

Heidi Kuosa

YDINVOIMALAITOKSEN TERMISEN TEHON MITTAAMINEN JA
SIIHEN LIITTYVÄT VIRHEMAHDOLLISUUDET

Energiatekniikan koulutusohjelma

2009



YDINVOIMALAITOKSEN TERMISEN TEHON MITTAAMINEN JA SIIHEN LIITTYVÄT VIRHEMAHDOLLISUUDET

Kuosa, Heidi

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Energiatekniikan koulutusohjelma

Toukokuu 2009

Timo Tommila

UDK: 621.039, 621.311.25

Sivumäärä: 69

Asiasanat: Ydinenergia, ydinreaktorit, ydinvoimalat, energiantuotanto

Tässä työssä tarkasteltiin Olkiluodon ydinvoimalaitosten termisen tehon mittaamista ja laskentaa. Esimerkkilaitoksena käytettiin OL1 - laitosta. Tehon määrittäminen ydinvoimalaitoksissa on viime vuosina ollut ajankohtainen asia, koska Ruotsissa on havaittu reiluja lisensioituneen tehon ylitystapauksia, joista osassa on syöttövesivirtauksen mittaus näytellyt merkittävää roolia. Veden virtausmittauksen toteutus mahdollisimman tarkalla mittausmenetelmällä on myös hankalampaa, kuin esimerkiksi lämpötila- tai painemittauksen. Tästä syystä työn mittausta käsittelevässä teoriaosuudessa keskityttiin tarkastelemaan lähinnä virtausmittausta.

Termisentehon laskennan osalta tarkasteltiin sekä termisentehon käsinlaskentakaavaa, että tehonlaskentaohjelma CONDINia. Käsinlaskentakaava on laadittu sellaisia tilanteita varten, jolloin tietokoneen mittaus- ja laskentatiedot eivät jostain syystä ole käytettävissä. Normaalisti tehonmäärittäykseen liittyvät mittaus- ja laskentatiedot saadaan CONDIN - nimiseltä laitostietokoneelta, jonka ainoa tehtävä on kerätä laitoksen käytön kannalta oleellista mittausdataa ja laskea sen perusteella erilaisia tehonmäärittäyksessä tarvittavia arvoja. Ruotsin ydinvoimalaitoksilla on käytössä samantapainen CONDIN - ohjelma, kuin suomessakin.

Tehonlaskennassa tarvittavien mittaustulosten virheitä tarkasteltiin mittalaitteiden kalibrointiraporttien perusteella. Koska tämä aineisto ei ollut tyypillistä virhelaskennassa käytettävää aineistoa, eli kerättyjä mittaustuloksia, tavanomaisia virhelaskennan kaavoja ei voitu käyttää.

Käsinlaskentakaavan ja siinä esiintyvien vakioiden tarkastelussa huomattiin Teollisuuden Voiman käyttämissä ominaisilavuuden arvoissa virhettä. Teollisuuden Voimalle toimitettiin tieto tästä havainnosta. Mittausketjujen aiheuttama virhe koko tehonlaskentaan pysyi ennalta odotetuissa rajoissa, alle kahdessa prosentissa. Suurin sallittu teho (turvallisuusanalyysissä käytetty) Olkiluodon laitoksilla on 102 %:a, joten 100 %:n teholla käydessään mittalaitteiden virheet huomioiden, tehon pitäisi pysyä alle tämän 102 %:n suurimman sallitun tehon.

MEASURING THERMAL POWER IN A NUCLEAR POWER PLANT AND ITS POSSIBLE SOURCES OF ERRORS

Kuosa, Heidi

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Energy Technology

May 2009

Tommila, Timo

UDC: 621.039, 621.311.25

Number of pages: 69

Key words: Nuclear Power, nuclear reactors, nuclear power plants, power production

In this thesis, measuring and calculation of thermal power in the Olkiluoto nuclear power plants were examined. The OL1 plant was used as an example. Determination of power in nuclear power plants has recently been a topical matter, because there have been cases of exceeding the licenced power in Sweden. In these cases feedwater flow measurement has played an important role. To execute waterflow measurement as accurately as possibly can also be far more difficult than for example executing temperature or pressure measurement as accurately as possible. For that reason, the part of the thesis discussing measurement theory concentrates on examining the theory of flow.

In the calculation of thermal power, both the manual formula of the calculation of thermal power and the power calculation program CONDIN were examined. The manual formula has been made for the situations when measurement and calculation data from the computer is not available for some reason. Normally measurement and calculation data related to power determination is collected from a power plant's computer called CONDIN, the only duty of which is to collect important data related to driving the power plant and to calculate values that are needed in the power determination based of the collected data. Nuclear power plants in Sweden have a similar CONDIN program to that we have in Finland.

Faults of the results of the measurements needed in power calculation were examined based on the calibration reports of measuring instruments. Because this material wasn't typical of the material used in fault estimating calculations, which is usually based on several measuring results, commonly used mathematical formulas couldn't be used.

As the manual calculation formula and its constants were examined, it was noticed that the characteristic volume values used by Teollisuuden Voima were false. An Information about that was given to Teollisuuden Voima. The fault caused by the whole measurement chain to power calculation stayed in expected limits, under two per cent. The biggest allowed power (used in safety analyses) in Olkiluoto power plants is 102 %, so when driven with 100 % power and the faults caused by measurement equipment taken into consideration, power should stay under this biggest allowed power 102%.

ALKUSANAT

Lopputyö on tehty Säteilyturvakeskukselle ydinvoimalaitostenvalvonta yksikön reaktori- ja turvallisuusjärjestelmät toimistolle. Työ on tehty Olkiluodon ydinvoimalaitosten alueella sijaitsevassa STUKin paikalliskonttorissa. Työn ohjaajana säteilyturvakeskuksen puolesta toimi TkT Vesa Meuronen, jolle kuuluu suuri kiitos hyvistä neuvoista sekä avustamisesta työn valmiiksi saattamisessa. Säteilyturvakeskuksen henkilökunnasta haluaisin kiittää myös DI Riku Mattilaa, joka on syvällisesti perehtynyt Olkiluodon ydinvoimalaitosten toimintaan, hänen neuvoistaan oli paljon apua työn teossa. Lisäksi haluaisin kiittää Tampereen Teknillisen Korkeakoulun vanhempaa asiantuntijaa, Heikki Jokista, sekä professori Jouko Halttusta, joilta sain apua mittausketjujen aiheuttaman virheen laskemisessa. Kiitokset kuuluvat myös TVO:n henkilökunnalle, joiden avustuksella sain työssä tarvittavat tiedot vaivattomasti kerättyä. Satakunnan Ammattikorkeakoulun puolesta ohjaajana toimi FT Timo Tommila, jota haluan kiittää avusta työn valmiiksi saattamisessa.

SISÄLLYS	
1 JOHDANTO	8
2 SÄTEILYTURVAKESKUS	9
3 YLEISTÄ YDINVOIMASTA	10
3.1 Ydinreaktori	10
3.2 Ydinvoima ja ympäristö	10
3.3 Suomen ydinvoimalaitosten poikkeamat INES-asteikolla	12
3.3.1 INES-asteikko	12
3.3.2 Vaarallisimpia ydinvoimalaitosten onnettomuuksia maailmalla	13
3.4 Maailman ydinvoimalaitokset	14
3.5 Säteilyä ympäristöstä	15
3.6 Ydinaseet	16
4 YDINREAKTIO	16
4.1 Fissio	17
4.2 Fissioreaktio energiantuotannossa	18
5 SYÖTTÖVESIVIRTAUS OLKILUODOSSA	19
5.1 Syöttövesijärjestelmän 312 tehtävät	21
5.2 Syöttövesivirtauksen mittaus	21
5.3 Järjestelmän toteutus	22
6 LÄMPÖTILAN JA PAINEEN MITTAUS	22
7 MITTALAIPPA	23
7.1 Mittauksen perusteet mittalaipalla	24
7.2 Reynoldsin luku	27
8 MITTALAIPPOJEN TARKASTUS	28
9 TEHON MUODOSTUMINEN YDINVOIMALAITOKSESSA	29
10 TERMISEN TEHON LASKENTAOHJELMA CONDIN	32
11 MITTAUSTEN SUODATUSOHJELMA FILTER 2	33
12 HÖYRYN KOSTEUS	34
13 LASKENTAKAAVAN VIRHEPROSENTIN MÄÄRITTELY	35
13.1 Mittausten virhelähteet	35
13.2 Mitattujen suureiden virheiden arviointi	36
13.3 Laskettujen suureiden virheiden arviointi	37
13.4 Tilastollisia kaavoja	38
14 REAKTORIN TERMISEN TEHON KÄSINLASKENTAKAAVA	40

15 KÄSINLASKENTAKAAVAN VIRHETARKASTELU.....	43
16 MITTAUSKETJUN VIRHE.....	46
16.1 312K301-virtausmittauksesta aiheutuvat virheet	46
16.2 Osittaisderivaattojen yhdistäminen kokonaisdifferentiaaliksi.....	47
16.3 Laskukaavan kertoimet.....	48
17 OSITTAISDERIVAATTOJEN- JA KOKONAISDIFFERENTIAALIN LASKEMINEN.....	53
18 CONDIN-OHJELMAN TEHON LASKENNAN VIRHETARKASTELU.....	56
18.1 CONDINin lämpötaseen laskenta.....	56
18.2 Mittausketjujen virheet	60
18.3 Osittaisderivaatat ja kokonaisdifferentiaalit termin Q1 sisältämille kaavoille	62
19 YHTEENVETO	68

LIITTEET

Mittausvirheet ruotsin ydinvoimalaitoksilla	Liite 1
Laskentaohjelma CONDIN	Liite 2
CONDIN-ohjelman käyttämien mittapisteiden kalibrointi	Liite 3
Regressioanalyysi mittalaitteille	Liite 4
Regressioanalyysin laskemien arvojen selitykset	Liite 5
Ominaisuuslämpötilan funktiona Excelillä	Liite 6
Ominaisuuslämpötilan neliöjuuret, nimellislämpötila 182 °C	Liite 7
CONDINin käyttämien kaavojen virhelaskenta	Liite 8
CONDINin käyttämien termien laskennassa käytetyt mittausarvot	Liite 9

1 JOHDANTO

Lopputyössäni tutkin termisen tehon mittaamista ja laskentaa ydinvoimalaitoksilla Olkiluodossa. Tehon määrittäminen ydinvoimalaitoksilla on ollut viime vuosina ajankohtainen, median kertoessa ongelmista ja tehonylitystapauksista Ruotsin ydinvoimalaitoksilla (Liite 1).

Ydinvoimalaitoksella on tärkeää tietää, että reaktoria ei käytetä liian suurella teholla, jotta voimalaitoksen käyttö pysyy turvallisena. Toisin kuin muille voimalaitoksille, ydinvoimalaitoksille on määritetty sallittu 100 %:n teho (Olkiluodossa 2500 MW), joka täyttää turvallisuusmääräykset ja jolla sitä saadaan käyttää. Virhemarginaalina meillä Suomessa on käytetty 2 %:a, kuten useimmissa muissakin länsimaissa. Tämän 2 %:n marginaalin (102 %:n tehon) tulisi kattaa tehonlaskennasta ja mittaamisesta ja muista mahdollisista tekijöistä aiheutuvat virheet.

Työssäni tutkin Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla (esimerkkilaitoksena OL1) mittalaitteista mittaustulokseen aiheutuvaa virhettä. Jo ennen laskennan aloittamista on tiedossa, että suurin virheen aiheuttaja tehonmäärittämisessä on syöttöveden virtausmittaus.

Aloitin tehon määrittämiseen sisältyvän virheen tutkimisen termisen tehon käsinlaskentakaavan tarkastelulla. Kaavaan on tehty tiettyjä yksinkertaistuksia, jotka on selitetty myöhemmin käsinlaskentakaavan tarkastelun yhteydessä. Käsinlaskentakaavan lisäksi tarkastelen CONDIN – tietokoneohjelman (Liite 2) laskemaan tehoon mittalaitteista aiheutuvia virheitä. Ruotsissa on myös samantapainen ja samanniminen tehonlaskentaohjelma käytössä ydinvoimalaitoksilla (Liite 1).

Odotuksena on, että sekä käsinlaskentakaavan virhe, että CONDIN - laskennan virhe pysyy alle tämän 2 %:n turvamarginaalin. Käsinlaskentakaavaa käytettäessä tietysti myös inhimilliset virheet ovat mahdollisia, kuten esimerkiksi laskuvirheet tai mittarien luentavirheet, jotka taas CONDINin kohdalla eliminoituvat. Käsinlaskentakaavaa käytettäessä siinä tarvittavat prosessimittausarvot täytyy lukea manuaalisesti mittareista.

2 SÄTEILYTURVAKESKUS

Säteilyturvakeskus toimii kauppaja- ja teollisuusministeriön alaisuudessa. Säteilyturvakeskuksen pääkonttori sijaitsee Helsingissä, jonka alaisuudessa toimivat Olkiluodossa olevat paikallistarkastajat, jotka valvovat sekä käyviä laitoksia, että rakenteilla olevaa OL3:sta. Myös Loviisan ydinvoimalaitoksella on omat paikallistarkastajansa sekä Rovaniemellä sijaitsee STUKin aluelaboratorio.

Säteilyturvakeskus toimii usealla eri toimialueella, joita ovat: /1/

- Ydinturvallisuusvalvonta
- Säteilyturvallisuusvalvonta
- Tutkimus
- Ympäristön säteilyvalvonta
- Viestintä, valmiustoiminta ja palvelut

Ydinturvallisuusvalvonta käsittää ydinvoimalaitokset, ydinmateriaalit ja ydinjätteet.

Valvonta perustuu ydinenergialakiin, jonka päätarkoitus on ydinenergian käytön pitäminen yhteiskunnan kokonaisedun mukaisena ja erityisesti sen varmistaminen, että ydinenergian käyttö on ihmisen ja ympäristön kannalta turvallista eikä edistä ydinaseiden leviämistä. /2, 3/

Suomessa ydinvoimalaitoksilla polttoaineena käytetystä uraanista ei pysty valmistamaan ydinaseita, kun taas monissa Itä-Euroopan alueen maissa käytettyjä polttoaineita pystyy hyödyntämään ydinaseiden rakennuksessa, juuri näissä maissa valvonta ja turvallisuus eivät ole läheskään samalla tasolla kuin suomessa.

3 YLEISTÄ YDINVOIMASTA

3.1 Ydinreaktori /4/

Ydinreaktori on tekninen laite, jolla tuotetaan ja ylläpidetään ydinreaktioita. Ydinreaktoria käytetään muun muassa tutkimukseen, säteilyn tuottamiseen (esimerkiksi sädehoitoon), isotooppien valmistamiseen (mm. lääketieteen käyttöön), kulkuneuvon (laiva tai sukellusvene) voimanlähteenä ja sähkön tuotannossa.

Ydinvoimareaktorien selkeä pääosa on kevytvesireaktoreita. Nykyään rakennettavissa uusissa voimalaitoksissa on melkein jokaisessa kevytvesireaktori, joita on kahta tyyppiä: Painevesireaktori PWR ja kiehutusvesireaktori BWR.

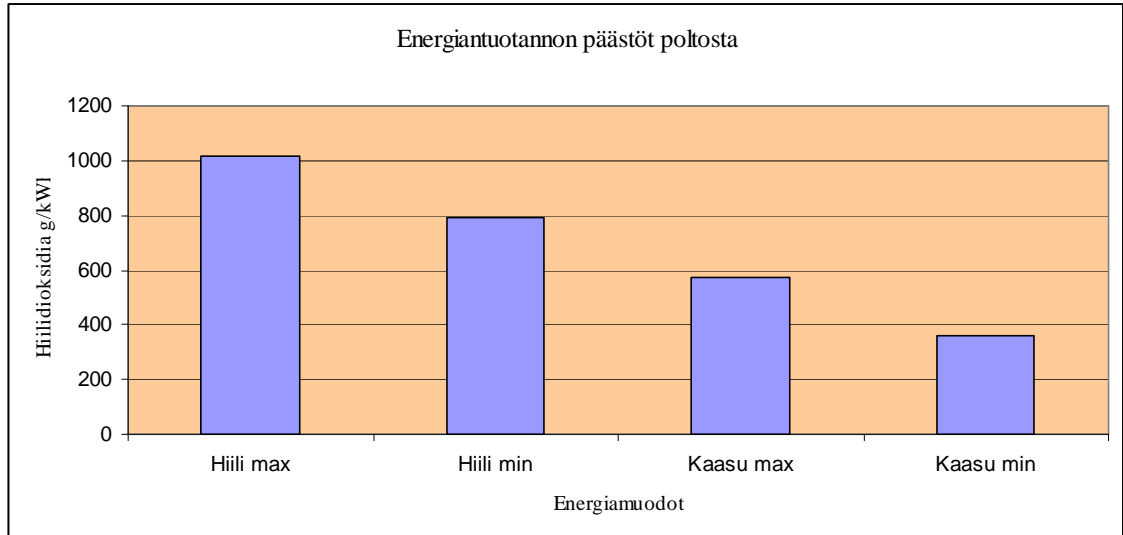
Muita reaktorityyppejä ovat: kaasujäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori, vesijäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori (käyttö lähinnä Venäjällä mm. Tshernobyl), nestemäisellä metallilla jäähdytetty grafiittihidasteinen reaktori, paineistettu raskasvesireaktori.

3.2 Ydinvoima ja ympäristö /5/

Ydinvoimalaitos ei tuota ympäristölle haitallisia päästöjä toisin kuten esimerkiksi fossiiliset polttoaineet. Ydinvoimalaitoksella on kuitenkin välittömiä haittavaikutuksia kuten muillakin lämpövoimalaitoksilla, nämä haittavaikutukset eivät silti koske erityisesti ydinvoimalaitoksia. Ydinvoimalaitoksen suurin välitön haittavaikutus on lauhduttimen jäähdytykseen käytetyn meriveden lämpeneminen. Mereen palatessaan lauhde lämmitteää vettä ja voi aiheuttaa paikallisia ekosysteemimuutoksia.

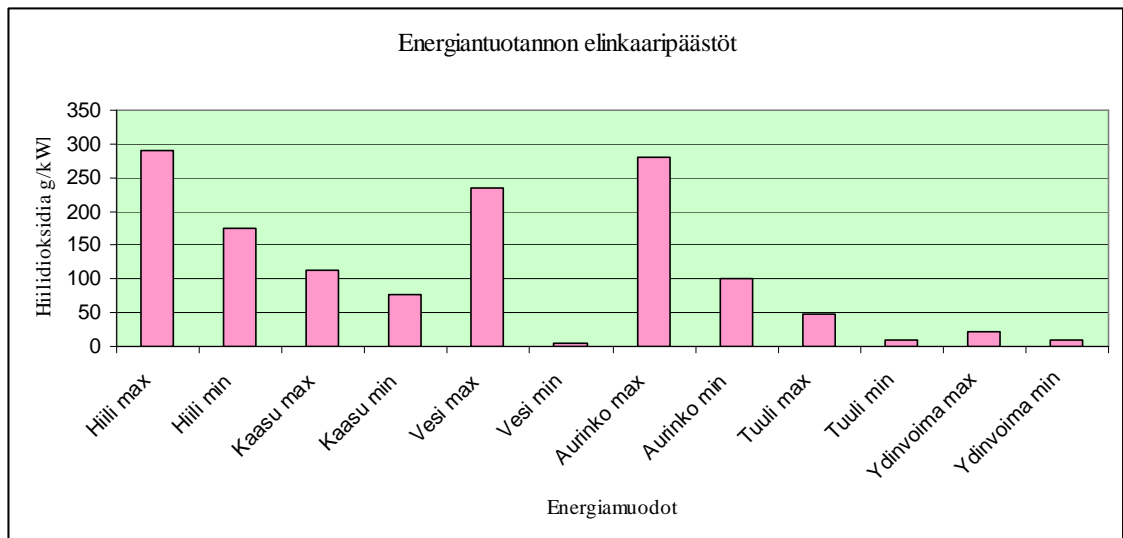
Kuten kaikki muukin energiantuotanto, ydinvoima aiheuttaa myös välillisiä haittavaikutuksia. Esimerkiksi uraanin louhinta saattaa aiheuttaa paikallisia ympäristöongelmia ja työtapaturmia sekä työperäisiä sairauksia, kuten myös fossiilisen polttoaineen, hiilen, louhintakin. Kokonaisuudessaan koko ydinpolttoainekierto kuormittaa vähemmän ympäristöä ja aiheuttaa vähemmän henkilövahinkoja suhteessa tuotettuun energiaan kuin

fossiilisten polttoaineiden käyttö ja monet uusiutuvat energianlähteet. Osa tästä selittyy energiantuotannossa tarvittavan uraanin hyvin pienistä määristä, jolloin kaivostoiminta-kin on pientä. Hiilikaivosten haitat taas ovat huomattavasti suuremmat, kuin uraanikaivosten, verrattuna tuotettuun energiaan.



Kuvio 1: Eri energiamuotojen poltosta syntyvien kasvihuonekaasujen maksimi- ja minimipäästöt.

/6/



Kuvio 2: Eri energiamuotojen elinkaaren aikana muusta kuin poltosta/käytöstä syntyvien kasvihuonekaasujen maksimi- ja minimipäästöt. /6/

3.3 Suomen ydinvoimalaitosten poikkeamat INES-asteikolla

Kansainvälisesti käytetään INES-asteikkoa kuvaamaan kaikkia ydinsäteilyn käyttöön liittyviä onnettomuuksia tai käyttöpoikkeamia. Suomen ydinvoimalaitoksilla on tapahtunut vain INES 1- ja INES 2- luokkiin kuuluvia poikkeamia, näistäkin valtaosa INES 1-luokan poikkeamia.

