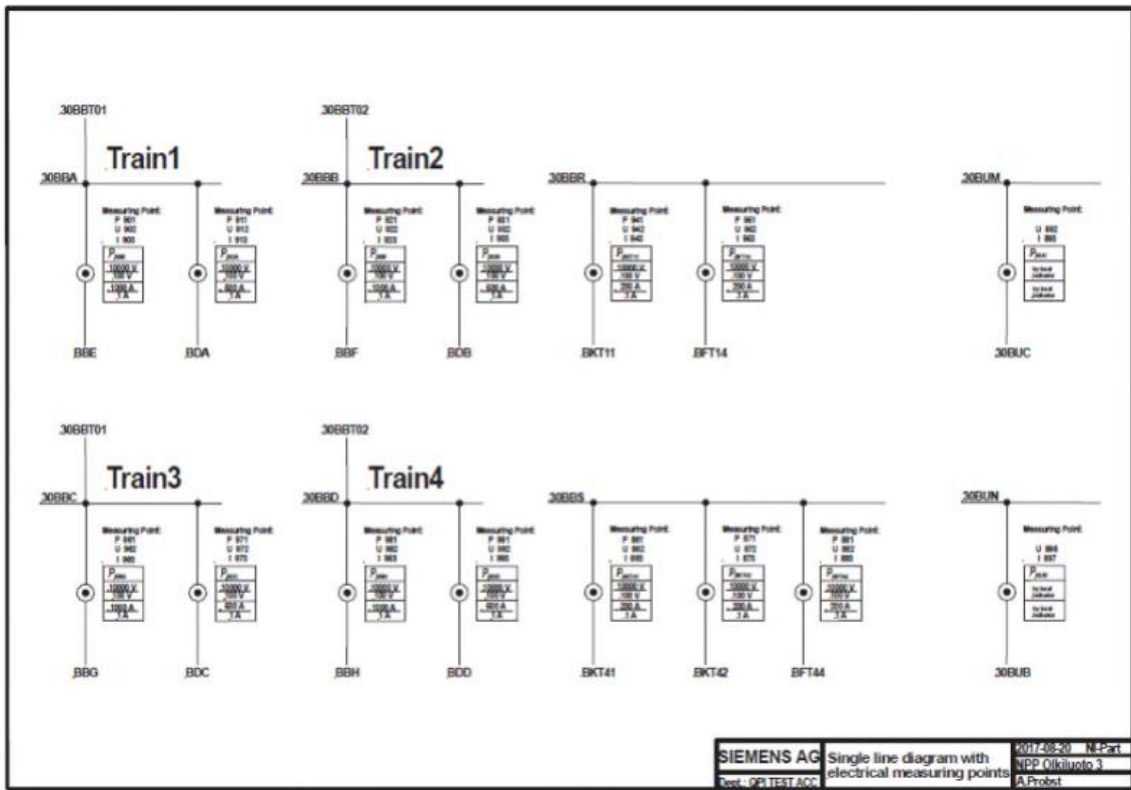
Liite 16. PICS näyttökuva sähköjärjestelmästä