3.3.1 INES-asteikko

1. Poikkeuksellinen turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
2. Merkittävä turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
3. Vakava turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
4. Laitosonnettomuus
5. Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus
6. Vakava onnettomuus
7. Erittäin vakava onnettomuus

/7/

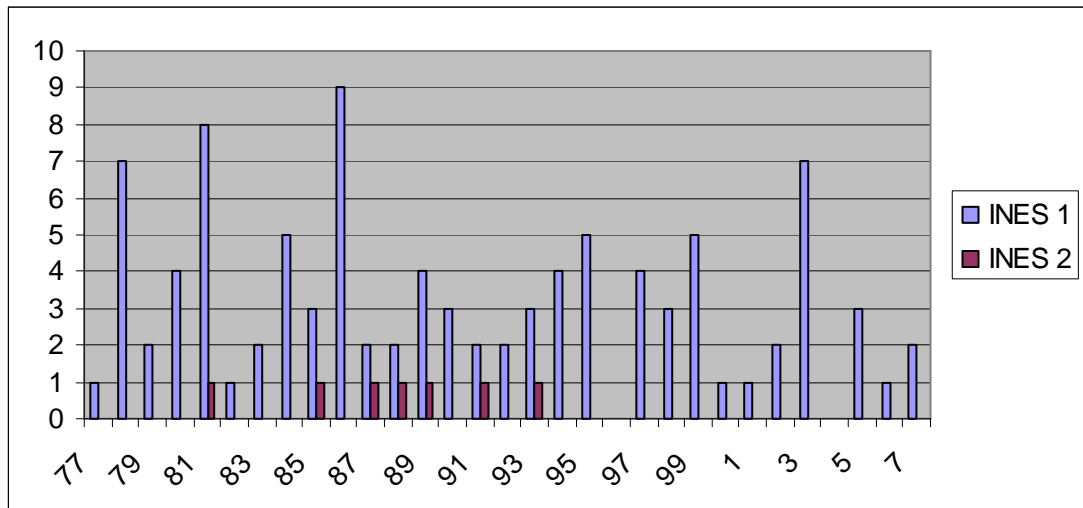
Säteilyturvakeskuksen sivuilla INES 2-luokan onnettomuus on määritelty seuraavasti:

” Tapahtuma, jossa on merkittävä puute turvallisuuteen vaikuttavissa tekijöissä, mutta jossa turvallisuus on edelleen varmistettu mahdollisesta lisäviasta huolimatta.

Tapahtuma, josta aiheutuu työntekijälle annosrajan ylittävä säteilyannos. Tapahtuma, joka johtaa radioaktiivisten aineiden merkittävään vapautumiseen laitoksen sisätiloissa alueille, joihin niiden ei ole suunniteltu pääsevän.” /7/

Seuraavassa kuviossa olen esittänyt Suomen ydinvoimalaitoksilla koko niiden käyttöaikana sattuneet poikkeamat. Lähteenä on käytetty Säteilyturvakeskuksen kirjanpitoa Suomen ydinvoimalaitosten INES-asteikolla määriteltävistä häiriöistä.

/7/



Kuvio 3: Ydinvoimalaitosten poikkeamat INES-asteikolla (Pystyakselilla on kuvattu yksittäisten tapausten lukumäärä (kpl) vuotta kohti, aikaväli on vuodesta 1977 vuoteen 2007). /8/

Kuten kuvasta voi todeta INES 2-luokan onnettomuudet ovat olleet hyvin vähäisiä Suomessa ja INES 1-luokan onnettomuudetkin ovat jääneet alle 10 kappaleeseen vuodessa.

Loviisan laitoksilla käyttö aloitettiin vuosina 1977 ja 1981, laitokset ovat PWR laitoksia ja niiden teho on 488MW/laitosyksikkö. Olkiluodon laitoksilla käyttö aloitettiin vuosina 1979 ja 1982, laitokset ovat BWR laitoksia ja teholtaan 860 MW/laitosyksikkö. /5/

3.3.2 Vaarallisimpia ydinvoimalaitosten onnettomuuksia maailmalla /5/

1979 - Three Mile Island (Harrisburg), Yhdysvallat

Historian toiseksi pahin ydinvoimalaitos onnettomuus, usean yhtäaikaisen vian ja operaattorin virheen vuoksi reaktorin ydin suli osittain. Laitoksen turvajärjestelmät toimivat suunnitellusti. Vaaraa ympäristölle tai henkilövahinkoja ei aiheutunut. INES 5.

1980 - Saint-Laurentin ydinvoimala, Ranska

Osa reaktorin polttoaineesta suli polttoaineen vaihdossa tapahtuneessa onnettomuudessa. Onnettomuus ei aiheuttanut vaaraa ympäristölle. INES 4.

26. huhtikuuta 1986 - Tšernobylin ydinonnettomuus, Neuvostoliitto (Ukraina)

Historian pahin ydinonnettomuus; Reaktorin ydin sulii ja runsaasti radioaktiivisia saasteita levisi ympäristöön. INES 7.

Myös muualla kuin ydinvoimalaitoksissa tapahtuu säteilyyn liittyviä onnettomuuksia:

2008 Charleroi isotooppilaboratorio Belgia

Etelä-Belgiassa sijaitsevassa lääkelaboratoriossa sattui elokuun lopulla 2008 vakava radioaktiivinen vuoto. Radioaktiivisia isotooppeja lääketieteelliseen käyttöön valmistavasta laboratoriosta pääsi vuotamaan radioaktiivista jodia. Viranomaiset kielsivät lähialueen asukkaita käyttämästä puutarhavihanneksia ravinnoksi ja syöttämästä ruohoa karjalle. INES 3.

3.4 Maailman ydinvoimalaitokset

Seuraava taulukko on laadittu siten, että järjestystä laadittaessa on otettu huomioon vain käynnissä olevat ydinvoimalaitokset maittain. Tästä syystä esimerkiksi Kiina on vasta luettelon puolivälissä, vaikka siellä on eniten rakenteilla olevia ydinvoimalaitoksia tämän listan maiden joukossa.

Taulukko 1. Ydinvoimalaitosten määrä 18 maassa, joissa eniten käynnissä olevia ydinvoimalaitoksia maailmassa: /9/

18 maata, joilla eniten käyviä ydinvoimalaitoksia 16.3.2009		
Maa	Käyvät laitokset	Rakenteilla olevat
USA	104	1
Ranska	59	1
Japani	53	2
Venäjä	31	8
Etelä-Korea	20	5
Iso-Britannia	19	-
Kanada	18	-
Saksa	17	
Intia	17	6
Ukraina	15	2
Kiina	11	11
Ruotsi	10	-
Espanja	8	-
Belgia	7	-
Tshekki	6	-
Sveitsi	5	-
Suomi	4	1
Unkari	4	-

3.5 Säteilyä ympäristöstä /5/

Ihmiset saavat päivittäin säteilyä ympäristöstä, jossa he elävät, joten ydinvoiman käyttö ei ole ainoa säteilyn aiheuttaja maapallollamme tai sen ulkopuolella. Itse asiassa säteilyä on esiintynyt avaruudessa jo ennen ihmisen saapumista maapallolle, mutta esimerkiksi hiilivoimaloiden aiheuttamia myrkyllisiä päästöjä on tullut ilmakehään vasta ihmisen alettua hyödyntää fossiilisia polttoaineita energiantuotannossa. Asuintaloissakin esiintyvä radon-säteily on peräisin maankuoresta, joka itsessään on radioaktiivinen ja vapauttaa radonia ilmakehään. Myös joidenkin ammattiryhmien edustajat altistuvat muita ihmisiä enemmän säteilylle, vaikka eivät säteilylähteiden parissa työskentelekään, esimerkkejä tällaisista ammattiryhmistä ovat: lentokoneen miehistö, turistioppaat sekä kaivostyöntekijät.

3.6 Ydinaseet

Luonnonuraanista alle prosentti on fissiiliä isotooppia U-235. Ydinvoimaloissa käytetään rikastettua uraania, jonka U-235-pitoisuus on useimmiten alle viisi prosenttia. Ydinaseissa taas käytetään yli 95 prosentin rikastusastetta. Tämän takia ydinaseen tekeminen ei onnistu käyttämällä tavallista ydinvoimaloiden polttoainetta. Ydinaseissa käytetyssä plutoniumissa taas Pu-239 pitoisuus on vähintään 93 %, tällaista plutoniumia voidaan käyttää myös sähköntuotantoon. /5, 9/

4 YDINREAKTIO

Ydinvoimalaitoksen tehonmuodostus perustuu fission, joka tarkoittaa atomiytimen pilkkomista pienemmiksi osiksi. Toisin kuin radioaktiivinen hajoaminen, fissio tarvitsee alkusysäyksen käynnistyäkseen. Koska atomiytimet pyrkivät pysymään kaikkein stabiileimmassa tilassaan, joka on pallomainen muoto, tarvitaan energiaa joka rikkoo tämän pallomaisen muodon jotta ydinreaktio saataisiin käynnistymään. Ydinreaktion tehokkuus energiantuotannossa johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että fissioreaktiossa vapautuneet neutronit aiheuttavat taas seuraavien atomien fission, jossa taas vapautuu uusia neutroneja jatkamaan fissioreaktiota, toisin sanoen fissio perustuu ketjureaktioon. /10/

Atomiytimissä nukleoneihin vaikuttaa lähinnä kahdenlaisia voimia, ydinvoimia ja sähköstaattisia voimia varattujen hiukkasten välillä. Neutronit ovat varauksettomia, niiden ja protonien välillä ei ole sähköisiä voimavaikutuksia. Nukleonien välillä sen sijaan on erittäin vahva vuorovaikutusvoima, ydinvoima. Ydinvoima ei riipu varauksesta, joten kaikki vuorovaikutukset ovat samanlaisia ydinvoiman kannalta. Ydinvoiman kantama ei ole kovin pitkä, eli ydinvoima vaikuttaa vain hyvin lähellä toisiaan oleviin hiukkasiin.

/11/

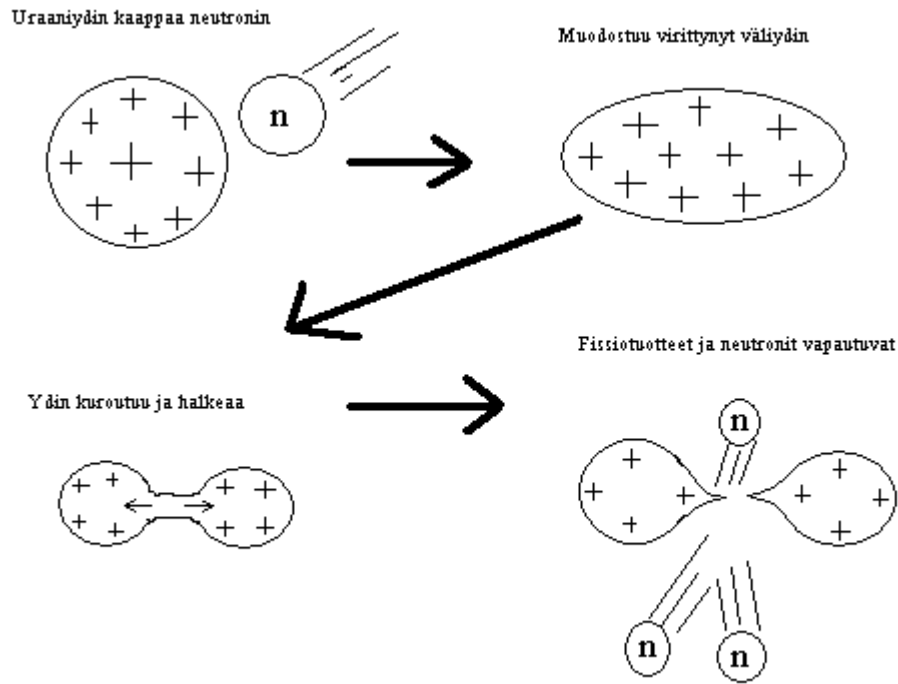
Protonit ovat pääasiassa kahden voiman vaikutuspiirissä, ydinvoiman ja Coulombin poistovoiman. Ydinvoimat ovat voimakkaampia kuin sähköiset poistovoimat positiivisesti varattujen protonien välillä. Nukleonien ollessa hyvin lähellä toisiaan, ydinvoimat pitävät ne yhdessä, mutta ydinvoimien ulkopuolella hallitseva voima on sähköstaattinen poistovoima protonien välillä. Jotta protoni pääsisi ytimeen, sen energian on ylitettävä sähköisen poistovoiman synnyttämän Coulombin vallin tai sen on tunkeuduttava vallin läpi. Coulombin valli ei vaikuta varauksettomaan neutroniin, joten se pääsee helpommin ytimeen. Siksi neutroneja käytetään ammuksina fission yhteydessä. /11/

4.1 Fissio

Kun raskaaseen ytimeen tuodaan energiaa pommittamalla sitä neutroneilla, ydin joutuu virittyneeseen tilaan kaapatessaan neutronin. Kun ydin halkeaa, osat sinkoutuvat erilleen protonien välisen poistovoiman antaman vauhdin seurauksena. Halkeamistuotteet törmäävät suurella nopeudella muihin atomeihin ja hidastuvat. Törmäykset lisäävät atomien liike-energiaa, jolloin väliaineen lämpötila kohoaa. /11/

Edellytyksenä raskaampien ydinten halkeamiselle on, etteivät ydinvoimat riitä enää protonien määrän lisääntyessä pitämään nukleoneja yhdessä. Siksi fissio voi tapahtua itsestään esimerkiksi uraani-238:ssa, joka kuitenkin on hyvin harvinaista. Tietyt raskaat ytimet, kuten uraani-235, uraani-233 ja Pu-239, saadaan halkeamaan pommittamalla niitä neutroneilla, jolloin tapahtuvan fission yhteydessä vapautuu runsaasti energiaa. Raskaan ytimen haljetessa syntyvien osien massa on pienempi kuin halkeavan ytimen massa. Lähtöytimen ja tulososasten välinen massavaje vastaa fissiossa vapautuvaa energiaa. /11/

Näistä aineista luonnossa esiintyy kuitenkin vain uraani-235:ttä. Vain 0,7 % luonnon uraanista on uraani 235:ttä, loput 99,3 % on uraani 238:aa. Tästä syystä urania täytyy rikastaa, jotta uraani 238:sta saadaan käyttökelpoista polttoainetta ydinvoimalaitoksiin. /10/



Kuva 1: Fissioreaktio. /11/

Voidaan osoittaa, että parillisen protoni- että neutroniluvun omaavilla ytimillä on tapana virittyä korkeammalle energiatilalle kuin ytimien, joilla protoni- ja neutroniluku on pariton. Voimakkaasti virittynyt ydin halkeaa helpommin. U-236 ydin muodostuu U-235 ytimen kaapatessa neutronin. U-236:lla on parillinen protoni- ja neutroniluku ja kaapatu neutroni antaa sille runsaasti energiaa. Ydin on voimakkaasti virittynyt ja fissio on mahdollinen. /11/

4.2 Fissioreaktio energiantuotannossa

Eräs tärkeimmistä turvallisuuden liittyvistä asioista, kun fissiolla tuotetaan energiaa, on fissioreaktion pitäminen käynnissä niin, että se pysyy hallinnassa. Ketjureaktion ylläpitämiseksi pitää olla jatkuvasti tarjolla riittävä määrä uusia neutroneja. Tavallisesti osa neutroneista katoaa kierrosta aiheuttamatta uusia fissioita. Jotta neutroneja on riittävästi, täytyy reaktorisydämen olla riittävän suuri. Kriittiseksi massaksi kutsutaan sitä polttoainemateriaalin määrää, joka on riittävä fissioreaktion jatkumiseksi, kun se on saatu

käynnistettyä. Ydinvoimalaitosten valvonnan tärkein tavoite on varmistaa reaktorin pysyminen hallinnassa kaikissa tilanteissa. /2, 10/

5 SYÖTTÖVESIVIRTAUS OLKILUODOSSA

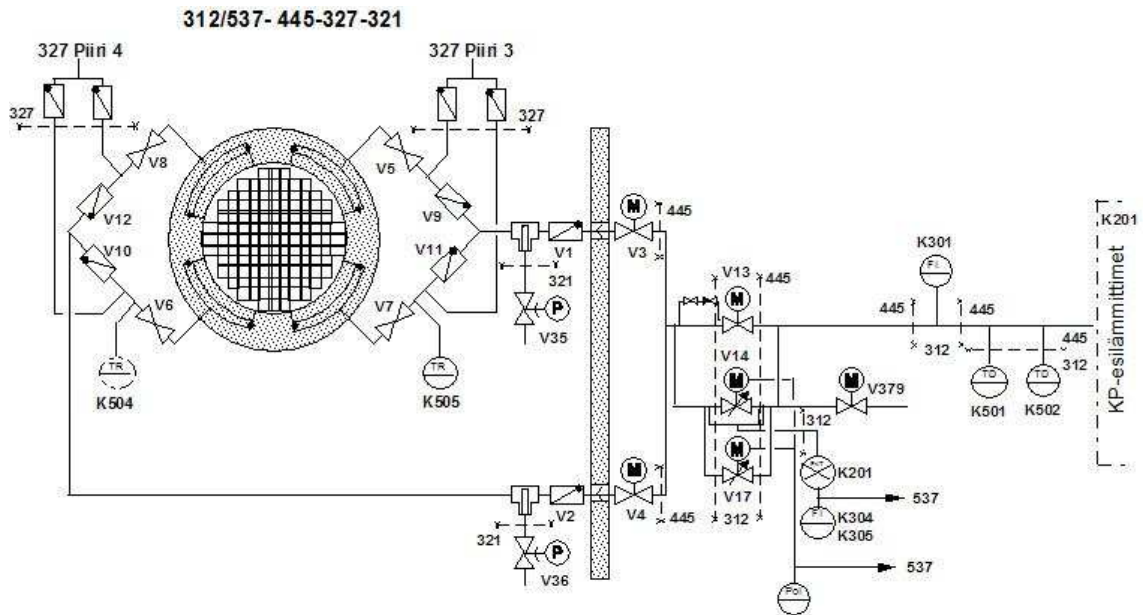
Olkiluodossa syöttövesivirtausta mitataan mittalaipan avulla. Syöttövesimittaus laipalla perustuu suoraan putkeen asennetun kuristuslaipan aiheuttaman staattisen painehäviön mittaamiseen. Putken suoran osuuden on oltava riittävän pitkä, jotta virtausjakauma on laminaarinen ennen laippaa. Prosessitietokoneelle tulee syöttövesilaipasta kaksi mitta- pistettä: 312K301 ja 312K303. Käytössä olevat mittalaipat tarkistetaan joka neljäs vuosi. Mittausten 312K301 ja K303 paine-erolähttimet kalibroidaan kerran vuodessa, lisäksi mittausten välinen ero tarkistetaan 4kk:n välein. Mittausten ero saa olla korkeintaan ± 2 kg/s. Vuonna 2001 teetettiin Tampereen teknillisen korkeakoulun Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksen johtajalla tutkimus syöttövesivirtausmittauksen epävarmuudesta. Tutkimuksen tuloksena saatiin mittauslaipan laajennetuksi epävarmuudeksi n.1,3 % 95 %:n luottamustasolla. /12, 13/

Nimellispaine-eron laskentaan käytetään mittauslaipan tarkastuksista saatavia laipan ja putken halkaisijoita sekä seuraavia arvoja: /13/

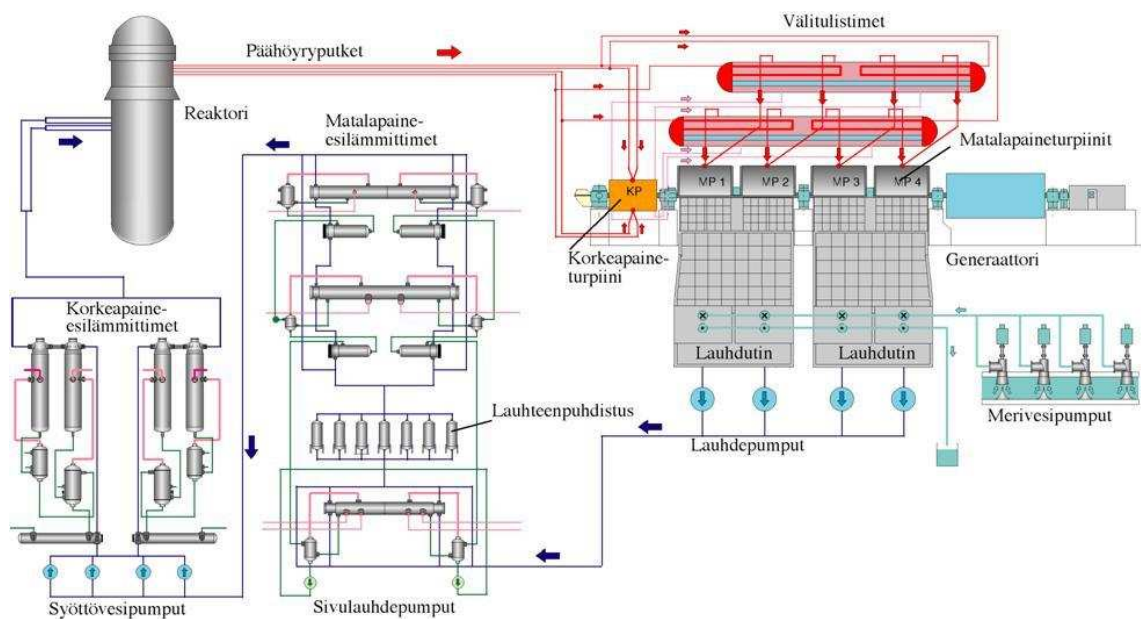
$$\text{nimellistilan massavirta } q_m = 1400 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{nimellistilan lämpötila } T = 182^\circ\text{C}$$

$$\text{nimellistilan paine } p = 74\text{bar}$$



Kuva 2: Syöttövesivirtaus Olkiluodossa /14/



Kuva 3: Veden/höyryn kierto Olkiluodon ydinvoimalaitoksessa /14/

Mahdolliset virheet käytettäessä mittalaippaa virtausmittauksessa voivat aiheutua seuraavista tekijöistä: mittauslaitteen rakenne poikkeaa standardissa määritellystä, mitattavan aineen lämpötila tai paine muuttuu mittauksen aikana tai niitä ei tiedetä, epäpuhtau-

det, kavitaatio. Myös putkisto voi aiheuttaa virhettä mittaukseen, virheen aiheuttajana voi olla: mutkat, halkaisijan muutokset, huonot saumat, laippaliitokset, venttiilit, haaroitukset ja syöpymät. /15/

5.1 Syöttövesijärjestelmän 312 tehtävät /13/

Kuljettaa syöttövesi järjestelmän 445 toimitusrajalta reaktoripaineastiaan.

Ottaa reaktorin sisäpuolisilta osilta vastaan vettä sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmästä 321 sekä apusyöttövesijärjestelmästä 327 ja johtaa nämä vedet reaktoriin.

Yhdessä turbiinilaitoksen syöttövesijärjestelmän 445 kanssa pitää vedenpinta reaktorin paineestiassa ennalta määrättyjen raja-arvojen sisällä. Jakaa reaktoriin pumpattava vesivirtaus tasaisesti neljälle syöttövesilinjalle ja pitää syöttöveden virtaus- ja lämpötilajakauma tasaisena.

Syöttövesijärjestelmä saa vetensä turbiinilaitoksen syöttövesijärjestelmästä. Syöttövesi pumpataan kahden rinnakkaisen korkeapaine-esilämmityslinjan kautta järjestelmän 445 yhdysputkeen. Yhdysputken jälkeen järjestelmä haarautuu kahdeksi linjaksi ennen järjestelmärajaa, joten syöttövesijärjestelmällä on kaksi suojarakennuksen läpivientiä. Suojarakennuksen sisäpuolella nämä kaksi linjaa haarautuvat neljäksi syöttövesilinjaksi, jotka liittyvät reaktoripaineastiaan. Normaalikäytössä virtaus neljän syöttövesihaaran kautta reaktoriin on yhteensä 1340 kg/s. Reaktoritankin syöttövesiyhteet on varustettu kuristimilla, joiden tehtävänä on muodostaa samansuuruinen virtausvastus kaikkiin syöttövesilinjoihin. Niiden avulla varmistetaan, että jokaiseen syöttövesilinjaan saadaan samansuuruinen ja tasaisena pysyvä virtaus.

5.2 Syöttövesivirtauksen mittaus /13/

Alhaisilla syöttövedenvirtauksilla mittauksia 312 K304 ja K305 käytetään virtauksen valvontaan. Mittausalue K304:ssä ulottuu tasolle 300 kg/s ja K305:ssä tasolle 40 kg/s asti. Mittausarvot muodostetaan laskennallisesti venttiilien 312 V14/V17 yli vaikuttavan paine-eron 312 K201 mittauksesta ja kyseisten venttiilien asentotiedoista.

Korkeilla syöttövedenvirtauksilla käytetään mittauksia 312 K301 virtauksen valvontaan. Mittausalue ulottuu 1400 kg/s asti. K301:n mittauslaippa sijaitsee syöttövesilinjan yhdysputkessa ennen säätöventtiilejä. Tätä virtausmittausta käytetään normaaliin syöttöveden säätöön. Laitoksen käydessä nimellisteholla on syöttövesivirtaus n.1260 kg/s.

5.3 Järjestelmän toteutus /13/

Syöttövesijärjestelmä on suunniteltu kuljettamaan 1260 kg/s virtauksella 186-asteista vettä reaktoriin laitoksen käydessä täydellä teholla. Järjestelmän tulee myös ottaa vastaan jatkuva 80 kg/s paluuvirtaus 280-asteista vettä sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmästä 321. Järjestelmän tulee lisäksi jakaa syöttövesivirtaus tasaisesti ja tasalämpöisenä sisemmille syöttövesilinjoille. Virtausten tasaisuudella varmistetaan paineastian läpivientien ja reaktorin polttoaineen tasainen kuormitus.

Syöttövesivirtauksen säätöön tarkoitettu virtausmittaus on asennettu korkeapaine-esilämmittimien jälkeiseen syöttövesilinjan yhdysputkeen. Virtausmittauksen jälkeen yhdysputkeen on sijoitettu lämpötilamittaukset. Suojarakennuksen sisäpuolella sijaitsevat lämpötilamittaukset on asennettu sisempien syöttövesilinjojen vaakasuorien putkiston haarojen korkeimpiin kohtiin.

Suojarakennuksen sisällä on normaalisti typpitäyttö ja lämpötila on n. 55⁰ C, suhteellinen kosteus n. 90 % ja paine n. 1 bar.

6 LÄMPÖTILAN JA PAINEEN MITTAUS /16/

Syöttövesivirtausmittauksen lisäksi tässä työssä tarkasteltaviin laskuihin liittyy kaksi lämpötilamittausta 312K501 ja 312K502 sekä neljä painemittausta 211K101-K104. Lämpötilamittauksista ensimmäistä (K501) käytetään termisen tehon laskennassa ja toinen lämpötilamittaus on testimittaus, johon ensimmäistä tehonlaskennassa käytettyä mittausta voidaan verrata.

TVO:lla käytetään seuraavia mittaustapoja lämpötilan mittaamiseen:

- Höyrynpainelämpömittari
- Kaksimetallinen lämpömittari
- Lämpötilakatkaisin
- Resistanssimittari
- Termopari

Yleisimmin TVO:lla käytetty lämpömittari on Pt 100.

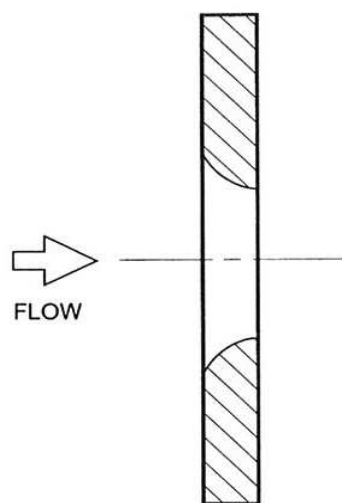
TVO:lla käytetään seuraavia mittaustapoja paineen mittaamiseen:

- Bourdon putki
- Palje-mittari
- Mäntä-mittari
- Diafragma-elektrolysoimiskenno
- Barton kenno

7 MITTALAIPPA /17/

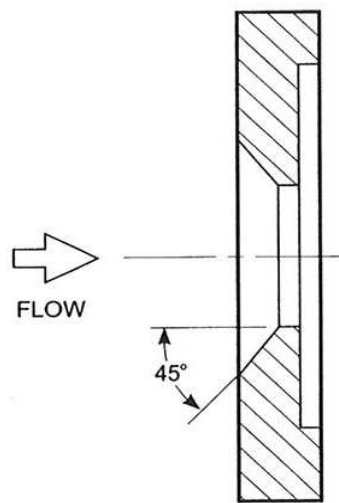
Mittalaippaa on käytetty ensimmäisen kerran jo 1700-luvulla, kun Italialainen fyysikko Giovanni B. Venturi suoritti ensimmäisen mittauksen käyttäen mittalaippaa nesteen nopeuden mittaukseen.

(a) pyöristetty laippa



(a) QUADRANT-EDGED ORIFICE

(b) kartiolaippa



(b) CONICAL ORIFICE

Kuva 4: Mittalaipat puhtaalle nesteelle. /17/

7.1 Mittauksen perusteet mittalaipalla

Paineen vaihtelu mittalaipassa perustuu virtaavan aineen nopeuden muutokseen. Asiaa voidaan havainnollistaa matemaattisesti käyttäen seuraavia kaavoja:

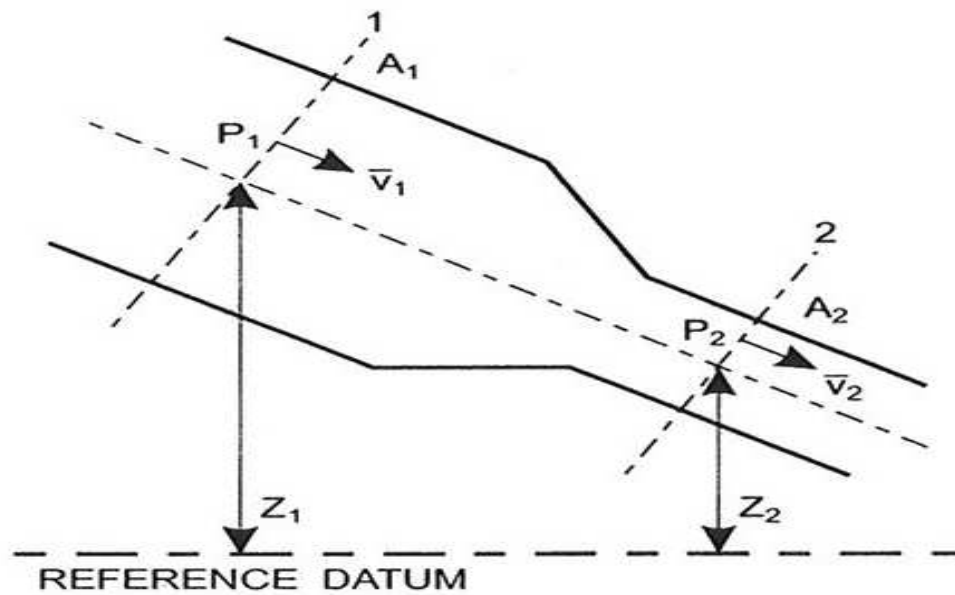
- Tilavuusvirta Q on

$$Q = A * v \quad (7.1)$$

missä A = putken pinta-ala, v = nesteen nopeus.

Kun tähän kaavaan lisätään massan säilymisen laki, jatkuvuuden laki muodostaa riippuvuuden nopeuden ja nesteen virtauksen välille kokoonpuristumattomalle nesteelle suljetussa piirissä.

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad (7.2)$$



Kuva 5: Nesteen paine ja nopeus putken eri kohdissa putken pinta-alan muuttuessa. /17/

- Bernoullin yhtälön sovellus:

Ideaalinesteelle Bernoullin yhtälön mukaan pätee että nesteen staattisten energioiden summa, kineettinen energia ja potentiaalienergia säilyvät nesteen kulkiessa putken kaapeamman osan läpi:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{vakio} \quad (7.3)$$

missä P = staattinen paine, ρ = nesteen tiheys, g = kiihtyvyys johtuen maan vetovoimasta, z = korkeus.

- jolloin:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (7.4)$$

Nopeuden pieneneminen eli kineettisen energian pieneneminen aiheuttaa paineen nousun eli staattisen energian lisääntymisen. Tämä kineettisen energian muuttuminen staat-

tiseksi energiaksi voidaan hyödyntää paineen ja nopeuden mittaamisessa. Tämän jälkeen hyödynnetään fysiikan lakeja liittyen esineiden vapaaseen pudotukseen ja kuljetuun matkaan, jotta saadaan muodostettua yhtälö paineen muutoksesta putkessa.

- Levosta lähtevän, vapaasti putoavan esineen nopeus saadaan yhtälöstä:

$$v = gt \quad (7.5)$$

- Ja esineen kulkema matka saadaan yhtälöstä:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (7.6)$$

missä t = aika, h = korkeus.

Kun nopeuden yhtälö ratkaistaan t :n suhteen $t = \frac{v}{g}$ ja sijoitetaan saatu yhtälö esineen

kulkeman matkan yhtälöön saadaan:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (7.7)$$

tai

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7.8)$$

Tämä yhteys paineen ja nopeuden välillä on perusta paine-eroon perustuvassa mittauksessa. Korvaamalla nopeus v kaavassa $Q = A * v$ äsken saadulla tuloksella $v = \sqrt{2gh}$ saadaan:

$$Q = A * \sqrt{2gh} \quad (7.9)$$

Kun tähän kaavaan taas sijoitetaan nopeuden korjauskerroin C_v ja pinta-ala kirjoitetaan

muotoon $A = \pi * \frac{d^2}{4}$ saadaan:

$$Q = \left(\pi * \frac{d^2}{4} \right) * C_v * \sqrt{2gh} \quad (7.10)$$

Kun tähän kaavaan sijoitetaan supistuskerroin C_c :

$$Q = C_c * C_v * \left(\pi * \frac{d^2}{4} \right) * \sqrt{2gh} \quad (7.11)$$

Kertoimien $C_c * C_v$ tuloa sanotaan purkaukertoimeksi tai virtauskertoimeksi, sijoitetaan tämä edelliseen yhtälöön:

$$Q = C * A * \sqrt{2gh} \quad (7.12)$$

Kun tätä kaavaa sovelletaan putkivirtauksien paine-ero mittauksiin korkeus h vastaa suodatuspainetta, joka vallitsee kahden pisteen välillä putkessa. Painekorkeus/hydrostaattinen paine esitetään yleisimmin nestepatsaan korkeutena.

Viskoosittomille nesteille virtausprofiili olisi yhtenäinen putken joka kohdassa. Oikeiden nesteiden viskositeetti kuitenkin hidastaa virtausta putken reunojen lähellä. Reynoldsin luku kuvaa nesteen virtausta putkessa.

7.2 Reynoldsin luku

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu_k} \quad (7.13)$$

missä D = putken sisähalkaisija, ν_k = kinemaattinen viskositeetti

Jos Reynoldsin luku on alle 2000 virtaus on laminaarista, luvun ollessa yli 4000, on virtaus on turbulenttia. Näiden lukujen välisellä alueella virtaus vaihtelee turbulentin ja laminaarisen välillä.

Mittauslaippaa käytettäessä on aina olemassa pieniä paineenalentumisia johtuen nesteen kitkasta putkessa. Tämä paineenalentuminen voidaan ilmoittaa laipan ja putken hal-

kaisijoiden suhteena $\beta = \frac{d_{laippa}}{D_{putki}}$. Kun putken Reynoldsin luku on alle 10000, laipan

yläreuna voidaan tasoittaa, jolloin saavutetaan paremmin vakiona pysyvä virtauskerroin pienimillä Reynoldsin luvuilla. Täysisärmäisellä laipalla kertoimen muutos, Reynoldsin luvun ollessa 5000 - 10000, voi olla jopa 30 %, kun taas tasatulla laipalla vaikutus on vain 1-2 %. Tasoitettu laippa on joko pyöristetty tai kartiomainen.

8 MITTALAIPPOJEN TARKASTUS

TVO:lla syöttöveden mittalaipat tarkastetaan neljän vuoden välein, jolloin mittaamalla tarkastetaan, että laipan geometria ei ole muuttunut liikaa veden vaikutuksesta. Mittauksen suorittaa Mittatekniikan keskuksen henkilökunta.

Olkiluodon 2 laitoksella laipat on viimeksi tarkastettu vuosina 2007 ja 2003. Mittalaipoista on tarkastettu tulopuolen pinnankarheus, aukon reunan paksuus kahdesta kohdasta, virtausaukon halkaisija, putken sisähalkaisija sekä tulopuolen särmän säde. Seuraavassa taulukossa on vertailtu kahden peräkkäisen mittauksen arvojen eroavaisuuksia:

/18/

Taulukko 2. Kahden peräkkäisen mittalaippatarkastuksen arvojen erot keskiarvoina:

/18/

Aukon reunan paksuus kohta 2.	0,0775 mm
Tulopuolen särmän säde	0,000 mm
Putken keskihalkaisija	0,015 mm

OL1 laitokselta oli saatavilla vuoden 2005 tarkastusraportti, seuraava tarkastus on tänä vuonna 2009. Seuraavassa erot laitosten välillä verrattuna OL2:n vuosien 2003 ja 2007 raportteja OL1:n vuoden 2005 raporttiin: /18/

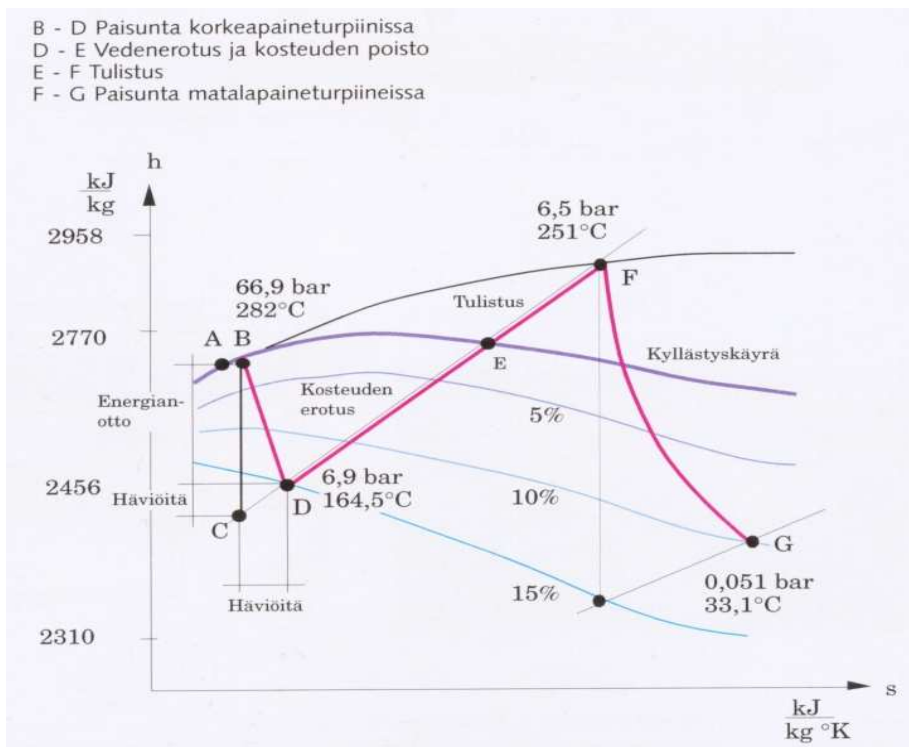
Taulukko 3. Erot OL1 ja OL2 laitosten mittalaipoissa vuonna 2005 tehdyn tarkastuksen perusteella keskiarvoina: /18/

	2003	2005
Virtausaukon halkaisija	0,352 mm	0,345 mm
Putken halkaisija	4,225 mm	4,21 mm
Tulopuolen särmän säde	0,03 mm	0,03 mm

Mittalaipasta on tehty vuonna 2001 tutkimus, jossa on todettu mittaustuloksen virheeksi 1,3 % mittaustuloksesta. /19/

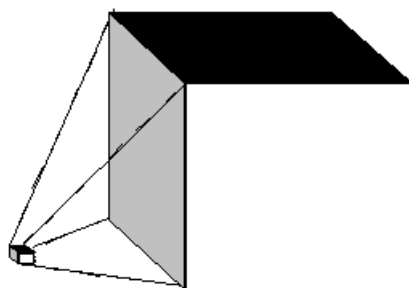
9 TEHON MUODOSTUMINEN YDINVOIMALAITOKSESSA /20/

Syöttövesi johdetaan reaktoriin, jossa siitä muodostuu höyryä, joka taas johdetaan turbiineille. Höyry pyörittää turbiineja, jotka muuttavat höyryn lämpöenergian kineettiseksi energiaksi, joka pyörittää generaattoria. Turbiineilta höyry johdetaan lauhduttimille, joissa höyry lauhtuu taas vedeksi ja se pumpataan takaisin reaktoriin.



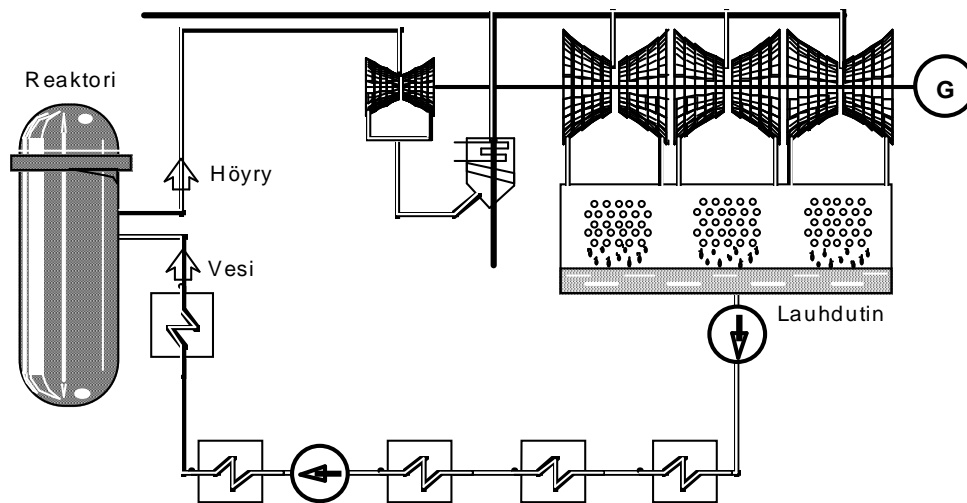
Kuva 6: Olkiluodon ydinvoimalaitosten toiminta hs-piirroksena. /20/

Höyry paisuu tullessaan reaktorista, jossa on kova paine, turbiineille, joilla taas vallitsee matalampi paine. Tämä höyryn paisunta pyörittää turbiinin siivistöä. Höyryn kokoero reaktorissa ja lauhduttimessa on esitetty seuraavassa kuvassa.