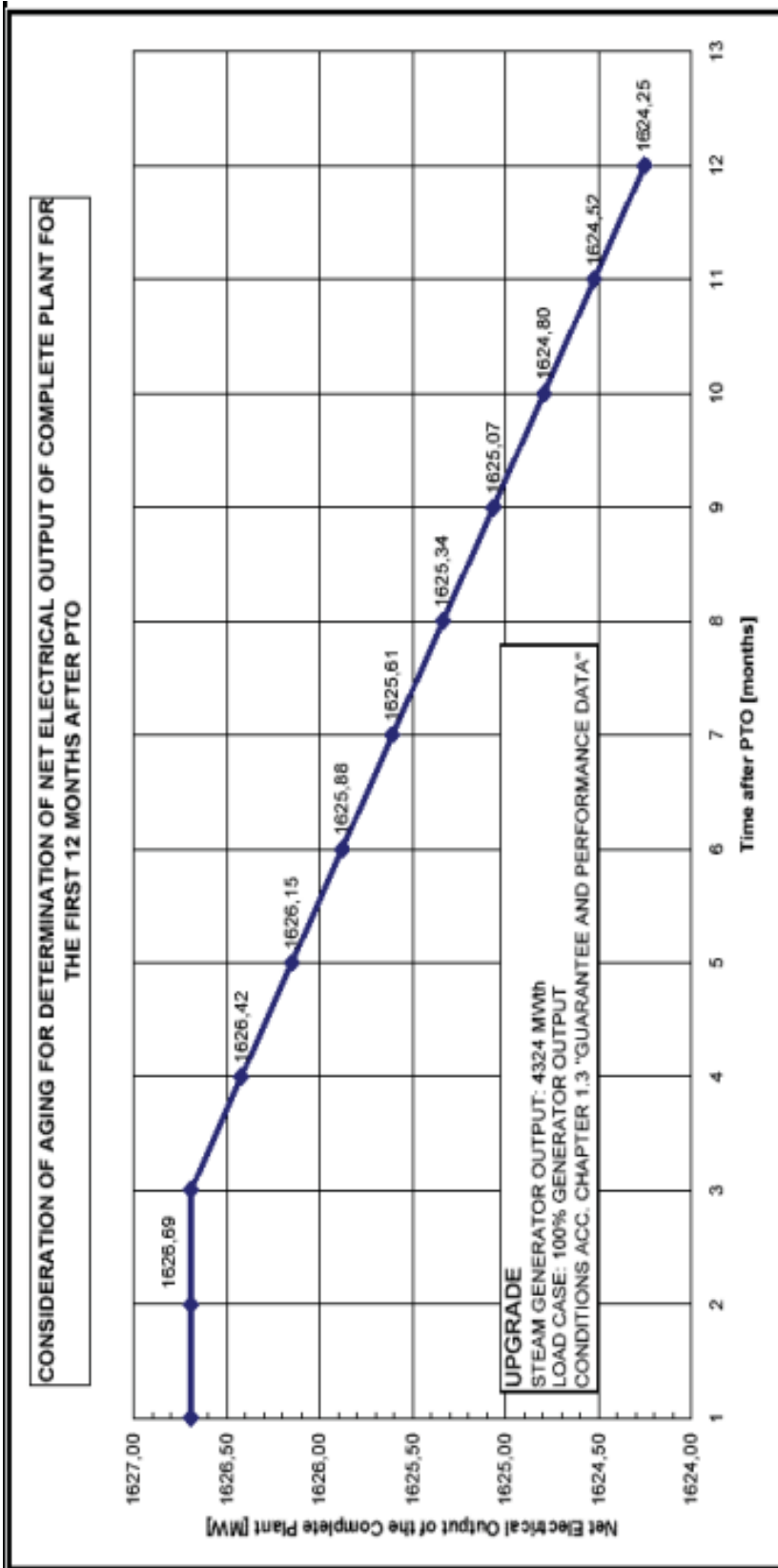
Liite 17. Takuumittauksen sekvenssi.