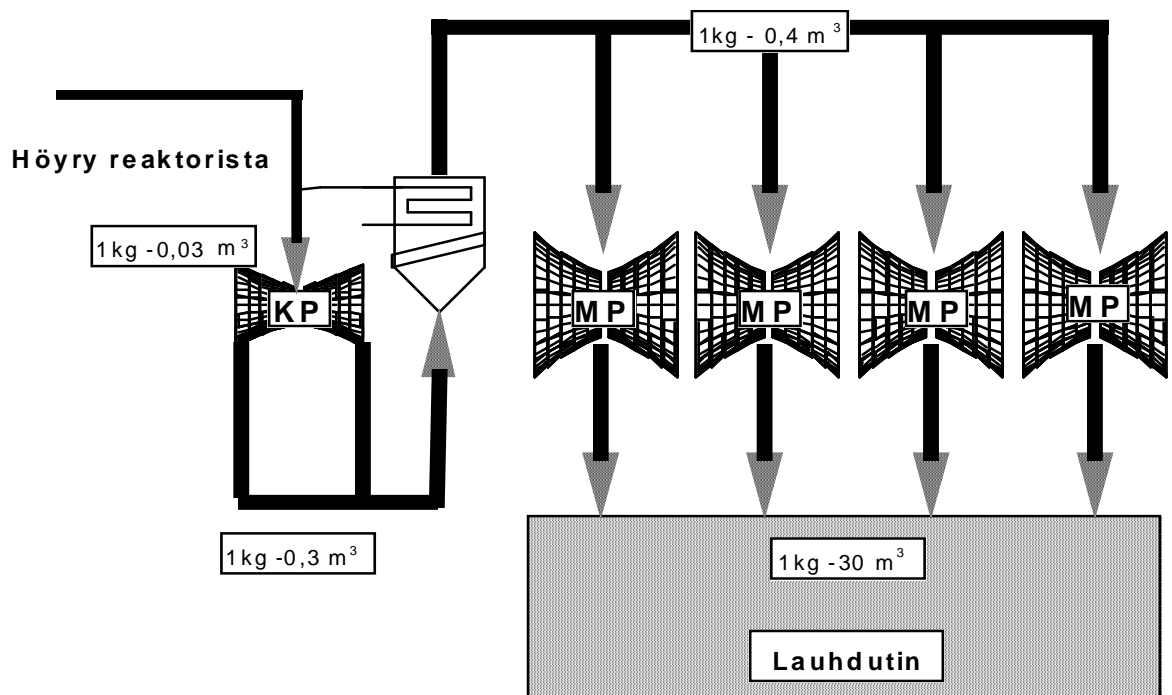


Kuva 7: Reaktorin 1 m^3 höyryä on lauhduttimessa 1000 m^3 höyryä. /20/

Ominaisilavuudet otetaan myös käsinlaskentakaavassa huomioon laskettaessa korjauskerronta syöttövesivirtaukselle. Ominaisilavuus määritellään tilavuutena massayksikköä kohti ja sen yksikkö on m^3 / kg . Se on tiheyden käänteisarvo. Kiehumusvesilaitoksessa ominaisilavuus muuttuu tekijällä 1000 höyryn kulkeutuessa reaktorista (7 MPa) lauhduttimeen (4 kPa). ($0.02737 \text{ m}^3 / \text{kg} \Rightarrow 34,8 \text{ m}^3 / \text{kg}$ höyrytaulukon mukaan). /20/



Kuva 8: Veden ja höyryn kierto BWR-laitoksessa yksinkertaistettuna kuvana. /20/



Kuva 9 Höyryn tilavuuden muutos paineen muuttuessa. /20/

10 TERMISEN TEHON LASKENTAOHJELMA CONDIN /21/

CONDIN - ohjelma (Liite 2) toimii yhteistyössä muiden ydinvoimalaitoksessa käytettävien valvontaohjelmistojen kanssa. Ohjelman tärkein tehtävä on reaktorin tuottaman termisen tehon laskeminen. Reaktorin käyttötilasta riippuen termisen teho lasketaan joko neutronivuon mittausten tai reaktoripaineastian lämpötaseen avulla. Normaalin ajon aikana tehon laskennan lähtökohta on reaktoripaineastian lämpötase. Ohjelma antaa myös hälytyksen mikäli lämpötaseesta laskettu termisen teho ja APRM:n (Average Power Range Monitors) perusteella laskettu termisen teho eroavat liikaa toisistaan, suurin sallittu ero on $f_{\max-diff}$. Hälytys häviää kun ero on pienempi kuin alempi sallittu ero $f_{\text{low-diff}}$.

Jos neutronivuosta mitattu APRM-arvo tai syöttöveden massavirta on liian pieni, termisen teho lasketaan neutronivuon APRM-mittausten perusteella. Tehonlaskenta toteutetaan paineastian lämpötaselaskennan sijaan tällä tavalla, koska pienillä tehoilla ja pienillä virtauksilla mittausvirheet ovat suuria. Turbiinien hyötysuhde voidaan määrittää turbiineille menevän lämpöenergia avulla. Syöttöveden entalpia saadaan paineastian lämpötaselaskennan välituloksena.

Mittaustuloksia keskiarvoistetaan kohinan suodattamiseksi. Rinnakkaisista mittauksista lasketaan keskiarvo. Osalle virtausmittauksia tehdään tiheyskorjaus lämpötilamittausten perusteella. Ohjelma kerää 11 sekunnin välein mittauksia. Mittaustuloksia kerätään yhteensä kaksi minuuttia (11 arvoa), joista muodostetaan mittauksen keskiarvo. Tästä poikkeuksia ovat neutronivuon, pääkiertovirtauksen ja syöttöveden mittaukset, joista muodostetaan keskiarvo 44 arvon perusteella.

Ohjelma laskee 30 sekunnin välein seuraavat mittapisteet (Liite 2):

- Käynnissä olevien pääkiertopumppujen lukumäärä
- Käyvien pääkiertopumppujen/huimamassojen lukumäärä – 1
- Pääkiertopumppujen kierrosluvun keskiarvo
- Reaktorin paine
- Syöttöveden entalpia

- Syöttöveden virtaus
- Jäähdytteen entalpia
- Pääkiertovirtaus
- Ohivirtaus
- Terminen teho MW
- Terminen teho %
- Carry-Under
- Turbiinin hyötysuhde
- Hyötysuhde brutto
- Hyötysuhde netto

11 MITTAUSTEN SUODATUSOHJELMA FILTER 2 /22/

Ohjelman suodattaa mittaussignaaleja liukuvan keskiarvon menetelmää käyttäen. Normaalissa ajossa käytetään yleensä 180 näytteen liukuvaa keskiarvoa, niin että suodatustuloksen satunnaiset vaihtelut vaimenevat tarpeeksi. Muutostilanteissa käytetään vain noin 30 näytteitä sisältävää liukuvaa keskiarvoa.

Suodatuksen tuloksen ohjelma tallentaa PMS-tietokoantaan (PMS = Process Measurement System) laskettuna mittapisteenä. Kaikille signaaleille lasketaan koko ajan kahta rinnakkaista arvoa. Liukuvan keskiarvon menetelmällä sekä maxmean näytteelle (raskaasti suodatettu), että a näytteelle (kevyesti suodatettu referenssiarvo). Tasaisella ajolla käytetään raskaasti suodatettua arvoa ja muutostilanteissa kevyesti suodatettua arvoa.

Suodatettu arvo voidaan laskea myös suodatettujen redundanttien mittausten keskiarvona. PMS:ssä on toiminto, jonka avulla redundanteille mittauksille suoritetaan mielekkyystarkastus. Mittaus voidaan todeta kelvottomaksi sille suoritettun mielekkyystarkastuksen perusteella, jolloin mittaus voidaan jättää huomioimatta suodatuksessa.

Suodatuksen tulos on kelvollinen, jos lähtötietona oleva mittausta on kunnossa. Redundanttien mittausten suodatettu keskiarvo on kelvollinen, jos yksikin lähtötietona oleva mittausta on kunnossa. Keskiarvon laskennasta pudotetaan pois sellaiset mittaukset, joiden mielekkyystarkastustoiminto on havainnut poikkeavan liikaa muista saman ryhmän mittauksista.

12 HÖYRYN KOSTEUS

Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla höyryn kosteuden määrittämisen suorittaa voimalaitoksen oman laboratorion henkilökunta. Höyryn kosteus on vaihdellut välillä 0.024–0.001 %.

Höyryn kosteuden mittausta tapahtuu TVO:lla gammaspektrometrisesti mittaamalla ja vertaamalla keskenään reaktoriveden ja raakalauhteen Na-24 nuklidin aktiivisuuspitoisuuksia. Ensint otetaan näytteet suunnilleen samaan aikaan reaktorivedestä ja raakalauhteesta. Reaktorivesinäyte laimennetaan. Vesinäytteiden gammaspektri mitataan samalla kiteellä ja samalla geometrialla. Reaktoriveden mittausta aloitetaan tunti näytteenoton jälkeen. Tämän jälkeen tulokset syötetään tietokoneelle, joka laskee höyrynkosteuden käyttäen seuraavaa kaavaa: /23/

$$\text{Höyrynkosteus}(\%) = \frac{{}^{24}\text{Na}_{\text{lauhde}}(\text{Bq} / \text{ml})}{{}^{24}\text{Na}_{\text{reaktorivesi}}(\text{Bq} / \text{ml})} * 100 \quad (12.1)$$

Tarkkuus riippuu reaktorivedessä olevan Na-24 pitoisuudesta ja höyrynkosteuden tasosta. 0,05 %:n höyrynkosteustason määrittäminen riittävällä tarkkuudella ($2\sigma < \pm 10\%$) on saavutettavissa, jos reaktoriveden pitoisuus on 3,0 Bq/ml tai suurempi. Jos riittävää höyrynkosteuden tarkkuutta ei normaalitilanteessa saavuteta, voidaan käyttää Na-lisäystä reaktoriveteen. Na-24 pitoisuuden kasvatus tarkoittaa inaktiivisen natriumin, NaOH, lisäämistä reaktoriveteen. Natrium aktivoituu neutronivuossa muodostaen Na-24 nuklidia. /23/

Nykyisellä höyrynkosteudella (0,001–0,024) virhearvio ($2\sigma < \pm 10\%$) tarkoittaa 0,0001–0,0024 prosenttiyksikön virhettä höyrynkosteuden mittauksessa. Näiden keskiarvo on 0,00125 %.

13 LASKENTAKAAVAN VIRHEPROSENTIN MÄÄRITTELY

Laskentakaavan virhe muodostuu kaavassa käytettyjen suureiden mittaamiseen käytetyn laitteiston aiheuttamista epätarkkuuksista. Mittalaitteiston sisältämän virheen saa selville tutkimalla mittalaitteistoon kuuluvien laitteiden kalibroitiraportteja. Mittalaitteiston aiheuttaman virheen selvittämisen jälkeen voidaan alkaa tutkia koko kaavan sisältämää virhemarginaalia.

13.1 Mittausten virhelähteet /24/

Mittaukseen sisältyy sekä ulkoista että sisäistä virhettä. Mittauksen sisäinen tarkkuus on hyvä kun satunnaisten virheiden osuus on pieni. Ulkoinen tarkkuus on hyvä kun systemaattisten virheiden osuus on pieni. Mittaus voi olla tarkka (sisäinen tarkkuus on hyvä) vaikka tulos ei ole oikea. Tämä voi johtua esim. virheellisen mitta-alueen käytöstä, kuten Ilkka Lähteenmäen esimerkistä, jossa käsitellään langan pituuden määrittystä, saadaan selville. Tässä esimerkissä käytetty mitta-asteikko (viivoittimen mitta-alue) alkaa vasta kohdasta 1cm viivoittimen vioittumisen takia, kun sen pitäisi alkaa nollostä. Tulos on jokaisella mittauskerralla melkein oikea (26cm, langan oikean pituuden ollessa 25cm), epätarkkuuden ollessa $\pm 0,1\text{cm}$, mutta virheellisen mitta-asteikon takia saadaan langan pituudelle virheellinen tulos, 26cm. Tällaiset virheet voidaan mittauksesta poistaa mittalaitteiden kalibroinnilla, kuten tässä tapauksessa voitaisiin verrata käytettyä viivoitinta ehjään viivoittimeen. Kun viivoitin vaihdetaan ehjään ja mittaustulokseksi saadaan 25cm, myös mittauksen ulkoinen tarkkuus on hyvä.

Karkeat virheet: seurausta esim. laitehäiriöstä, lukemavirheestä, tulosten kirjausvirheestä, yms. Sen oletetaan kuitenkin usein olevan poistettu huolella suoritetuista mittauksista.

Systemaattiset virheet: on kyseessä silloin, kun virhe pyrkii vääristämään tulosta aina samaan suuntaan. Systemaattinen virhe voi syntyä esim. kalibrointivirheestä tai analogisen mittarin luentavirheestä. Tähän ryhmään kuuluvat myös instrumenttivilheet, jotka tarkoittavat kaikkien mittalaitteiden sisältämää tiettyä epävarmuutta. Olkiluodon ydinvoimalaitoksella kuitenkin mittalaitteistojen kalibrointi on niin tarkkaa, että virheet jäävät pienemmiksi, kuin valmistajan ilmoittama virheraja. Tosin laitteiden kuluessa ja vanhentuessa, niiden aiheuttamat poikkeamat oikeasta arvosta suurentuvat.

Satunnaiset eli tilastolliset virheet: näitä virheitä on jokaisessa mittauksessa ja sen olemassaolo voidaan todeta toistamalla sama mittaus useaan kertaan. Jos systemaattisten virheiden osuus on pieni, mittauksen ulkoinen tarkkuus on hyvä. Pientä systemaattista virhettä kuvaa mittauksen hyvä toistettavuus. Tuloksen sisäinen tarkkuus on hyvä jos satunnaisten virheiden osuus lopputuloksen virheessä on pieni.

13.2 Mitattujen suureiden virheiden arviointi /24/

Jokaisen mitatun suureen satunnaisvirheen maksimi voidaan arvioida kvantitatiivisesti. Mittauksen virhe voi olla yhtä suuri koko mittausalueella, jolloin virhe on absoluuttinen. Absoluuttisesta virheestä puhuttaessa mitatun suureen satunnaisvirheen maksimiarvo tarkoittaa absoluuttista lukuarvoa, jonka sisällä satunnaisvirheen itseisarvo on tietyllä todennäköisyydellä (%). Esim: $P = (1,53 \pm 0,05)$.

Suhteellisen virheen yläraja:

$$\frac{\Delta x}{x_0} (\%) \quad (13.1)$$

missä x_0 = suureen x todellinen (=todennäköisin) arvo, Δx = suurin poikkeama todellisesta arvosta.

Mittaustuloksen absoluuttinen virhe

$$\Delta x = x_i - x_0 \quad (13.2)$$

missä x_i = mittaustulos, x_0 = suureen oikea (hypoteettinen) arvo.

13.3 Laskettujen suureiden virheiden arviointi /24/

Virheen matemaattinen arviointi on suotavinta suorittaa kokonaisdifferentioinnin avulla.

Useamman toisistaan riippumattoman muuttujan funktio $F = F(x, y, z, \dots)$ voidaan derivoida kunkin muuttujan suhteen pitäen muita muuttujia vakioina. Saatuja derivaattoja

kutsutaan osittaisderivaatoiksi ja merkitään $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}, \dots$

Osittaisdifferentiaaleja ovat tulot: $\frac{\partial F}{\partial x} * \Delta x, \frac{\partial F}{\partial y} * \Delta y, \frac{\partial F}{\partial z} * \Delta z, \dots$

Kokonaisdifferentiaali:

Mitattuja suureita merkitään esim. $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ sekä näille määriteltyjä virherajoja

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$. Tutkittavaan ilmiöön liittyy matemaattinen malli

$F = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Matemaattisesti funktion arvon F vaihtelua kuvaa muuttujan

x_n vaihdellessa vähän, funktion F derivaatta muuttujan x_n suhteen. Jos jokaisessa muuttujassa x tapahtuu pieni muutos Δx , funktion muutoksen arvon antaa kokonaisdifferentiaali:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial x_1} * \Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} * \Delta x_2 + \frac{\partial F}{\partial x_3} * \Delta x_3 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} * \Delta x_n \quad (13.3)$$

missä $\frac{\partial F}{\partial x}$ = Funktion F derivaatta muuttujan x_n suhteen, Δx_n = muutos x_n arvoon.

Lopputuloksen F virhettä laskettaessa kaavassa esiintyvät differentiaalit korvataan suureiden x_n virherajoilla Δx_n . Koska tavoitteena on laskea virheelle yläraja-arvo, kaikista osittaisderivaatoista otetaan itseisarvo. Virhearvio lasketulle suurelle saadaan kaavalla:

$$\Delta F = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| * \Delta x_1 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| * \Delta x_2 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_3} \right| * \Delta x_3 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_n} \right| * \Delta x_n \quad (13.4)$$

Kaavoissa käytetyt merkinnät:

F = kyseessä oleva funktio

ΔF = F :n absoluuttisen virheen yläraja

$\frac{\Delta F}{F}$ = F :n suhteellisen virheen yläraja prosentteina

x, y, z = toisistaan riippumattomien mittaustulosten arvoja

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = edellisten absoluuttisten virheiden ylärajoja

$\frac{\Delta x}{x}, \frac{\Delta y}{y}, \frac{\Delta z}{z}$ = edellisten suhteellisten virheiden ylärajoja

a, b, c = virheettömiä vakioita

13.4 Tilastollisia kaavoja /24/

Tässä työssä on käytetty seuraavia tilastomatematiikan ja virhelaskennan kaavoja edellä läpikäydyn differentioinnin lisäksi.

Aritmeettinen keskiarvo

$$X = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (13.5)$$

Poikkeama: yksittäisen mittaustuloksen ja aritmeettisen keskiarvon ero.

$$\Delta i = x_i - X_A \quad (13.6)$$

Keskipoikkeama: poikkeamien itseisarvojen aritmeettinen keskiarvo; laitteiston sisäisen tarkkuuden mitta.

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|}{n} \quad (13.7)$$

Vaihteluväli: suurimman ja pienimmän havaintoarvon erotus.

$$X_v = x_s - x_p \quad (13.8)$$

Standardiepävarmuus: /25, 26/

$$u_A = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}} = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad (13.9)$$

missä a_+ = mittavirheen suurin arvo, a_- = mittavirheen pienin arvo.

Laajennettu epävarmuus: /25, 26/

$$u_B = K * u_A \quad (13.10)$$

missä K = kattavuuskerroin.

Yhdistetty epävarmuus lasketaan yhdistämällä kaikki epävarmuuskomponentit neliöllisesti: /25, 26/

$$u_{CA} = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{AN}^2} \quad \text{tai} \quad u_{CB} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{BN}^2} \quad (13.11)$$

Yhdistetty epävarmuus summaamalla epävarmuuskomponentit:

$$u_{DA} = u_{A1} + u_{A2} + \dots + u_{AN} \quad \text{tai} \quad u_{DB} = u_{B1} + u_{B2} + \dots + u_{BN} \quad (13.12)$$

14 REAKTORIN TERMISEN TEHON KÄSINLASKENTAKAAVA /27, 28/

Reaktorin termisen teho lasketaan seuraavalla kaavalla silloin, kun tietokoneen mittaus- ja laskentatiedot eivät jostain syystä ole käytettävissä.

$$Q = \frac{m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48} + 0.296 \quad (14.1)$$

Tarkastellaan kaavan johtamista:

- Kiertoprosessin hyötysuhde: /29/

$$\eta = \frac{P}{Q1} \quad (14.2)$$

missä P= Hyötyteho, Q1= Prosessiin tuotu teho.

$$Q = \frac{m * \Delta h_0 * 100}{2500000} + \frac{Q_{muu} * 100}{2500} \quad (14.3)$$

$$Q = \frac{m * 100 * (1980.231 + \Delta t * 4.398463 + \Delta x * 15.0513)}{2500000} + \frac{Q_{muu} * 100}{2500} \quad (14.4)$$

missä:

100 = kerroin, jolla tulos muutetaan prosenteiksi.

m = syöttövesivirtaus.

Δh_0 = entalpiaerotus 1980.231 kJ/kg (laskettuna höyryn entalpia 70 bar paineella höyryn kosteudella 0.05 % 2771.9 kJ/kg – syöttöveden entalpia 791.6 kJ/kg paineella 70 bar lämpötilalla 185.6 °C), kun teho on 2500 MW, syöttöveden lämpötila on 185.6 °C.

$\Delta t = 185.6 - T$, kun T = syöttöveden lämpötila 312K501, 185.6 °C vastaa 69 bar höyrynpainetta.

4.398463 = veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilassa 185.6⁰ C.

$\Delta x = 0.1 - x$ (%), kun x = höyryn kosteus (%).

15.0513 = korjauskerroin, joka ilmoittaa paljonko höyryn kosteuden muutos yhdellä prosentilla vaikuttaa entalpiaan.

2500000 = max. teho watteina.

Q_{muu} = reaktorin lämpötaseen muiden lämpövirtojen summa n. 7.4 MW eli 0.296 % lämpötehosta (krudin poistovirran teho, puhdistusvirran lämpöteho, kiinteät lämpöhäviöt, pääkiertopumppujen teho).

2500 = max. teho megawatteina.

m_0 = syöttövesivirtaus 2500 MW:n teholla, 185.6⁰ C lämpötilalla, 0,1 % höyrynkosteudella = 1258.74 kg/s.

k = apukerroin yhtälössä $m_0 * h_0 * k = 2500000$, $k = 1,0030$.