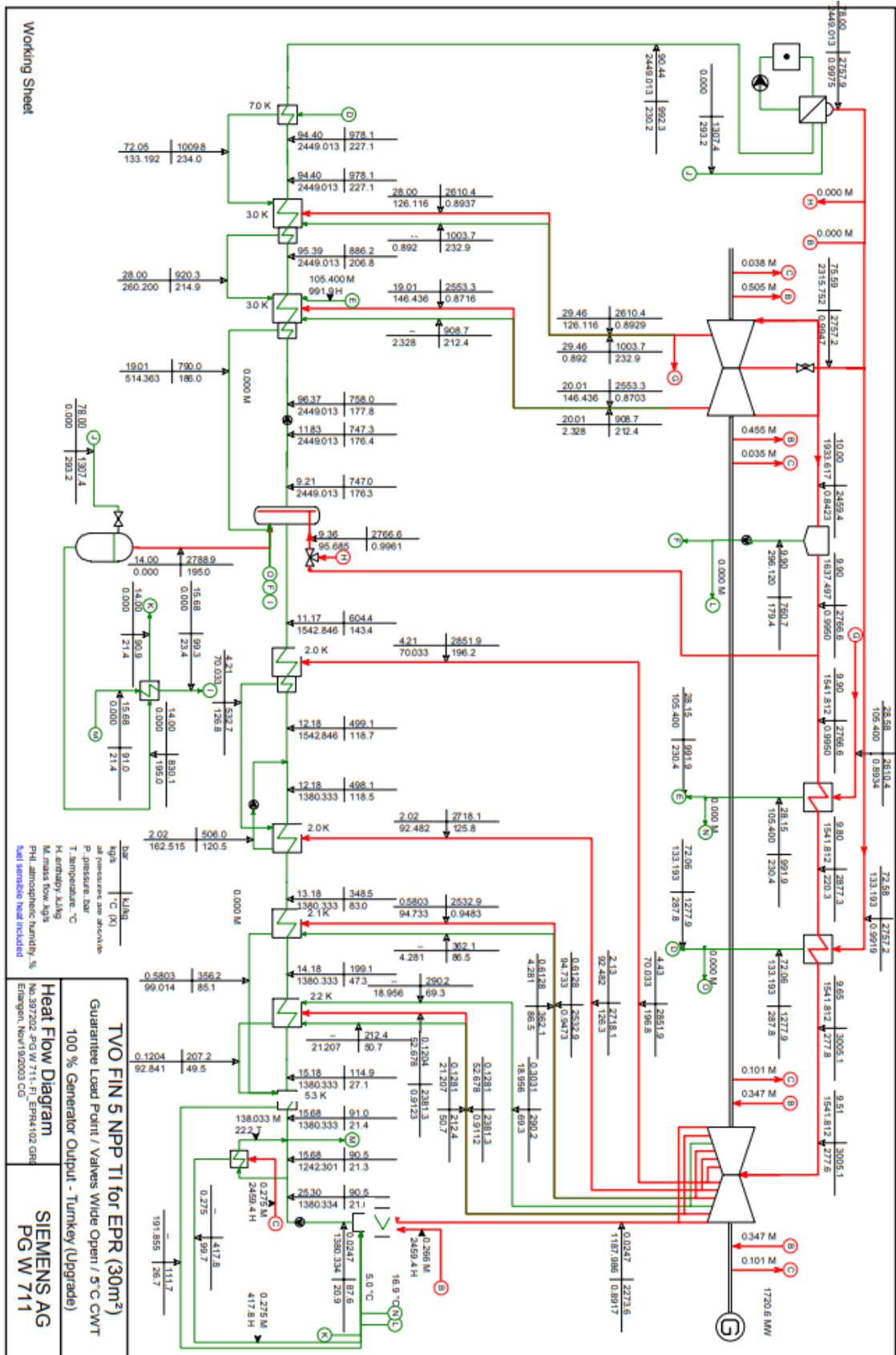
Liite 18. Takuumittauksen omakäytösähkön mittapisteet.



Liite 19. Korjauskerroin ikääntymiselle.

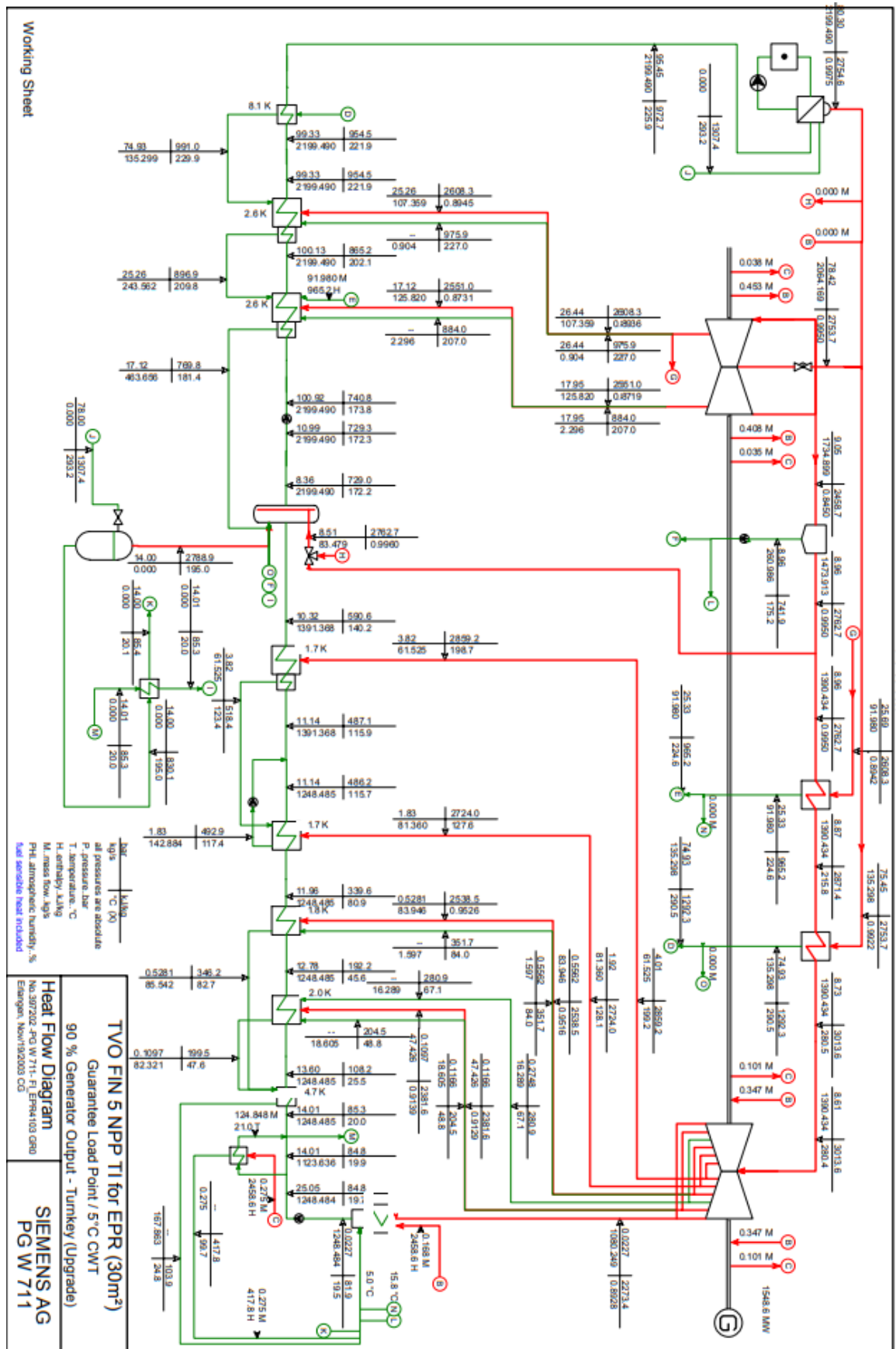


Liite 20. Lämpötase 100 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 5°C lämpötilalla.