→ Viivan yläpuoli: kerrotaan sulut auki, jolloin jokaiseen lausekkeen osoittajaan tulee $m * 100$, viivan alapuolelle nimittäjään taas kirjoitetaan lauseke $m_0 * h_0 * k = 2500000$, joka on kirjoitettu muotoon $1262.48 * 1980.231$ joka tulee lausekkeesta $m_0 * h_0 * k$, kun $m_0 * k = 1262.48$.

$$\rightarrow \frac{\frac{m * 100 * 1980.231}{1262.48 * 1980.231} + \frac{m * \Delta t * 100 * 4.398}{1262.48 * 1980.231}}{\frac{m * \Delta x * 15.0513 * 100}{1262.48 * 1980.231} + \frac{Q_{muu} * 100}{2500}} \quad (14.5)$$

$$\rightarrow \frac{Q_{muu} * 100}{2500} = \frac{7.4 MW * 100}{2500 MW} = 0.296 \quad (14.6)$$

$$\rightarrow \frac{m * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48} + 0.296 \quad (14.7)$$

Tarkastellaan syöttövesivirtauksen laskentaa CONDIN-ohjelmalla, jotta saadaan selvitettyä syöttöveden korjauskertoimien alkuperä:

$$m = m_{312k301} * FVOL = m_{312k301} * \sqrt{\frac{v_{nom}}{v_{akt}}} \quad (14.8)$$

$$m = m_{312k301} * FVOL = m_{312k301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) \quad (14.9)$$

missä: v_{nom} = nimellinen ominaistilavuus olosuhteissa 74 bar abs, 182 °C (syöttövesilaitan kalibrointilämpötila). v_{akt} = varsinainen ominaistilavuus olosuhteissa 74 bar abs, 185,6 °C (oletuslämpötila). 0,000612 = kerroin, joka ilmoittaa ominaistilavuuden muutoksen lämpötilan muuttuessa yhdellä asteella.

→ Q=

$$\frac{m_{312k301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48} + 0.296$$

missä:

$m_{312k301}$ = syöttövesivirtauksen mittauslukema 312K301 taulusta KB1

$\Delta t = 185.6 - T$, kun T = syöttöveden lämpötila 312K501 taulusta KA3

$\Delta x = 0.1 - x$ (%), kun x = höyryn kosteus (%) (välillä 0.001 % -0.024 %)

Syöttövesivirtaus on pääsuure laskettaessa reaktoritehoa CONDIN-ohjelmalla. Tästä syystä on jo suunnitteluvaiheessa kiinnitetty erityistä huomiota syöttövesivirtauksen mitausketjuun. /13/

15 KÄSINLASKENTAKAAVAN VIRHETARKASTELU

Syöttövesivirtaus kerrotaan termillä $0.997818 + 0.000612 * \Delta t$, 0.997818 on tulos laskettujen ominaistilavuuksien suhteesta neliöjuurilausekkeessa ja $0,000612$ taas on kerroin, joka ilmoittaa, kuinka paljon ominaistilavuuksien neliöiden suhde muuttuu, käytettäessä nimellislämpötilana 182°C , lämpötilan muuttuessa yhden asteen. /27/

$Q =$

$$\frac{m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48} + 0.296$$

Jätetään viimeinen termi pois, jotta kaava saadaan lyhyempään muotoon ja muodostetaan kaavan jakoviivan yläpuoliselle osalle osittaisderivaatat syöttövesivirtauksen, lämpötilan ja höyrynkosteuden suhteen. Viimeistä termiä $0,296$ ei oteta ollenkaan mukaan virhetarkasteluun, koska sen vaikutus kokonaisvirheeseen on korkeintaan $0,296\%$:a, näin suuri virhekin olisi vain silloin, jos kaikki termiin vaikuttavat mittaukset näyttäisivät 100% :sesti väärin.

$Q =$

$$\frac{m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48}$$

Muodostetaan kokonaisdifferentiaali (kaava 13.4) jakoviivan yläpuoliselle osalle.

$$\Delta Q_{ylä} = \left| \frac{\partial Q}{\partial m_{312K301}} \right| * \Delta m_{312K301} + \left| \frac{\partial Q}{\partial T} \right| * \Delta T + \left| \frac{\partial Q}{\partial X} \right| * \Delta X \quad (15.1)$$

Kaavoissa $\Delta t = 185,6^{\circ} \text{C} - T$, T = mittauksen $312K501$ perusteella mitattu lämpötila.

$\Delta x = 0,1 - X$, X = laboratorion määrittämä höyrynkosteus.

Ratkaistaan osittaisderivaatta (luku 13.3) syöttövesivirtaukselle sieventäen ensin kaavaa yksinkertaisempaan muotoon.

$$\begin{aligned}
Q_{ylä} &= m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) \\
&* (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601) \\
&= 99.7818 + 0.2216\Delta t + 0.7584\Delta x + 0.0612\Delta t \\
&+ 0.000135\Delta t^2 + 0.000465\Delta x\Delta t
\end{aligned} \tag{15.2}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_{ylä}}{\partial m_{312K301}} &= \\
&(99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x + 0.000135\Delta t^2 + 0.000465\Delta t\Delta x)
\end{aligned} \tag{15.3}$$

Ratkaistaan osittaisderivaatta (luku 13.3) lämpötilalle sieventäen ensin kaavaa yksinkertaisempaan muotoon.

$$\begin{aligned}
Q_{ylä} &= m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612(185.6 - T)) \\
&* (100 + 0.2221(185.6 - T) + \Delta x 0.7601) \\
&= m_{312K301} (0.997818 + 0.1135 - 0.000612T) \\
&* (100 + 41.221 - 0.2221T + 0.7601\Delta x) \\
&= m_{312K301} \left(\begin{array}{l} 99.7818 + 41.131 - 0.2216T + 0.7584\Delta x \\ + 11.35 + 4.678 - 0.0252T + 0.0862\Delta x \\ - 0.0612T - 0.0252T + 0.000135T^2 - 0.000465T\Delta x \end{array} \right) \\
&= m_{312K301} \left(\begin{array}{l} 156.9408 - 0.3332T + 0.84467\Delta x \\ + 0.000135T^2 - 0.000465T\Delta x \end{array} \right) \\
&= 156.9408m_{312K301} - 0.3332Tm_{312K301} \\
&+ 0.84467\Delta xm_{312K301} + 0.00027Tm_{312K301} - 0.000465T\Delta xm_{312K301}
\end{aligned} \tag{15.4}$$

$$\frac{\partial Q_{ylä}}{\partial T} = \left(\begin{array}{l} (-0.3332)m_{312K301} + 0.00027Tm_{312K301} \\ - 0.000465\Delta xm_{312K301} \end{array} \right) \tag{15.5}$$

Ratkaistaan osittaisderivaatta (luku 13.3) höyrynkosteudelle sieventäen ensin kaavaa yksinkertaisempaan muotoon.

$$\begin{aligned}
 Q_{ylä} &= m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612\Delta t) \\
 &* (100 + 0.2221\Delta t + 0.7601(0.1 - X)) \\
 \\
 &= m_{312K301} (0.997818 + 0.000612\Delta t) \\
 &* (100 + 0.2221\Delta t + 0.07601 - 0.7601X) \\
 \\
 &= m_{312K301} \left(\begin{aligned} &99.7818 + 0.2216\Delta t + 0.0758 - 0.7584X \\ &+ 0.0612\Delta t + 0.000135\Delta t^2 + 0.0000465\Delta t - 0.000465\Delta tX \end{aligned} \right) \\
 \\
 &= m_{312K301} (99.8576 + 0.2828\Delta t - 0.7584X + 0.000135\Delta t^2 - 0.000465\Delta tX) \\
 \\
 &= 99.8576m_{312K301} + 0.2828\Delta tm_{312K301} - 0.7584Xm_{312K301} \\
 &+ 0.000135\Delta t^2 m_{312K301} - 0.000465\Delta tXm_{312K301} \tag{15.6}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_{ylä}}{\partial X} = ((-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301}) \tag{15.7}$$

Yhdistetään osittaisderivaatat ja kirjoitetaan kokonaisdifferentiaali (kaava 13.4) kaavan yläpuoliselle osalle.

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= \left(\begin{aligned} &99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x + 0.000135\Delta t^2 \\ &+ 0.000465\Delta t\Delta x \end{aligned} \right) * \Delta m_{312K301} \\
 &+ \left(\begin{aligned} &0.2828m_{312K301}^2 + 0.00027\Delta tm_{312K301}^2 + 0.000465\Delta xm_{312K301}^2 \end{aligned} \right) * \Delta T \\
 &+ \left(\begin{aligned} &(-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301} \end{aligned} \right) * \Delta X \tag{15.8}
 \end{aligned}$$

16 MITTAUSKETJUN VIRHE

Lasketaan vielä mittausketjun aiheuttamat virheet virtausmittaukselle ja lämpötilamittaukselle. Lasketaan sekä standardiepävarmuus (kaava 13.9) ja laajennettu epävarmuus (kaava 13.10) olettaen mittaustulosten noudattavan normaalijakautumaa, jolloin kattavuuskerroin on 2. /26/

16.1 312K301-virtausmittauksesta aiheutuvat virheet

Mittausketjusta aiheutuvan virheen olen laskenut kahdella tavalla. Olen laskenut standardiepävarmuuden laskemalla suurimman ja pienimmän virheenarvon avulla alueen, jolle mittauksen virhe todennäköisesti sijoittuu. Olen jakanut tämän alueen kahdella ja

tuloksen neliöjuuri kolmella: $u_A = \frac{\left(\frac{x_s - x_p}{2}\right)}{\sqrt{3}}$. Laajennetun epävarmuuden olen laske-

nut kertomalla tämän arvon kattavuuskertoimella 2, joka vastaa normaalijakauman mukaan 95 %:n luottamustasoa, $u_B = 2 * u_A$. /26/

Nämä arvot, standardiepävarmuuden ja laajennetun epävarmuuden olen muuttanut mittattavaksi yksiköksi (kg/s ja °C) olettamalla mittauksen lineaariseksi, jolloin esimerkiksi virtausmittauksessa mittausalue 1400 kg/s vastaa 16 mA:a, jolloin yksi milliampeeri

vastaa 87,5 kg/s: $\frac{1400 \text{ kg/s}}{16 \text{ mA}} = 87.5 \text{ kg/s}$. Tämän arvon taas olen kertonut tuloksella u_A

tai u_B , jolloin olen saanut mittausvirheen samana yksikkönä, kuin käsinlaskukaavan mittaustuloksetkin ovat.

Mittausketjun eri laitteiden näin saadut epävarmuudet olen yhdistänyt laskemalla ne yhteen, kukin arvo toiseen potenssiin korotettuna, ja ottanut tästä tuloksesta neliöjuuren (kaava 13.11) /26/. Tulokset olen kirjannut seuraavaan taulukkoon, jossa on esitetty standardiepävarmuus u_A , laajennettu epävarmuus u_B , yhdistetty epävarmuus u_{CA} / u_{CB} ja u_{DA} / u_{DB} sekä vertailun vuoksi regressioanalyysin perusteella saadut virheet mitta-

ketjuille sekä aritmeettinen keskiarvo (kaava 13.5) mittausketjujen virheille. Laskuissa käytetyt kaavat on tarkemmin selitetty mittauksen virhelaskentaa käsittelevässä luvussa 13 sekä liitteissä 3 ja 4. Regressioanalyysillä saatujen arvojen selitykset löytyvät liitteestä 5.

Taulukko 4: Mittausketjujen sisältämät epävarmuudet.

	Standardi- epävarmuus $u_A = \frac{a/2}{\sqrt{3}}$	Laajennettu epävarmuus $u_B = 2 * u_A$	Yhdistetty epävarmuus/ yhdistetty laajennettu epävarmuus u_{CA} / u_{CB}	Epävarmuus regressioanalyysin perusteella	Mittavirheen aritmeettinen keskiarvo mA $X = \frac{\sum x}{n}$
Virtauslähetin 312K301	0.0061 mA /0.53 kg/s	0.0122 mA /1.068 kg/s		0.0028 mA	0.0068 mA
I/U-muunnin 312K301	0.000289 V /0.04 kg/s	0.000578 V /0.081 kg/s		0.0037 V	0.0012 V
Juurtolaite 312K301	0.00461 V /0.647 kg/s	0.0092 V /1.1291 kg/s		0.0055 V	0.0048 V
Mittalaippa	0.624 %	1.3 %			
			8.776 kg/s/ 18.267 kg/s		
Lämpötilälahetin 312K501	0.0274 V/ 0.548 °C	0.0548 V/ 1.096 °C		0.0397 V	0.0324 V
U/U-muunnin 312K501	0.00115 V/ 0.0231 °C	0.0023 V/ 0.046 °C		$1.91 * 10^{-15}$ v	0.002 V
			0.548 °C/ 1.097 °C		

16.2 Osittaisderivaattojen yhdistäminen kokonaisdifferentiaaliksi

Käytetään kaavaa 13.4 ja sijoitetaan kaavoihin ΔT :n ja $\Delta m_{312K301}$:n paikalle mittauksista aiheutuvat virheet (yksikköinä kg/s ja °C), sekä höyrynkosteuden mittauksen virhe ΔX (joka tuli höyrynkosteuden mittaamista käsittelevässä luvussa 12 esiin). Standardiepävarmuuden kokonaisdifferentiaalissa on käytetty standardiepävarmuuden arvoja ja

laajennetun epävarmuuden kokonaisdifferentiaalissa laajennetun epävarmuuden arvoja, jotka esitettiin taulukossa 4.

Standardiepävarmuus:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & \left(\begin{array}{l} 99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x + 0.000135\Delta t^2 \\ + 0.000465\Delta t\Delta x \end{array} \right) * 8.776 \\ & + |((-0.3332)m + 0.00027Tm - 0.000465\Delta xm)| * 0.548 \\ & + |((-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301})| * 0.05 \end{aligned} \quad (16.1)$$

Laajennettu epävarmuus:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & \left(\begin{array}{l} 99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x + 0.000135\Delta t^2 \\ + 0.000465\Delta t\Delta x \end{array} \right) * 18.267 \\ & + |((-0.3332)m + 0.00027Tm - 0.000465\Delta xm)| * 1.225 \\ & + |((-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301})| * 0.1 \end{aligned} \quad (16.2)$$

16.3 Laskukaavan kertoimet

Otetaan vielä huomioon syöttöveden virtauksen korjauskertoimen mahdolliset virheet. Kertoimen ensimmäiseen termiin virhettä aiheuttaa väärä ominaistilavuus/lämpötilasteikko. Myös toisessa termissä, joka ilmoittaa ominaistilavuuksien neliöiden muutoksen lämpötilan muuttuessa on pieni virhe. Olisi myös hyvä tarkentaa kaavan asiakirjassa, että millä lämpötilavälillä kyseinen kerroin on laskettu. Oletan, että kerroin on määritelty välillä $180^{\circ}\text{C} - 190^{\circ}\text{C}$, koska tämän välin kulmakerroin on lähempänä arvoa 0.000612 kuin koko lämpötilavälin ($0^{\circ}\text{C} - 290^{\circ}\text{C}$) kulmakerroin (Liite 6).

Laskennan perusteena on käytetty seuraavia lämpötilan ja ominaistilavuuden arvoja, jotka on saatu voimassa olevien fysiikan taulukoiden perusteella. Näyttäisi kuitenkin siltä, että lämpötilasteikon TVO:lla tulisi alkaa nolasta (tällä hetkellä alkaa 10°C :sta), koska 10-astetta taulukossa vastaava ominaistilavuus vastaa todellisuudessa 0°C :teen ominaistilavuutta, 20°C ominaistilavuus vastaa todellisuudessa 10°C ominaistilavuutta, ja niin edelleen.

Taulukko 5. Veden ominaistilavuus eri lämpötiloissa (TVO:n käyttämien arvojen mukaan kirjoitettuna): /21/

Lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Ominais-tilavuus $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	Lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Ominais-tilavuus $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	Lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Ominais-tilavuus $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
10	0,9965	110	1,0399	210	1,1506
20	0,9968	120	1,0479	220	1,1664
30	0,9984	130	1,0565	230	1,1836
40	1,001	140	1,057	240	1,2023
50	1,0046	150	1,0755	250	1,2227
60	1,0088	160	1,086	260	1,2451
70	1,0138	170	1,0973	270	1,27
80	1,0194	180	1,1092	280	1,2978
90	1,0257	190	1,1221	290	1,3295
100	1,0325	200	1,1358		

Taulukkokirjan: Wagner, Wolfgang: Properties of water and steam, the industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties, tables based on these equations. Berlin, Springer, 1998, perusteella sekä internetistä löytyvän ohjelman: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> perusteella selvitetty ominaistilavuus arvot eri lämpötiloissa 74 bar paineessa on esitetty seuraavassa taulukossa. Taulukkokirjan ja internetissä olevan ohjelman avulla saadut arvot vastaavat toisiaan.

Taulukko 6. Veden ominaistilavuus eri lämpötiloissa voimassaolevan taulukkokirjan mukaan kirjoitettuna: /30/

Lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Ominaistilavuus $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	Lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Ominaistilavuus $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
0	0,99649	150	1,0859
10	0,99685	160	1,0972
20	0,99848	170	1,1092
30	1,0011	180	1,1221
40	1,0046	190	1,1359
50	1,0089	200	1,1507
60	1,0138	210	1,1667
70	1,0194	220	1,184
80	1,0256	230	1,2027
90	1,0324	240	1,2232
100	1,0398	250	1,2456
110	1,0478	260	1,2705
120	1,0563	270	1,2984
130	1,0655	280	1,33
140	1,0754		

Ominaistilavuuden virheellisistä arvoista aiheutuu virhe korjauskertoimen ensimmäiseen termiin, ominaistilavuuksien neliöiden suhteeseen, koska siinä käytetyt ominaisti-

lavuudet ovat väärät. Uusi kerroin olisi seuraavanlainen: $\sqrt{\frac{1,12486}{1,129828}} = 0,99779901$,

185,6 $^{\circ}\text{C}$:tta vastaavan ominaistilavuuden ollessa $1,129828 \frac{\text{m}^3}{1000\text{kg}}$. Erotus vanhaan

kertoimeen verrattuna $0,997818 - 0,99779901 = 0,000018986$, joka prosentteina on

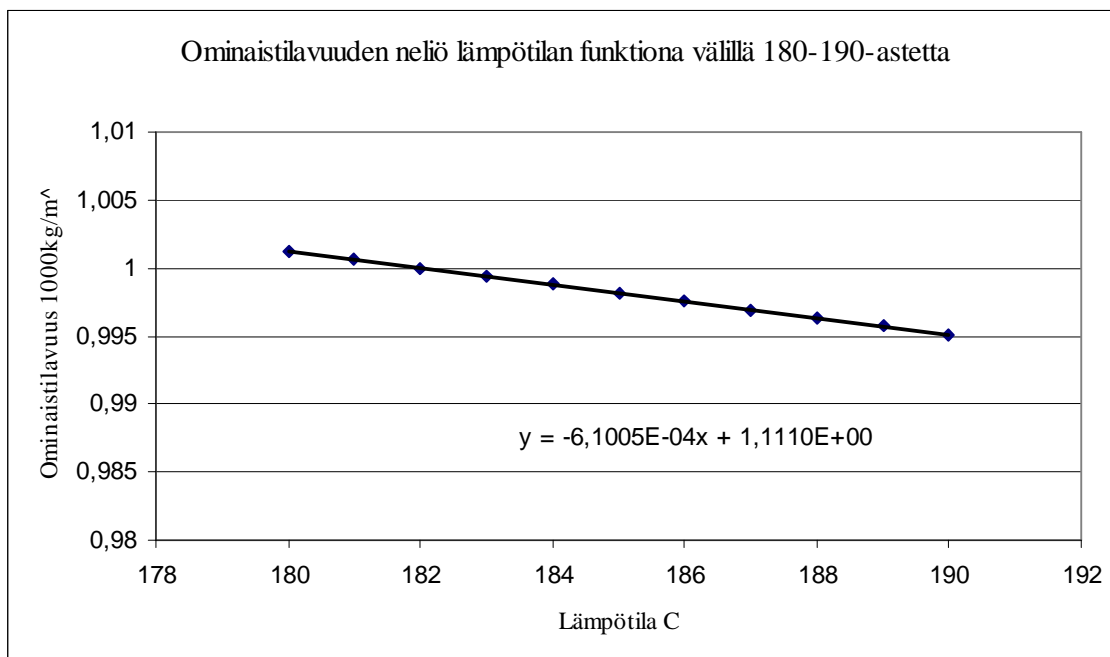
$\frac{0,000018986}{0,99779901} * 100 = 0,00190\%$. Kertoimen 0,000612 oikeellisuuden selvittämiseksi

pitää laskea taulukon kutakin lämpötilaa vastaava ominaistilavuuksien neliöiden suhde, käyttäen nimellislämpötilana 182-asteen lämpötilaa ja tätä vastaavaa ominaistilavuutta.

Veden ominaistilavuudet lämpötilanfunktiona on esitetty kuvaajina Liitteessä 6.

Taulukko 7. Veden ominaistilavuuksien neliöjuurien suhde. Nimellislämpötila 182 °C
(Liite 7): /30/

Ominaisilavuuksien neliöjuurien suhde, nimellislämpötila 182 C			
Lämpötila °C	Ominaisilavuus $\frac{1000kg}{m^3}$	Lämpötila °C	Ominaisilavuus $\frac{1000kg}{m^3}$
0	1,06246043	150	1,017780956
10	1,062268566	160	1,012526357
20	1,061401145	170	1,0070344
30	1,060011327	180	1,001229082
40	1,05816319	190	0,995128552
50	1,055905801	200	0,988708301
60	1,053350955	210	0,981905376
70	1,050453717	220	0,97470543
80	1,04727378	230	0,967098214
90	1,043819099	240	0,958960018
100	1,040098165	250	0,950298266
110	1,036119959	260	0,940939937
120	1,031942733	270	0,930775586
130	1,027477948	280	0,919651781
140	1,022737595		



Kuvio 4: Ominaisilavuuksien neliöiden suhde lämpötilavälillä 180 C-190 C.

Taulukko 8. Regressioanalyysin tulokset (Liite 5) ominaisilavuuden neliön riippuvuudelle lämpötilasta:

Regressioanalyysin tulokset				
Korrelaatiokerroin R	0,999996722			
Selitysaste R^2	0,999993445			
Sovitettu R^2	0,999992716			
Keskivirhe	5,46059E-06			
Havainnot	11			
	Kertoimet	Keskivirhe	t Stat	P-arvo
Omin. til.	1,11102947	9,63338E-05	11533,12749	1,41041E-33
Lämpötila	-0,000610049	5,20647E-07	-1171,713176	1,22312E-24
	Vapausasteet	F	Selitetyn vaihtelun P-arvo	
Regression	1	1372911,767	1,22E-24	
Residual	9			
Total	10			

Kuvasta näemme, että kulmakerroin on 0,00061005, kun se käytössä olevassa kaavassa on 0,000612. Arvojen välinen virhe on 0,00000195. Kun tähän arvoon lisätään vielä regressioanalyysin antama virhe kertoimelle lämpötilavälillä 180-190, saadaan kertoimen kokonaisvirhe $0.00000195 + 0.00000546 = 0.00000741$.

17 OSITTAISDERIVAATTOJEN- JA KOKONAISDIFFERENTIAALIN LASKEMINEN

Lasketaan jokaisen osittaisderivaatan (kaavat 15.3, 15.5, 15.7) arvo sekä niiden perusteella kokonaisdifferentiaalien (kaavat 16.1, 16.2) arvot ja näin saadaan mittauksista kaavaan aiheutuva virhe prosentteina. Lisätään osittaisderivaattoihin kerroin $\frac{1}{1262.48}$, jolloin saadaan suoraan koko kaavaan sisältyvä virhe. Viimeistä termiä ei edelleenkään oteta huomioon, koska se aiheuttaisi vain 0,296 %:n virheen koko tulokseen, vaikka kaikki termiin sisältyvät mittaukset olisivat 100 % väärässä, joka on todella epätodennäköistä. Taulukossa 9 $u_{CA/CB}$ tarkoittaa neliöllisesti summattua tulosta (kaava 13.11) ja $u_{DA/DB}$ summattua (kaava 13.12) lopputulosta.

$$Q = \frac{m_{312K301} * (0.997818 + 0.000612 * \Delta t) * (100 + \Delta t * 0.2221 + \Delta x * 0.7601)}{1262.48} + 0.296$$

Kokonaisdifferentiaali normaali epävarmuus:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & \left| \left(\frac{1}{1262.48} \left(99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x \right) \right) \right| * 8.776 \\ & + \left| \left(\frac{1}{1262.48} \left((-0.3332)m + 0.00027Tm - 0.000465\Delta xm \right) \right) \right| * 0.548 \\ & + \left| \left(\frac{1}{1262.48} \left((-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301} \right) \right) \right| * 0.05 \end{aligned}$$

Kokonaisdifferentiaali laajennettu epävarmuus:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & \left(\frac{1}{1262.48} \left(99.7818 + 0.2828\Delta t + 0.7584\Delta x \right) \right) * 18.267 \\ & + \left(\frac{1}{1262.48} \left((-0.3332)m + 0.00027Tm - 0.000465\Delta xm \right) \right) * 1.097 \\ & + \left(\frac{1}{1262.48} \left((-0.7584)m_{312K301} - 0.000465\Delta tm_{312K301} \right) \right) * 0.1 \end{aligned}$$

Taulukko 9. Osittais- ja kokonaisdifferentiaalinen tulos ja laskuihin perustuvat mittausarvot normaalille epävarmuudelle:

Lukema 312K301 kg/s	Lukema 312K501 °C	$\frac{\partial Q}{\partial m_{312K301}}$ %	$\frac{\partial Q}{\partial T}$ %	$\frac{\partial Q}{\partial X}$ %	Tulos u_{CA} % summattu neliöllisesti	Tulos u_{DA} % summattu
1250	183	0.699	0.154	0.0376	0.7168	0.8906
1250	183	0.699	0.154	0.0376	0.7168	0.8906
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1250	183	0.699	0.154	0.0376	0.7168	0.8906
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	183	0.699	0.155	0.0377	0.7170	0.8917
1255	182	0.701	0.155	0.0377	0.7190	0.8937
1255	182	0.701	0.155	0.0377	0.7190	0.8937
1255	182	0.701	0.155	0.0377	0.7190	0.8937
1260	182	0.701	0.155	0.0379	0.7190	0.8939

Taulukossa on esitetty kahdessa ensimmäisessä sarakkeessa virtausmittauksen 312K301 lukemia ja lämpötilamittauksen 312K501 lukemia, joita on käyty keräämässä OLI - laitoksen valvomosta eri ajanhetkillä. Seuraavissa kolmessa sarakkeessa on esitetty osittaisderivaatoille edellä esitettyjen kaavojen mukaan lasketut arvot syöttövesivirtauksen,

lämpötilan ja höyrynkosteuden suhteen. Kahdessa viimeisessä sarakkeessa nämä osittaisderivaattojen arvot on summattu yhteen sekä neliöllisesti (tällä tavalla laskiessa oletetaan, että eri tekijöiden virheet ovat toisistaan riippumattomia) (kaava 13.11),

$$u_{CA/CB} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial m_{312K301}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial X}\right)^2}, \text{ että tavallisesti summaamalla (kaava}$$

13.12) (jolloin saadaan suurin mahdollinen virheen arvo)

$$u_{DA/DB} = \frac{\partial Q}{\partial m_{312K301}} + \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial Q}{\partial X}. \text{ Seuraavassa taulukossa nämä samat arvot on laskettu}$$

käyttäen osittaisderivaatoissa kaksinkertaisen epävarmuuden arvoja. Luvun viimeisessä taulukossa on laskettu kerättyjen mittaustulosten perusteella voimalaitoksen teho eri ajanhetkillä käyttäen TVO:lla nykyisin käytössä olevia ominaistilavuuden arvoja, sekä taulukkokirjan mukaisia ominaistilavuuden arvoja.

Taulukko 10. Osittais- ja kokonaisdifferentiaalinen tulos ja laskuihin perustuvat mittausarvot kaksinkertaiselle epävarmuudelle:

Lukema 312K301 kg/s	Lukema 312K501 °C	$\frac{\partial Q}{\partial m_{312K301}}$ %	$\frac{\partial Q}{\partial T}$ %	$\frac{\partial Q}{\partial X}$ %	Tulos u_{CB} % summattu neliöllisesti	Tulos u_{DB} % summattu
1250	183	1.455	0.308	0.0752	1.4891	1.8382
1250	183	1.455	0.308	0.0752	1.4891	1.8382
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1250	183	1.455	0.308	0.0752	1.4891	1.8382
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	183	1.455	0.309	0.0755	1.4893	1.8395
1255	182	1.459	0.302	0.0755	1.4918	1.8365
1255	182	1.459	0.302	0.0755	1.4918	1.8365
1255	182	1.459	0.302	0.0755	1.4918	1.8365
1260	182	1.459	0.311	0.0759	1.4937	1.8459

Taulukko 11. Korjattujen syöttöveden korjauskertoimien avulla lasketut tehon arvot verrattuna nykyisiin arvoihin:

Lukema	Lukema	Korjatut arvot	Nykyisin käytetyt arvot	Erotus %
312K301 kg/s	312K501 °C	$\sqrt{\frac{1,12486}{1,129828}} = 0,99779901$ 0,000610049	0.997818 0.000612	
1250	183	99.540	99.543	0.002
1255	183	99.938	99.941	0.003
1255	182	100.220	100.223	0.003
1260	182	100.620	100.622	0.002

Keskimääräinen kertoimista aiheutuva virhe $\frac{0.002 + 0.003 + 0.003 + 0.002}{4} = 0.0025$.

18 CONDIN-OHJELMAN TEHON LASKENNAN VIRHETARKASTELU

18.1 CONDINin lämpötaseen laskenta /21/

CONDIN laskee voimalaitoksen lämpötaseen seuraavan kaavan perusteella (Liite 2).

$$Q_{MW} = (Q1 + Q2 + Q3 + Q4 - Q5) * 10^{-6} \quad (18.1)$$

Näistä termeistä Q1 muodostaa suurimman virheen kaavassa. Termit Q2-Q5 vaikuttavat tehoon enintään 0,296 %, kuten jo käsinlaskukaavan tarkastelussa kävi ilmi, joten niitä ei yksinkertaistamisen vuoksi tässä tarkastella. Seuraavassa tarkastellaan, mistä termeistä ja laskutoimituksista termi Q1 muodostuu (Liite 2).

CONDIN laskee termin Q1 lasketaan seuraavan kaavan perusteella:

$$Q1 = M_{fw-corr} * \left(\begin{array}{l} Steam_enthalpy(P_{react-corr} * 10^5, f_{moisture}) \\ - H_{fw} * 10^3 \end{array} \right) \quad (18.2)$$

missä $M_{fw-corr}$ = Syöttöveden virtaus, lämpötilakorjattu (kg/s), $P_{react-corr}$ = Reaktorin paine, korjattu (bar g), $f_{moisture}$ = Höyryn kosteus, H_{fw} = Syöttöveden entalpia (kJ/kg).

Arvon Q1 muodostavat termit taas muodostuvat seuraavien kaavojen ja mittausten perusteella (Liite 2). Liitteessä 8 on esitetty eri termien sisältämien paineiden arvot muutettuna oikeaan muotoon sekä taustatietoa laskelmille.

Lämpötilakorjattu syöttövesivirtaus $M_{fw-corr}$ lasketaan seuraavan kaavan perusteella:

$$M_{fw-corr} = M_{fw} * Flow_correction(f_{T-fw-nom}, T_{fw}) \quad (18.3)$$

missä M_{fw} = syöttöveden virtaus (kg/s), mittaus 312K301, T_{fw} = syöttöveden lämpötila ($^{\circ}$ C), mittaus 312K501 ja 312K502, $f_{T-fw-nom}$ = syöttövesivirtauksen nimellinen lämpötila, parametri.

Reaktorin korjattu paine $P_{react-corr}$ lasketaan seuraavan kaavan perusteella:

$$P_{react-corr} = P_{react} + f_{p-corr} * 10^{-5} \quad (18.4)$$

missä P_{react} = hienopaine (bar g), mittaus 211K101-211K104, f_{p-corr} = paineen korjaus, parametri.

Höyryn entalpia-arvo $Steam_enthalpy$ määritellään seuraavan kaavan ja paineenarvojen perustella:

$$Steam_enthalpy = \left(\begin{array}{l} 2790.52 + 0.074642p^3 \\ - 2.54615p^2 + 11.60056p - rf_{moisture} \end{array} \right) * 10^3 \quad (18.5)$$

$$\Delta p = 70 - \text{paine} * 10^{-5}$$

$$r = 1506 + 6.4\Delta p$$

$$p = \text{paine} * 10^{-6}$$

Syöttöveden entalpia-arvo H_{fw} määritellään seuraavan kaavan ja vakioiden perusteella:

$$H_{fw} = \text{Water_enthalpy}(P_{\text{react-corr}} * 10^{-5}, T_{fw}) * 10^3 \quad (18.6)$$

missä $P_{\text{react-corr}}$ = Reaktorin paine, korjattu (bar g), mittaus 211K101-211K104,

T_{fw} = Syöttöveden lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), mittaus 312K501 ja 312K502.

Arvo Water_enthalpy lasketaan seuraavien kaavojen ja arvojen perusteella:

$$\Delta p = \text{paine} * 10^{-5} - 70$$

$$t = \text{lämpötila} * 10^{-2}$$

Jos lämpötila on pienempi kuin 100°C , käytetään seuraavaa kaavaa, lämpötilan ylittäessä 100°C käytetään jälkimmäistä kaavaa:

$$h70 = a[1] + t * (a[2] + t * (a[3] + t * a[4])) \quad (18.7)$$

muuten:

$$h70 = b[1] + t * (b[2] + t * (b[3] + t * (b[4] + t * (b[5] + t * b[6]))) \quad (18.8)$$

$$\Delta h\Delta p = c[1] + t * (c[2] + t * (c[3] + t * c[4])) \quad (18.9)$$

$$\text{Water_enthalpy}(\text{paine}, \text{lämpötila}) = (h70 + \Delta h\Delta p * \Delta p) * 10^3 \quad (18.10)$$

Kaavoissa käytettävät lämpötiloista riippuvat vakiot ovat seuraavanlaisia

$$T < 100^{\circ}\text{C}$$

$$a(1) = 7.1$$

$$a(2) = 416.91$$

$$a(3) = -2.624$$

$$a(4) = 2.76$$

$$T > 100^{\circ}\text{C}$$

$$b(1) = -41.88919$$

$$b(2) = 571.0046$$

$$b(3) = -191.8050$$

$$b(4) = 116.7698$$

$$b(5) = -34.08195$$

$$b(6) = 4.153846$$

Nämä vakiot ovat lämpötilasta riippumattomia ja aina käytössä:

$$c(1) = 0.098$$

$$c(2) = -0.05702$$

$$c(3) = 0.05045$$

$$c(4) = -0.01749$$

Käsitellään tapausta, jossa lämpötila $t > 100^{\circ}\text{C}$ (normaaliajo):

$$\begin{aligned} h_{70} &= b[1] + t * (b[2] + t * (b[3] + t * (b[4] + t * (b[5] + t * b[6]))) \\ &= b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 + b[6]t^5 \end{aligned} \quad (18.11)$$

$$\begin{aligned} \Delta h \Delta p &= c[1] + t * (c[2] + t * (c[3] + t * c[4])) \\ &= c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3 \end{aligned} \quad (18.12)$$

Jolloin:

$$\begin{aligned}
 \text{Water_enthalpy} &= (h70 + \Delta h \Delta p * \Delta p) * 10^3 \\
 &= \left(b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 \right. \\
 &\quad \left. + b[6]t^5 + (c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3) * \Delta p \right) * 10^3 \\
 &= \left(b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 + b[6]t^5 \right. \\
 &\quad \left. + c[1]\Delta p + c[2]t\Delta p + c[3]t^2\Delta p + c[4]t^3\Delta p \right) * 10^3 \tag{18.13}
 \end{aligned}$$

18.2 Mittausketjujen virheet

Taulukossa 12 on esitetty mittausketjuista aiheutuvat virheet standardi- ja laajennetulle epävarmuudelle sekä vertailun vuoksi aritmeettinen keskiarvo (Liite 3) ja regressioanalyysin perusteella saatu arvo (Liite 4).

Mittausketjujen virheet:

Painemittauksen 211K101-K104 keskimääräinen virhe standardiepävarmuudella on

$$\frac{(0.02237 + 0.02599 + 0.03 + 0.0205)b \text{ arg}}{4} = 0.0247b \text{ arg}$$

Painemittauksen 211K101-K104 keskimääräinen virhe laajennetulla epävarmuudella on

$$\frac{(0.0448 + 0.0552 + 0.0743 + 0.0411)b \text{ arg}}{4} = 0.0539b \text{ arg}$$

Lämpötilamittauksen 312K501-502 keskimääräinen virhe standardiepävarmuudella on

$$\frac{(0.548 + 0.491)^{\circ}C}{2} = 0.5195^{\circ}C$$

Lämpötilamittauksen 312K501-502 keskimääräinen virhe laajennetulla epävarmuudella on

$$\frac{(1.097 + 0.981)^{\circ}C}{2} = 1.039^{\circ}C$$

Virtausmittauksen 312K301 standardiepävarmuus on aiempien laskujen mukaan 8,776 kg/s ja laajennettu epävarmuus on 18,267 kg/s.

Taulukko 12: Mittausketjujen epävarmuudet CONDIN - laskuille.

	Standardi- epävarmuus $u_A = \frac{a/2}{\sqrt{3}}$	Laajennettu epävarmuus $u_B = 2 * u_A$	Aritmeettinen keskiarvo $X = \frac{\sum_{n=1}^n x_n}{n}$	Epävarmuus regressioanalyysin perusteella
Virtauslähetin 312K301	0.0061 mA /0.53 kg/s	0.0122 mA /1.068 kg/s	0.0068 mA	0.0028 mA
I/U-muunnin 312K301	0.000289 V /0.04 kg/s	0.000578 V /0.081 kg/s	0.0012 V	0.0037 V
Juurtolaite 312K301	0.00461 V /0.647 kg/s	0.0092 V /1.1291 kg/s	0.0048 V	0.0055 V
Mittalaippa	0.624 %	1.3 %		
Lämpötilälähetin 312K501	0.0274 V/ 0.548 °C	0.0548 V/ 1.096 °C	0.0324 V	0.0397 V
U/U-muunnin 312K501	0.00115 V/ 0.0231 °C	0.0023 V/ 0.046 °C	0.002 V	$1.91 * 10^{-15}$ V
Lämpötilälähetin 312K502	0.0245 V /0.491 °C	0.0491 V /0.981 °C	0.0342 V	0.0395 V
Painelähetin 211K101	0.0173 mA /0.0216 barg	0.0346mA /0.0433 barg	0.0155 mA	0.0276 mA
I/U-muunnin 211K101	0.000289V /0.00057 barg	0.000578 V /0.00116 barg	0.0004 V	0.00052 V
Eristysvahvistin 211K101	0.00289 V /0.00578 barg	0.00578 V /0.0115 barg	0.0034 V	0.00352 V
Painelähetin 211K102	0.0202 mA /0.0253 barg	0.0404 mA /0.0505 barg	0.044 mA	0.0276 mA
I/U-muunnin 211K102	0.000866 V /0.00173 barg	0.00173 V /0.00346 barg	0.0014 V	0.00095 V
Eristysvahvistin 211K102	0.00548 V /0.01096barg	0.01096 V /0.0219 barg	0.0116 V	0.00703 V
Painelähetin 211 K103	0.0231 mA /0.0287 barg	0.0577 mA /0.0722 barg	0.022 mA	0.0301 mA
I/U-muunnin 211 K103	0.000866 V /0.00173 barg	0.00173 V /0.00346 barg	0.0016 V	0.00151 V
Eristysvahvistin 211 K103	0.00433 V /0.00866 barg	0.00866 V /0.0173 barg	0.0082 V	0.00318 V
Painelähetin 211K104	0.0115 mA /0.0144 barg	0.0231 mA /0.0289 barg	0.0111 mA	0.0167 mA
I/U-muunnin 211K104	0.00115 V /0.00231 barg	0.00231 V /0.00462 barg	0.0028 V	0.00089 V
Eristysvahvistin 211K104	0.00722 V /0.0144 barg	0.0144 V /0.0289 barg	0.0068 V	0.00899 V

18.3 Osittaisderivaatat ja kokonaisdifferentiaalit termin Q1 sisältämille kaavoille

Taustatietoa laskelmiin esimerkiksi eri paineen arvoista on esitetty liitteessä 8, joka sisältää pätkiä CONDIN-asiakirjasta sekä omia laskelmiani.

Osittaisderivaatat ja kokonaisdifferentiaali kaavalle $\Delta M_{fw-corr}$:

$$M_{fw-corr} = M_{fw} * Flow_correction(f_{T-fw-nom}, T_{fw})$$

$$\Delta M_{fw-corr} = \frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial M_{fw}} * \Delta M_{fw}$$

$$+ \frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial Flow_correction} * \Delta Flow_correction$$

$$= Flow_correction * \Delta M_{fw} + M_{fw} * \Delta Flow_correction \quad (18.14)$$

$$= 0.999189 * 8.776 + 1251.3 * 0.00000741 = 8.77815$$

$$Flow_correction = \sqrt{\frac{1,11178}{1,113586}} = 0.999189 \text{ (Liite 2, s.2-3)}$$

Taulukko 13. Termin $\Delta M_{fw-corr}$ osittaisderivaatat standardiepävarmuudella ja termin sisältämä virhe standardiepävarmuudella.

Virtaus kg/s 312K301SE	Keskiarvo $^{\circ}\text{C}$ 312K501,502	$\frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial M_{fw}}$ kg/s	$\frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial Flow_correction}$ kg/s	Tulos u_{CA} kg/s summattu neliöllisesti	Tulos u_{DA} kg/s summattu
1251,3	183,4	8,7688	0,009272	8,768805	8,778072
1252,2	183,4	8,7688	0,009278	8,768805	8,778078
1251,7	183,4	8,7688	0,009275	8,768805	8,778075
1252,2	183,4	8,7688	0,009278	8,768805	8,778078
1251,1	183,4	8,7688	0,009270	8,768805	8,778070
1253	183,4	8,7688	0,009284	8,768805	8,778084
1251,7	183,4	8,7688	0,009275	8,768805	8,778075
1251,7	183,4	8,7688	0,009275	8,768805	8,778075
1250,8	183,4	8,7688	0,009268	8,768805	8,778068
1252	183,4	8,7688	0,009277	8,768805	8,778077

Laskut pohjautuvat kerättyihin mittausarvoihin, jotka on esitetty liitteessä 9. Kuten käsinlaskentakaavan tarkastelussa, osittaisderivaatat on summattu yhteen neliöllisesti sekä summattu yhteen. Standardiepävarmuuden keskiarvo on summaamalla neliöllisesti (u_{CA}):8,768805, joka on 0,00626 %:a koko mittausalueesta. Lisäämällä tähän arvoon mittalaipan standardiepävarmuus, saadaan kokonaisepävarmuudeksi (u_{CA}):0,6303. Standardiepävarmuuden keskiarvo summaamalla (u_{DA}): 8,7780752, joka on 0,00627 %:a koko mittausalueesta. Lisätään tähän arvoon vielä mittalaipan standardiepävarmuus, jolloin saadaan koko standardiepävarmuudeksi (u_{DA}): 0,6303 %, joka on sama, kuin neliöllisesti summaamalla saatu kokonaisepävarmuus. Seuraavassa taulukossa on esitetty vastaavat arvot laajennetulla epävarmuudella laskettuna.