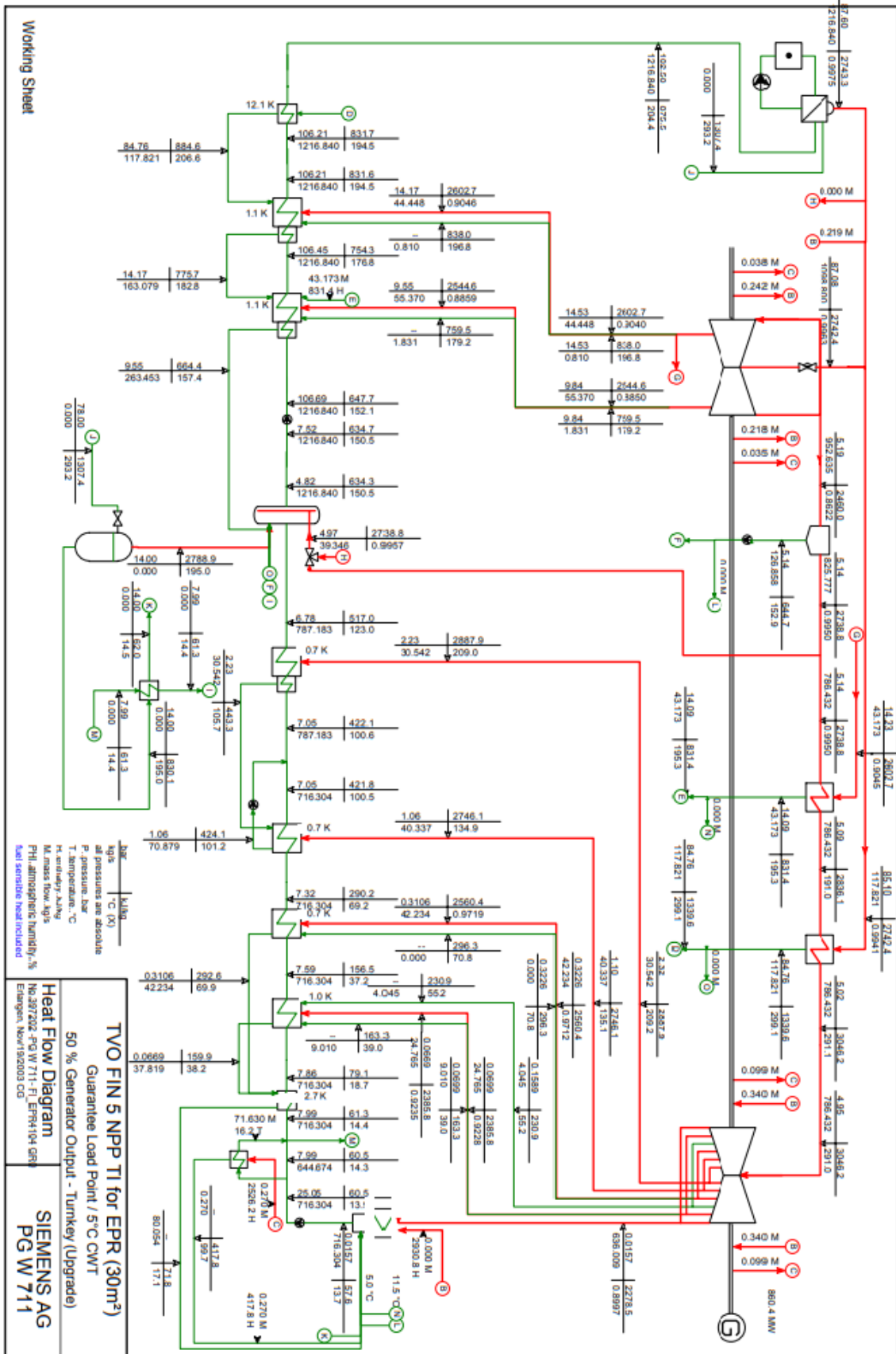




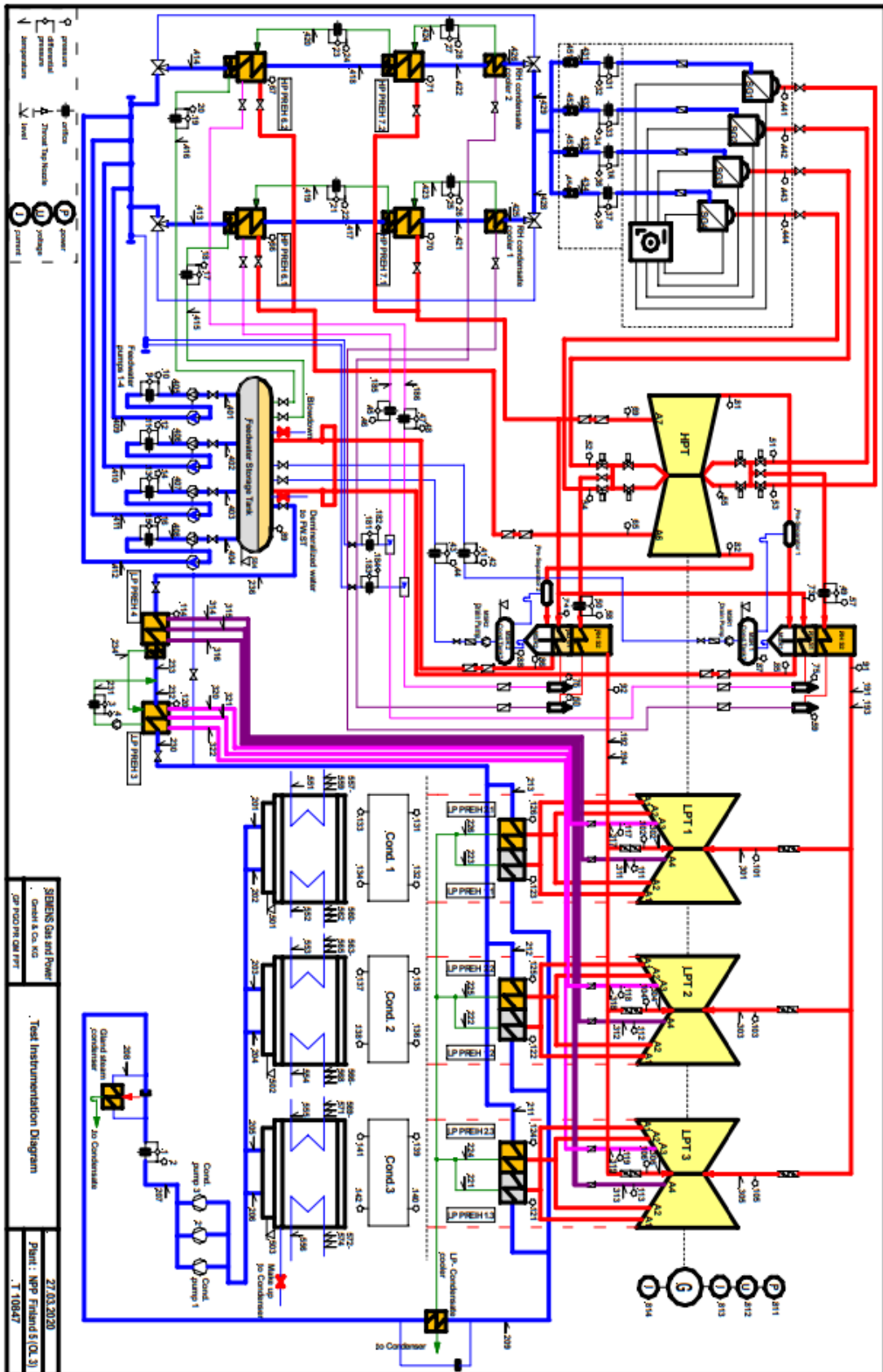
Liite 21. Lämpötase 90 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 5°C lämpötilalla.