Taulukko 14. Termin $\Delta M_{fw-corr}$ osittaisderivaatat laajennetulla epävarmuudella ja termin sisältämä virhe laajennetulla epävarmuudella.

Virtaus kg/s 312K301SE	Keskiarvo $^{\circ}\text{C}$ 312K501,502	$\frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial M_{fw}}$ kg/s	$\frac{\partial M_{fw-corr}}{\partial Flow_correction}$ kg/s	Tulos u_{CB} kg/s summattu neliöllisesti	Tulos u_{DB} kg/s summattu
1251,3	183,4	18,2521	0,018544	18,252109	18,270644
1252,2	183,4	18,2521	0,018557	18,252109	18,270657
1251,7	183,4	18,2521	0,018550	18,252109	18,270650
1252,2	183,4	18,2521	0,018557	18,252109	18,270657
1251,1	183,4	18,2521	0,018541	18,252109	18,270641
1253	183,4	18,2521	0,018569	18,252109	18,270669
1251,7	183,4	18,2521	0,018550	18,252109	18,270650
1251,7	183,4	18,2521	0,018550	18,252109	18,270650
1250,8	183,4	18,2521	0,018536	18,252109	18,270636
1252	183,4	18,2521	0,018555	18,252109	18,270655

Laajennetun epävarmuuden keskiarvo on summaamalla neliöllisesti (u_{CB}):18,252109, joka on 0,01304 %:a koko mittausalueesta. Lisäämällä tähän arvoon mittalaipan laajennettu epävarmuus, saadaan kokonaisepävarmuudeksi (u_{CB}):1,31304 %. Laajennetun epävarmuuden keskiarvo summaamalla (u_{DB}): 18,2706509, joka on prosentteina mittausalueesta 0,01305 %, kun tähän lisätään mittalaipan laajennettu epävarmuus, saadaan (u_{DB}):1,31305 %.

Osittaisderivaatat ja kokonaisdifferentiaali kaavalle *Steam _enthalpy* :

$$\begin{aligned}
 \text{Steam_enthalpy} &= \left(\begin{array}{l} 2790.52 + 0.074642p^3 \\ -2.54615p^2 + 11.60056p - r * f_{moisture} \end{array} \right) * 10^3 \\
 &= \left(\begin{array}{l} 2790.52 + 0.074642p^3 - 2.54615p^2 \\ + 11.60056p - (1506 + 6.4 * \Delta p) f_{moisture} \end{array} \right) * 10^3 \quad (18.15)
 \end{aligned}$$

$$\Delta Steam_enthalpy = \frac{\partial Steam_enthalpy}{\partial p} * \Delta p + \frac{\partial Steam_enthalpy}{\partial f_{moisture}} \quad (18.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Steam_enthalpy}{\partial p} * \Delta p &= \left(\left(0.074642 * 3p^2 - 2.54615 * 2p + 11.60056 - 6.4 * (70 - p)f_{moisture} \right) * 10^3 \right) * \Delta p \\ &= \left(\left(0.2239p^2 - 5.0923p + 11.60056 - 448f_{moisture} + 6.4pf_{moisture} \right) * 10^3 \right) * \Delta p \\ &= \left((0.2239p^2 - 5.0923p + 11.60056 + 6.4f_{moisture}) * 10^3 \right) * \Delta p \quad (18.17) \\ &= \left((10.9764 - 35.6527 + 11.60056 + 0.1472) * 10^3 \right) * \Delta p \\ &= \left(-12.92854 * 10^3 \right) * 0.0247 = 319.335 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Steam_enthalpy}{\partial f_{moisture}} * \Delta f_{moisture} &= \left((-1506 - 6.4 * \Delta p) * 10^3 \right) * \Delta f_{moisture} \quad (18.18) \\ &= \left(-1506 + 0.0832 * 10^3 \right) * \Delta f_{moisture} \\ &= \left(1505.9168 * 10^3 \right) * 0.05 = 75.295 * 10^3 \end{aligned}$$

Taulukko 15. Termin *Steam _enthalpy* osittaisderivaatat standardiepävarmuudella ja laajennetulla epävarmuudella, sekä koko termin sisältämä virhe.

	Höyryn kosteus %	Paine barg 211K101-K104	$\frac{\partial \text{Steam_enthalpy}}{\partial p}$ kJ/kg	$\frac{\partial \text{Steam_enthalpy}}{\partial f_{\text{moisture}}}$ kJ/kg	Tulos u_{CA} / u_{CB} summattu neliöllisesti kJ/kg	Tulos u_{DA} / u_{DB} summattu kJ/kg
u_A	0,023	69	319,3	75295	75295,7	75614,3
u_B	0,023	69	696,8	150591,7	150593,3	151288,5

Oikea arvo: 2667051,25. Virhe prosentteina standardiepävarmuudella summaamalla neliöllisesti (u_{CA}): 0,0282 ja summaamalla (u_{DA}): 0,0284 %. Laajennetulla epävarmuudella summaamalla neliöllisesti (u_{CB}): 0,0565 ja summaamalla (u_{DB}): 0,0567 %. Oikea arvo on laskettu sijoittaen valvomosta kerätyt mittausarvot (Liite 9) kaavaan.

Osittaisderivaatat ja kokonaisdifferentiaali termille *Water _enthalpy*:

$$\text{Water_enthalpy} = (h70 + \Delta h \Delta p * \Delta p) * 10^3$$

$$= \left(\begin{array}{l} b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 + b[6]t^5 \\ + (c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3) * \Delta p \end{array} \right) * 10^3$$

$$= \left(\begin{array}{l} b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 + b[6]t^5 \\ + c[1]\Delta p + c[2]t\Delta p + c[3]t^2\Delta p + c[4]t^3\Delta p \end{array} \right) * 10^3$$

$$\Delta \text{Water_enthalpy} = \frac{\partial \text{Water_enthalpy}}{\partial t} * \Delta t$$

$$+ \frac{\partial \text{Water_enthalpy}}{\partial p} * \Delta p$$

(18.19)

$$\frac{\partial \text{Water}_{-enthalpy}}{\partial t} * \Delta t = \left(\left(b[2] + 2 * b[3]t + 3 * b[4]t^2 + 4 * b[5]t^3 + 5 * b[6]t^4 \right) * 10^3 + c[2]\Delta p + 2 * c[3]t\Delta p + 3 * c[4]t^2\Delta p \right) * \Delta t \quad (18.20)$$

$$= \left(\left(571.0046 + 2 * (-191.8050) * 1.834 + 3 * 116.7698 * 1.834^2 + 4 * (-34.08195) * 1.834^3 + 5 * 4.153846 * 1.834^4 + (-0.05702) * 0.013 + 2 * 0.05045 * 1.834 * 0.013 + 3 * (-0.01749) * 1.834^2 * 0.013 \right) * 10^3 \right) * \Delta t$$

$$= \left(\left(571.0046 + (-703.54074) + 1178.28528 + (-840.973711) + 234.97286 + (-0.00074126) + 0.0024056 + (-0.0022943) \right) * 10^3 \right) * \Delta t$$

$$= (439.7476 * 10^3) * 0.5195 * 10^{-2} = 2.28448$$

$$\frac{\partial \text{Water}_{-enthalpy}}{\partial \Delta p} = \left((c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3) * 10^3 \right) * \Delta p \quad (18.20)$$

$$= \left(0.098 + (-0.05702) * 1.834 + 0.05045 * 1.834^2 + (-0.01749) * 1.834^3 \right) * 10^3$$

$$= (0.055225 * 10^3) * 0.0247 = 0.00136$$

Taulukko 16. Termin *Water _enthalpy* osittaisderivaatat standardiepävarmuudella ja laajennetulla epävarmuudella, sekä koko termin sisältämä virhe.

	Lämpötila °C 312K501, 502	Paine barg 211K101 -104	$\frac{\partial Water_enthalpy}{\partial t}$ kJ/kg	$\frac{\partial Water_enthalpy}{\partial \Delta p}$ kJ/kg	Tulos u_{CA} / u_{CB} Sum- mattu neliöl- lisesti kJ/kg	Tulos u_{DA} / u_{DB} Summat- tu kJ/kg
u_A	183,4	69	2284,48	1,36	2284,4 8	2285,84
u_B	183,4	69	4568,977	2,97	4568,9 8	4571,95

Oikea arvo: 781115,04. Virhe prosentteina standardiepävarmuudella summaamalla neliöllisesti (u_{CA}): 0,002925 % ja summaamalla (u_{DA}) 0,002926 %. Laajennetulla epävarmuudella summaamalla neliöllisesti (u_{CB}): 0,005850 % ja summaamalla (u_{DB}): 0,005853 %. Oikea arvo on laskettu sijoittaen valvomosta kerätyt mittausrvot kaavaan, oikea arvo vastaa valvomosta saatua mittaustulosta (Liite 9) veden entalpialle.

Taulukko 17. Arvon Q1 sisältämien eri termien virheet standardi- ja laajennetulla epävarmuudella, sekä koko arvon Q1 sisältämä virhe.

	Δ Syöttö- veden virtaus kg/s % 521K016E	$\Delta Water$ _enthalpy kJ/kg % 521K006E	$\Delta Steam$ _enthalpy kJ/kg %	$\frac{\Delta Q1}{\sum \sqrt{(u_{DA})^2} / \sum \sqrt{(u_{CA})^2}}$ $\frac{\sum \sqrt{(u_{DB})^2} / \sum \sqrt{(u_{CB})^2}}$ %	$\frac{\Delta Q1}{\sum u_{DA} / \sum u_{CA} \sum u_{DB}}$ %
u_{DA} / u_{CA}	0,6303/ 0,6303	0,002926/ 0,002925	0,0284/ 0,0282	0,631/ 0,631	0,662/ 0,661
u_{DB} / u_{CB}	1,31304/ 1,31304	0,005853/ 0,005850	0,0567/ 0,0565	1,314/ 1,314	1,376/ 1,375

Taulukossa on laskettu yhteen kullekin termin Q1 osalle saatu standardiepävarmuus summaamalla ja summaamalla neliöllisesti. Myös nämä termit on laskettu yhteen sekä summaamalla, että summaamalla neliöllisesti.

19 YHTEENVETO

Sekä käsinlaskennan, että CONDIN-ohjelman laskennan sisältämä epävarmuus jäi alle turvallisuusanalyysissä käytetyn arvon 2 %:a. Myöskään sillä, korreloivatko osittaisderivaatat (käsinlaskukaavassa syöttövesivirtauksen-, lämpötilan- ja höyrynkosteuden osittaisderivaatat, CONDIN-laskuissa termin Q1 osittaisderivaatat) keskenään, ei ollut kovin suurta merkitystä koko termin kokonaisvirheen kannalta. Jo ennalta tiedettiin, että syöttövesivirtauksen mittaukseen sisältyvä virhe on suurin epävarmuustekijä näistä mittausrvoista, joita laskennassa käytettiin. Lämpötilan mittaus vaikutti syöttövesivirtausmittauksen jälkeen toiseksi eniten tuloksen epävarmuuteen, vähiten vaikuttivat paine- ja höyrynkosteusmittauksien sisältämät virheet.

Kiinnostava huomio oli, että ruotsissa säteilyturvallisuutta valvovat viranomaiset olivat ilmoittaneet raportissaan (Liite 1) koko syöttövesivirtausmittausketjun epävarmuudeksi 0,7 %:a, joka vastasi melko hyvin tässä työssä laskettua syöttövesivirtausmittauksen standardiepävarmuutta. Sen sijaan ruotsalaiset ilmoittivat lämpötilamittauksen epävarmuuden olevan lähellä 1 %:a, joka on suurempi kuin tässä työssä laskettu standardiepävarmuus, mutta vastaa melko hyvin tässä työssä saatua laajennetun epävarmuuden arvoa lämpötilamittaukselle.

Lopputyöhön sisältyi useita eri virheen laskentatapoja, koska käytetty aineisto (kalibrointiraportit) ei ole tyypillistä virhelaskelmissa käytettyä aineistoa, vaan virhelaskelmat perustuvat useimmiten kerättyihin mittaustuloksiin. Jos kuitenkin verrataan tämän työn laskelmiani mittausten epävarmuuksista liitteessä 1 esitettyihin ruotsissa määriteltyihin epävarmuuksiin, niin arvot täsmäävät melko hyvin, vaikka mittaustavat eri voimalaitoksilla hieman eroavatkin maittain.

Veden ominaistilavuudenarvoissa epäilystä virheestä (luku 16) toimitettiin TVO:lle tieto sen jälkeen, kun virhe oli havaittu. Juuri ennen lopputyön valmistumista TVO:lta tuli tieto, että he ovat tarkastaneet veden ominaistilavuuden arvot ja niissä tosiaan oli virhe, kuten todettiin luvussa 16.

LÄHTEET:

1. Säteilyturvakeskuksen verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 7.1.2009, 8.1.2009, 9.1.2009] Sivu on päivitetty 28.6.2004. Saatavissa: http://www.stuk.fi/stuk/toiminta/fi_FI/toiminta/
2. Säteilyturvakeskuksen verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 7.1.2009, 8.1.2009] Sivu on päivitetty 27.11.2008. Saatavissa: http://www.stuk.fi/stuk/toiminta/fi_FI/ydinturvallisuus/
3. <http://www.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/19870990> 7.1.2009
4. Ydinreaktori. Wikipedian verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 15.1.2009, 13.3.2009] Sivu on päivitetty 13.3.2009. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ydinreaktori>
5. Ydinvoima. Wikipedian verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 12.1.2009, 13.1.2009, 14.1.2009, 16.3.2009] Sivu on päivitetty 16.3.2009. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ydinvoima>
6. International Atomic Energy Agency verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 16.3.2009] Saatavissa: <http://www.iaea.or.at/programmes/a2/>
7. Säteilyturvakeskuksen verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 20.1.2009] Sivu on päivitetty 3.6.2004. Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/vakavuusasteikko/fi_FI/maaritelmat/
8. Säteilyturvakeskuksen verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 20.1.2009] Sivu on päivitetty 10.6.2008. Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/vakavuusasteikko/fi_FI/uomentapahtumat/
9. World Nuclear Associationin verkkosivut [verkkodokumentti] [viitattu 2.3.2009] Tehty tammikuu 2009. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf13.html>
10. Milner Bryan, Nuclear and Particle Physics, 1.printing, Cambridge, Cambridge University Press, 2001, 90p.
11. Teollisuuden Voiman koulutusmateriaali, Ydinvoimatekniikan peruskurssi: Reaktorifysiikka, julkaisematon
12. Teollisuuden Voima Oy, FSAR asiakirjakokonaisuus: OL1/OL2 - järjestelmä 312 - syöttövesijärjestelmä; lopullinen turvallisuusseloste 15.11.2007
13. Teollisuuden Voima Oy, muistio konetekniikka: syöttöveden virtausmittaus, 29.1.2007
14. Aumala Olli, Teollisuusprosessien mittaukset, 4.painos, Tampere, Pressus, 1998, 376s.

15. Teollisuuden Voima Oy:n sisäiset verkkosivut, Olkinet, [verkkodokumentti] [viitattu 9.4.2009] Koulutusmateriaalit: Arkisto/Käyttö
16. Teollisuuden Voima Oy, FSAR asiakirjakokonaisuus: OL1/OL2 - Final safety analysis report for system 541; process measuring system
17. Spitzer, David W. Flow Measurement Practical Guides for Measurement and Control, 2nd printing, United States of America, Instrument Society of America, 1996, 646 p.
18. OL1 ja OL2 - laitosten mittalaitteiden tarkastusasiakirjat vuosilta 2003 ja 2007 (OL2), 2005 (OL1)
19. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, mittaus- ja informaatiotekniikka, Jouko Halttunen, Syöttövesivirtausmittauksen epävarmuus 26.8.2001
20. Teollisuuden Voima Oy:n sisäiset verkkosivut, Olkinet, [verkkodokumentti] [viitattu 24.2.2009] koulutusmateriaali: Ydinvoimatekniikan peruskurssi, lämpö- ja virtausoppi sekä lämmönsiirtimet
21. Teollisuuden Voima Oy, muistio: Termisen tehon laskentaohjelma CONDIN 26.9.2008
22. Teollisuuden Voima Oy, muistio: Mittausten suodatusohjelma Filter2 10.9.2007
23. Teollisuuden Voima Oy, muistio: Höyrynkosteuden mittaus 28.2.2005
24. Lähteenmäki Ilkka, Mittaustekniikka 1 tulosten arviointi ja esittäminen SI-järjestelmä, 6.painos, Turku, Tuusulan Pika-offset, 1990, 80 s.
25. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu MIT-1010 Mittaustekniikka Luento 10, luentomateriaali
26. Keskustelu, Jokinen Heikki, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Vanhempi tutkija, Halttunen Jouko, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Professori
27. Teollisuuden Voima Oy, muistio: OL1/OL2 Reaktoritehon laskeminen käsin 24.2.2002
28. Keskustelu, Nuutinen Pekka, reaktori-insinööri, Teollisuuden Voima Oy, Reaktorivalvontatoimisto, Kilpi Juha, Asiantuntija, Teollisuuden Voima Oy, Kone-tekniikkatoimisto
29. Perttula Jarmo, Energiatekniikka, 1.painos, Helsinki, WSOY, 2000, 204 (72)s.
30. Wagner, Wolfgang, Properties of water and steam, the industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties, tables based on these equations. Berlin, Springer, 1998, 354p.

1 MITTAUSVIRHEET RUOTSIN YDINVOIMALAITOKSELLA

Seuraava teksti on kirjoitettu Ruotsin säteilyturvallisuusviranomaisten tekemän asiakirjan perusteella.

Forsmark 1 laitoksella huomattiin virhe valvomon tietokoneen ilmoittaman tehonlukeman ja todellisen tehon välillä keväällä 2006. 24.3.2006 Forsmarkin voimalaitosyhtiö ilmoitti epäilyksestä, että Forsmark 1-laitos käy yli 108 %:n tehotasolla, joka vastaa 2928 MW:n tehoa, joka taas on reaktorin käyttöluvassa ilmoitettu suurin sallittu tehotaso. Epäily perustui ”tracer mittauksiin” turbiinilaitoksella. 7.huhtikuuta SKI:lle (statens kärnkraftinspektion nykyään Strålsäkerhetsmyndigheten) ilmoitettiin, että tehotaso oli luultavasti 1-2 % oletettua korkeampi. Syynä tähän pidettiin kuristuslevyjen kulumista. Tämän seurauksena SKI suoritti niin sanotun RASK-tutkinnan.

SKI suoritti tapauksen seurauksena myös suppeamman tutkinnan liittyen Ringhals 1: n suunniteltuun tehonkorotukseen sekä syöttövesijärjestelmän mittauslaitteiston suunniteltuihin parannuksiin. Tutkimuksessa, jossa käsiteltiin syöttövesijärjestelmää, kiinnitettiin mm. huomiota aiemmin määriteltyyn 2 %:n turvamarginaaliin ja tämän marginaaliarvon vikoihin, jota käytetään tietyissä rakennekestävyysanalyseissä, sekä syöttövesi mittauksen toteutukseen Crossflow systeemillä, joka sisältää venturiputken sekä ultraäänilaitteiston.

1.2 Samoja tapauksia myös USA:ssa

Syöttövesivirtauksen mittaukseen käytettyjen ultraäänilaitteistojen toteutusvirheet ovat myös aiheuttaneet jonkin verran tehonylityksiä USA:ssa. Tehonylityksiä on toki sattunut muistakin syistä. NRC:n (Yhdysvaltain säteilyvalvontaviranomainen, nuclear regulatory commission) hakukoneelta löytyy vuodesta 1999 eteenpäin yli parikymmentä dokumenttia, jotka käsittelevät sallitun reaktoritehon ylittämistä. Yli puolessa tapauksista tehonylitys liittyy jollakin lailla ultraäänimittauksen käyttöön syöttövesivirtauksen mittauksessa. Caldon, joka valmistaa ultraäänimittauslaitteistoja virtausmittaukseen, on

julkaissut koosteen tehonylitystapauksista amerikkalaisilla ydinvoimalaitoksilla vuosina 1981-1997.

Tämän seurauksena ruotsin säteilyturvallisuus viranomaiset kiinnittivät erityistä huomiota ruotsin ydinvoimalaitosten reaktoritehon määriteltyihin käyttöarvoihin. Selvityksessä kiinnitetään huomiota mm. ydinvoimalaitosten reaktoritehon rajoittamiseen, tehontason analysoimiseen, tehonmittaustapoihin, tehon seurantaan ja mittalaitteistojen kalibrointiin liittyviä epävarmuuksia/virhemarginaaleja.

Viranomaiset tarkastivat hallituksen myöntämän käyttöluvan ydinvoimalaitoksille, turvallisuusselvityksen, turvallisuustekniset käyttövaatimukset sekä joitain laitosasiakirjoja. Tarkasteluun sisältyi myös amerikkalaisen valvontaviranomaisen NRC:n säädöksiä ja taustamateriaalin läpikäyminen.