Liite 22. Lämpötase 50 %:n reaktoriteholla ja jäähdytysveden 8°C lämpötilalla.



Liite 23. Takuukokeen mittapistekaavio



Liite 24. Mittausten määrittely TOPAS työkalun avulla.

The screenshot shows the 'Log Functions' configuration window in Siemens software. The interface is organized into several functional areas:

- Signal information:** A large empty text box for entering details about the signal.
- Selected signals:** A list of signals currently selected for logging, with a 'Delete' button.
- Selection list:** A list of available signals, each with a count and a selection checkbox. The list includes:
 

3	OKPL01	CF001A	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL01	CF001B	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL01	CF001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL01	CT001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL02	CF001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL02	CG101	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL02	FF001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL03	CG101	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL04	CG101	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CF001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CF002	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CF003	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CG001	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CG002	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CG011	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CG012	X001	<input type="checkbox"/>
3	OKPL05	CT001	X001	<input type="checkbox"/>
- Log datasets:** A list of datasets with a '10 used of max.' indicator. The list includes:
 

B.3.4.2-2_v2
B.3.4.2-2_v4
Lampela
RCSL_ANA_080129
RCSL_ANA_080211
RCSL_ANA_1411
RCSL_ANA_Z310
RCSL_ANA_3010
test2
testi_juha
- Time Selection:** Controls for 'Start time' and 'End time' using a date and time picker. The start time is set to 28.03.22 13:46:00 and the end time to 28.03.22 13:46:00.
- Buttons:** 'OK', 'Cancel', 'Help', 'Save', and 'Delete' buttons are present.
- Status Bar:** Shows 'RO@su01 Current database Time range RAID: TP\_Manager not ready Evaluation by Tag-ID' and the timestamp '28.03.22 13:45:56'.

## Liite 25. Vuosihuoltojen yhteydessä tehtävien prosessimittausten mittapisteen

KKS Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
3 0MKG18 FP001	Vetypaine generaattorissa	barg.
3 0LBA70 AA101	Apuhöyryjärjestelmän säätöventtiilin asento	%
3 0LBG10 CT001	Apuhöyryjärjestelmän lämpötila	°C
3 0LBG10 CT001	Apuhöyryjärjestelmän paine	barg.
3 0MAC12 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAC22 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAC32 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAC42 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAC52 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAC62 CG151	MP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAA12 FG151	KP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAA22 FG151	KP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAA32 FG151	KP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0MAA42 FG151	KP-turbiinin säätöventtiilin asento	%
3 0LAA10 CT901	Syöttövesisäiliön lämpötila	°C
3 0LAA10 CP904	Syöttövesisäiliön paine	barg.
3 0LAA10 CL901	Syöttövesisäiliön pinta	m
3 0LCA55 CT001	Lämpötila ennen syöttövesisäiliötä	°C
3 0LCA30 CT001	Lämpötila lauhdepumppujen jälkeen	°C
3 0LCA30 CF901	Virtaus lauhdepumppujen jälkeen	kg/s
3 0LCA30 CP001	Paine lauhdepumppujen jälkeen	barg.
3 0MAG10 FL021	Lauhduttimen pinta	m
3 0MAG20 FL021	Lauhduttimen pinta	m
3 0MAG30 FL021	Lauhduttimen pinta	m
3 0LCA30 CT002	Lämpötila ennen lauhteenjäähdytintä	°C
3 0LCA30 CP002	Paine ennen lauhteenjäähdytintä	barg.
3 0LCA40 CT001	Lämpötila ennen A1/A2 MP-esilämmittimiä	°C
3 0LCA41 CT002	Lämpötila MP-esilämmittimien A1/A2 jälkeen	°C
3 0LCA42 CT002	Lämpötila MP-esilämmittimien A1/A2 jälkeen	°C
3 0LCA43 CT002	Lämpötila MP-esilämmittimien A1/A2 jälkeen	°C
3 0LCA50 CT002	Lämpötila MP-esilämmittimen A3 jälkeen	°C
3 0LCA45 CT001	Lämpötila ennen A3 MP-esilämmittintä	°C
3 0BBT01 CE203	Divisioonan 1 sähköteho	MW
3 0BBT02 CE203	Divisioonan 2 sähköteho	MW
3 0BBT03 CE203	Divisioonan 3 sähköteho	MW
3 0BBT04 CE203	Divisioonan 4 sähköteho	MW
3 ACA00 CE005	Sähköverkon taajuus	Hz
3 0LCJ21 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmittintä A2.1	barg.
3 0LCJ21 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A2.1 jälkeen	°C
3 0LCC11 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmittintä A1.1	°C
3 0LCJ11 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A1.1 jälkeen	°C
3 0LCJ22 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmittintä A2.2	barg.
3 0LCJ22 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A2.2 jälkeen	°C

3 0LCC12 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmitintä A1.2	°C
3 0LCJ12 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A1.2 jälkeen	°C
3 0LCJ23 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmitintä A2.3	barg.
3 0LCJ23 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A2.3 jälkeen	°C
3 0LCC13 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmitintä A1.3	°C
3 0LCJ13 CT001	Lämmittävän nesteen lämpötila esilämmittimen A1.3 jälkeen	°C
3 0LCC30 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmitintä A3	barg.
3 0LBS31 CT002	Väliottohöyryn 3.1 lämpötila	°C
3 0LBS32 CT002	Väliottohöyryn 3.2 lämpötila	°C
3 0LBS33 CT002	Väliottohöyryn 3.2 lämpötila	°C
3 0LCJ30 CF001	A3 MP-esilämmittimen lauhteen virtaus	kg/s
3 0LCJ30 CT001	A3 MP-esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
3 0LCC40 CP001	Höyrynpaine ennen esilämmitintä A4	barg.
3 0LBS41 CT002	Väliottohöyryn 4.1 lämpötila	°C
3 0LBS42 CT002	Väliottohöyryn 4.2 lämpötila	°C
3 0LBS43 CT002	Väliottohöyryn 4.2 lämpötila	°C
3 0LCJ40 CT001	A4 MP-esilämmittimen lauhteen lämpötila	°C
3 0LAD71 CT001	Höyrynpaine ennen KP-esilämmitintä A7.1	barg.
3 0LCH71 CF001	Lauhtenvirtaus A7.1 esilämmittimen jälkeen	kg/s
3 0LAD61 CT001	Höyrynpaine ennen KP-esilämmitintä A6.1	barg.
3 0LCH61 CF001	Lauhtenvirtaus A6.1 esilämmittimen jälkeen	kg/s
3 0LAD72 CP001	Höyrynpaine ennen KP-esilämmitintä A7.2	barg.
3 0LCH72 CF001	Lauhtenvirtaus A7.2 esilämmittimen jälkeen	kg/s
3 0LAD62 CT001	Höyrynpaine ennen KP-esilämmitintä A6.2	barg.
3 0LCH62 CF001	Lauhtenvirtaus A6.2 esilämmittimen jälkeen	kg/s
3 0LBJ61 CF001	Höyryvirtaus välitulistimen 1, vaihe 2	kg/s
3 0LBJ62 CF001	Höyryvirtaus välitulistimen 2, vaihe 2	kg/s
3 0LBS51 CT001	A5 väliottohöyryn lämpötila	°C