1.3 Tehon virhemarginaali

Ruotsissa on puhuttanut paljon myös reaktoritehon mittaamiseen käytetty suurin sallittu virhemarginaali. Ruotsissa on oltu 2 % virhemarginaalin käytön kannalla. Myös muita virhemarginaaleja on käytössä, esimerkiksi Saksassa käytetään suurempaa virhemarginaalia, 3 %. Yhdysvalloissa on myös käytössä 2 %:n virhemarginaali. NRC on tulkinnut 2 % virhemarginaalin tarpeen tehonmittauksessa kattamaan instrumentoinnin virheet, mittausvirheet ja muut epävarmuustekijät tehonmäärityksessä. NRC on yrittänyt selvittää, mitkä muut tekijät voisivat aiheuttaa virhettä tehonmittaukseen, mutta on tullut siihen tulokseen, että luultavasti suurin epävarmuustekijä on mittausvirheet, joita varten virhemarginaali on asetettu.

Ruotsissa on huomattu tarvetta tehonmäärityksessä käytettyjen termien ”terminen teho” sekä ”lissensioitu teho” määritelmien tarkennukseen. Tehonrajoituksen voi katsoa koskevan joko reaktorisydämessä tuotettua tehoa tai koko tehoa, johon on huomioitu myös häviöt ja muista laitteista saatava energia. Lissensoidulla teholla tulisi kuitenkin tarkoittaa koko voimalaitosprosessissa tuotettua tehoa.

Myös suomessa on käytetty turvallisuusanalyysien pohjana tätä 2 %:n virhemarginaalia. Suomessakin tämä aihe on herättänyt viime aikoina keskustelua. Tällä hetkellä suomen ydinvoimalaitosten sallittu teho on määritelty niiden käyttöluvassa ja se on 100 %. Turvallisuusanalyysit laitoksille taas on tehty käyttäen maksimitehona tätä 102 %:n tehoa. 102 %:n tehon arvo on siis suomessa käytössä vain turvallisuusanalyyseissä ja suomen ydinvoimalaitokset eivät saa ylittää niille annettua sallittua tehoa. 102 %:n tehon arvoa on käytetty vain analyyseissä kattamaan mahdolliset virheet tehon mittauksessa, laskennassa, yms.

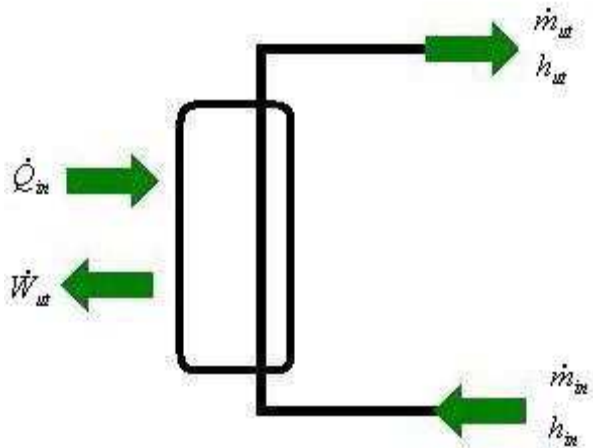
1.4 Tehon määrittäminen Ruotsissa

Ruotsissa on samanlainen APRM-mittaussysteemi, kuin Olkiluodon ydinvoimalaitosilakin. APRM-signaalit täytyy skaalata vastaamaan termisen tehon arvoa lämpötaselaskennan avulla saatuun arvoon, koska detektorit palavat hiljalleen reaktorisydämessä. Forsmark 1, Ringhals 1 sekä Oskarshamn 3 laitoksilla tämä APRM-mittauksien tarkistus tapahtuu kerran vuorokaudessa. Oskarshamn 2-laitoksen ohjeistuksessa suositellaan uudelleenkalibrointia kun yksittäisen APRM-kanavan mittaustulos poikkeaa yli 2 prosenttia lämpötaselaskelman arvosta. APRM-detektorit kalibroidaan TIP-kalibroinnilla (Traversing Incore Probe).

1.5 CONDIN

Lämpötaselaskenta suoritetaan myös Ruotsissa CONDIN-tietokoneohjelmalla. Ruotsissa CONDINin kaavat lasketaan seuraavalla tavalla:

Laskenta perustuu termodynamiikan ensimmäiseen pääsääntöön. Kuvio kuvaa reaktoriastiatia ja siihen tulevia sekä poistuvia energioita.



Kuva 10: Reaktoripaineastia

1.5.1 Tuleva energia

Sisään tuleva energia per aikayksikkö kirjoitetaan muodossa:

$$m_{in}(u_{in} + P_{in}v_{in}) + Q_{in} + Q_{muu1}$$

m_{in} = massavirta systeemiin

u_{in} = sisä-ominaisenergia

Joten $m_{in}u_{in}$ = sisäenergia, joka tuodaan systeemiin

$P_{in}v_{in}$ = energia, joka tuodaan systeemiin

$u + PV$ = entalpia

h = ominaisentalpia

H = entalpia

Q_{in} = lämpövirta, teho joka tuodaan systeemiin tankissa (antoteho)

Q_{muu1} = muut tuodut energiat

1.5.2 Poistuva energia

$$m_{ut}h_{ut} + M_{ut} + Q_{muu2} = \text{systemistä poistuva energia}$$

M_{ut} = virtaus ulos tankista

Q_{muu2} = muut häviöt

1.5.3 Energiatase

Termodynamiikan ensimmäisen lain perusteella:

$$m_{in}h_{in} + Q_{in} + Q_{muu1} = m_{ut}h_{ut} + M_{ut} + Q_{muu2}$$

Koska massavirta, eli vesivirtaus, sisään systeemiin on yhtä suuri, kuin höyryvirtaus ulos systeemistä, voidaan kaava kirjoittaa muotoon:

$$Q_{in} = m(h_{ut} - h_{in}) + Q_{muu2} - Q_{muu1} + M_{ut}$$

Termit övr1 ja övr2 voidaan yhdistää muiksi häviöiksi/tuoduiksi energioiksi. M_{ut} = virtaus ulos tankista on nolla. Jolloin termisen tehon laskentakaava voidaan kirjoittaa muotoon:

$$Q_{in} = m(h_{ut} - h_{in}) \pm \text{muutenergiat}$$

Kaava on vielä hyvin yksinkertaisessa muodossa, mutta se mutkistuu, kun muut energiat määritellään tarkemmin. Muiden energioiden tarkempi määrittely on laitoskohtaista.

Seuraavassa kuitenkin käydään läpi Ringhals 1-laitoksen laskentaa. Laitoksella on kaksi turbiinia, joten turbiinien kokonais-terminen teho voidaan kirjoittaa muotoon:

$$Q = m_1(h_{ut} - h_{in1}) + m_2(h_{ut} - h_{in2}) \rightarrow$$

$$Q_{turbiner} = M_{fw1k} (H_s - H_{fw1}) + M_{fw2k} (H_s - H_{fw2})$$

M_{fw1k} ja M_{fw2k} ovat lämpötilakorjattuja syöttövedenvirtauksia.

H_s = höyryn entalpia

H_{fw1} ja H_{fw2} ovat syöttövesivirtauksien entalpiat

Termi muut energiat muodostuu Ringhals 1-laitoksella seuraavista energioista:

Q_{loss} , Q_{crud} , Q_{pump} , Q , joista ensimmäinen tarkoittaa kiinteitä lämpöhäviöitä (Ringhalsissa

käytetty arvo on 0,95 MW), toinen termi tarkoittaa crudinpoistovirtausta, viimeinen termi tarkoittaa pääkiertopumppujen tehoa. Jolloin terminen teho voidaan kirjoittaa muotoon:

$$Q = Q_{turbiner} + Q_{crud} + Q_{loss} 10^6 - Q_{pump}$$

Tai, jos halutaan kirjoittaa kaikki termit kaavamuodossa:

$$Q = M_{fw1k} (H_s - H_{fw1}) + M_{fw2k} (H_s - H_{fw2}) \\ + M_{crud} (H_{hc}^3 - H_{crud}) + Q_{loss}^6 - \frac{p_{rc}^5 M_{hc}}{\rho_{hc} \eta_{pump}}$$

M_{crud} = Crudinpoistovirtaus

H_{hc} = Sydämen jäähdytysvirtauksen entalpia

H_{crud} = Crudivirtauksen entalpia

p_{rc} = Reaktorin paine

M_{hc} = Kokonaispääkiertovirtaus

ρ_{hc} = PK-virtauksen tiheys

η_{pump} = pääkiertopumppujen hyötysuhde

Raportissa vielä tarkennetaan kaavan ja eri teho-nimityksien yhteyttä. Kaavan tuloksen virallinen nimitys on terminen fissioteho ja jos pumppujen tehoa ei vähennetä, saadaan kokonais-terminen teho.

1.6 Virheet laskennassa

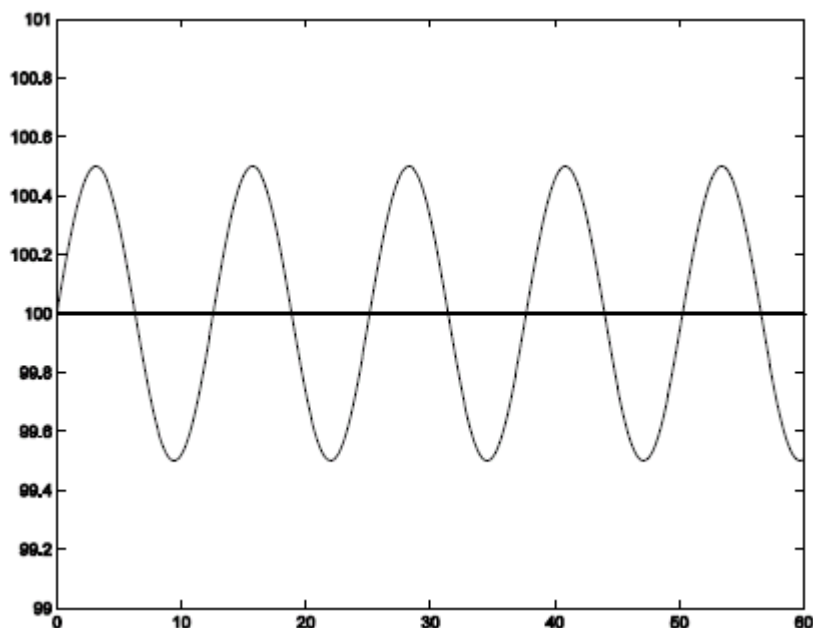
Lämpötaselaskentaan voi tulla virhe joko itse laskennasta, yksittäisestä syöttötiedosta tai neutronivuomittauksen tiedonsiirrosta. Lämpötaselaskennan suorittaminen edellyttää, että laitos käy tasaisella teholla silloin, kun mittausarvot luetaan. USA:ssa on ollut myös useita tapauksia, joissa sallittu teho on vahingossa ylittynyt, kun lämpötaselaskennassa käytetyt kertoimet ovat olleet virheellisiä. Myös laskennassa käytettyjen häviöiden virheelliset arvot ovat aiheuttaneet ainakin USA:ssa tehonylityksiä.

Mittausten osalta virhe voi esiintyä joko yksittäisessä mittauksessa tai yleisesti mittauksissa. Mittausvirheet voivat johtua esimerkiksi virheellisestä mittalaitteiston kalibroinnista. Myös tällaisista virheistä johtuvia tehonylityksiä on raportoitu USA:ssa ja Ruotsin tehonylitystapaus voi mahdollisesti johtua väärästä kalibroinnista.

Myös Ruotsissa tehdyissä analyyseissä on huomioitu, että tehonmäärittämisessä suurin virhe aiheutuu syöttövesivirtauksen mittauksesta. Ruotsissa ydinvoimalaitoksilla syöttövesivirtauksen mittaukseen käytetään sekä venturiputkea että kuristuslevyä/mittalaippaa. Virtausmittauksia voidaan tarkistaa kokeena suorittamalla ”tracer-mittauksella”, jossa veden joukkoon lisätään merkkiaineliuos, jonka pitoisuuden perusteella voidaan myöhemmin määrittellä virtausnopeus. Ruotsin viranomaiset ilmoittivat tällaisen tracer-mittauksen jälkeen virtausmittauksen kokonaisvirheeksi (mittausketju) mukaan luettuna 0,7 %, kun taas Olkiluodossa jo mittalaipan virhe kaksinkertaisella epävarmuudella on 1,3 %.

Ruotsissa seuraavaksi suurin virhetekijä tehonmäärittämisessä on syöttöveden lämpötilan mittaus. FKA:n (Forsmarks Kraftgrupp AB) mukaan Forsmark 1-laitoksen lämpötilamittauksessa on 1 % virhe, joka on suurempi, kuin valmistajan ilmoittama virhe.

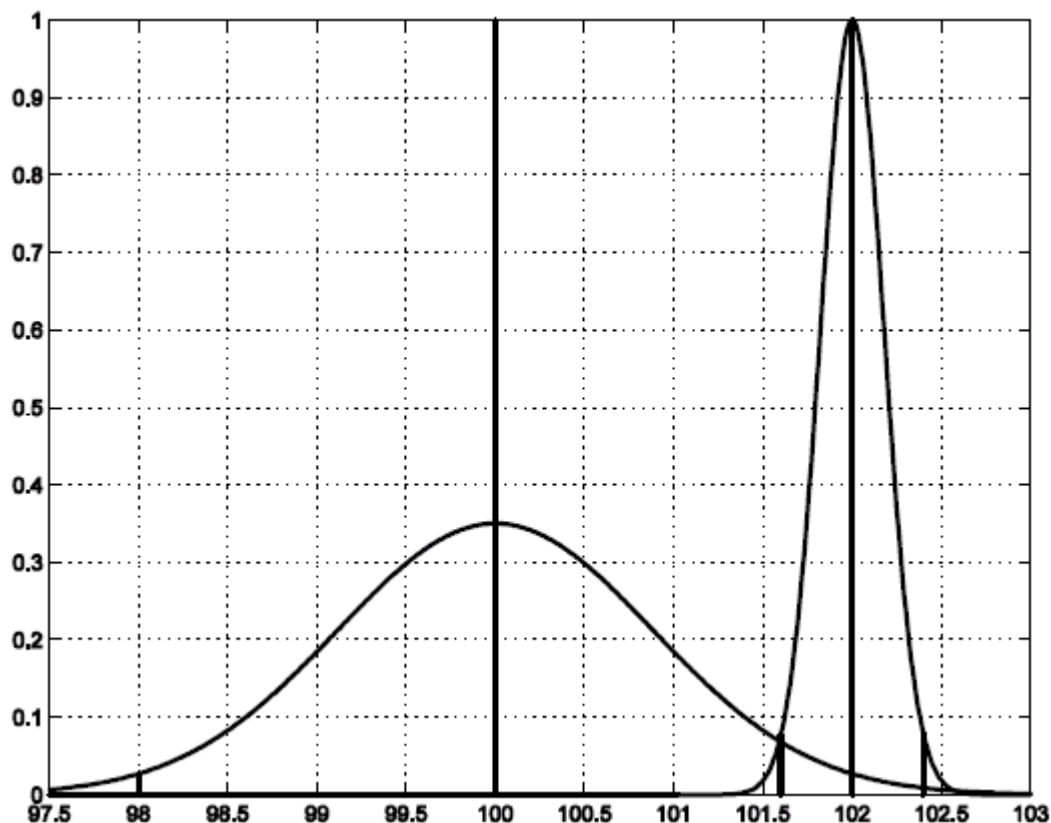
1.7 Suurin sallittu teho

**Kuva 11: Tehon vaihtelu tietyllä ajanjaksolla**

Suurin sallittu teho ja sen tarkkailu vaihtelee maittain. USA:ssa on säädetty suurimmaksi sallituksi tehon arvoksi 102 %. Tehoa tarkkaillaan kahdeksan tunnin jaksoissa, jolloin yhden jakson aikana teho voi vaihdella 100 %:n molemmin puolin, teho ei saa kuitenkaan ylittää 102 % missään vaiheessa. Teho saa kuitenkin olla lähellä 102 %:a enintään viidentoista minuutin jakson näiden kahdeksan tunnin aikana. Pienempiä tehonylityksiä saa myös esiintyä esimerkiksi 1 %:n ylitys kolmenkymmenen minuutin ajan, 0,5 %:n ylitys tunnin ajan ja niin edelleen. Kuvassa tämä teho on esitetty kuvaajan avulla. Teho voi tietyllä ajanjaksolla vaihdella 100 %:n ylä- ja alapuolella, mutta ei kuitenkaan milloinkaan ylitä suurinta sallittua tehoa. Myös keskiteho pysyy 100 %:n paikkeilla. NRC on yhdistänyt keskitehorajan ja suurimman sallitun tehon rajan ja tehnyt vielä rajoituksia siihen, kuinka kauan reaktoria voidaan käyttää suurimman sallitun tehon yläpuolella. Tästä näemme, että ydinvoimalaitoksen tehon määrittely, eri tehon termien määrittely sekä suurimman sallitun tehon ja keskitehon seuraaminen ja määrittely vaihtelevat maittain.

Kanadan CANDU-reaktoreilla taas on erilaiset tehonrajoitusvaatimukset. Jotkin reaktorit eivät koskaan saa ylittää 100 % tehoa, kun taas toisille on sallittu hetkellisesti käydä jopa 101 % teholla, kuitenkin ylittämättä 24-tunnin ajanjaksolla 100 %:n keskitehoa.

Seuraava kuva havainnollistaa mitä ruotsissa Forsmark 1-laitoksella on saattanut tapahtua tehonylitystapauksessa.

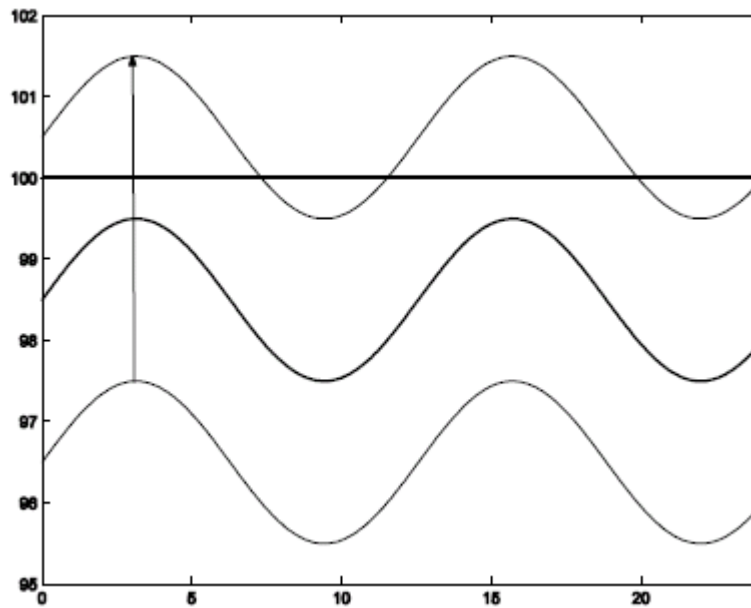


Kuva 12: Mahdollinen tapahtuma tehonylityksen yhteydessä kuvaajana

Y-akseli kuvaa tapahtuman todennäköisyyttä ja X-akseli kuvaa tehoa prosenteissa. Loivempi kaarre kuvaa tilannetta, jossa sivutaan lisensoitua tehoa mittausepävarmuudella 2 %:a, 95 %:n kaksinkertaisella epävarmuuskertoimella. Toinen kaarre kuvaa sitä tilannetta, joka Forsmark 1 - laitoksella on saattanut vallita. Kaarre on siirtynyt mittauksen systemaattisen virheen takia ja epävarmuus tehonmäärityksessä on pienentynyt (kaarre on tullut kapeammaksi), koska tracermittausten epävarmuus on pienempi, kuin normaalisti virtausmittauksessa ja siten mittaukseen sisältyvä epävarmuus pienenee.

Kuva 4 kuvaa tilannetta, jossa laitosta käytetään alle 100 %:n teholla, mutta tehonmääritykseen liittyvien epävarmuuksien ollessa suuret, teho voi yhtä hyvin ylittyä laitoksen käyttäjien tietämättä. Kaksi ulointa, ohuempaa käyrää kuvaavat rajoja 95 %:n kaksin-

kertaiselle epävarmuuskertoimelle, jos epävarmuus on 2 %:a. Jos tehonmääritykseen vaikuttaa tuntematon systemaattinen virhe, voi keskiteho nousta yli sallitun tehon.



Kuva 13: Laitosta käytetään alle 100 %:n teholla, mutta teho voi yhtä hyvin ylittyä, jos tehonmääritykseen sisältyy virhettä

1 LASKENTAOHJELMA CONDIN

Kirjoitettu Teollisuuden Voima Oy:n muistion Termisen tehon laskentaohjelma CONDIN - perusteella.

1.1 Funktiot

1.1.1 ”Water_enthalpy” laskee veden entalpian paineen ja lämpötilan funktiona

$$\Delta p = \text{paine} * 10^{-5} - 70$$

$$t = \text{lämpötila} * 10^{-2}$$

Jos $t \leq 1$ (lämpötila pienempi kuin $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) niin:

$$h70 = a[1] + t * (a[2] + t * (a[3] + t * a[4])) \quad (1.1)$$

muuten:

$$h70 = b[1] + t * (b[2] + t * (b[3] + t * (b[4] + t * (b[5] + t * b[6]))) \quad (1.2)$$

$$\Delta h \Delta p = c[1] + t * (c[2] + t * (c[3] + t * c[4])) \quad (1.3)$$

Water_enthalpy (paine, lämpötila) =

$$(h70 + \Delta h \Delta p * \Delta p) * 10^3 \quad (1.4)$$

$T < 100$

$$a(1) = 7.1$$

$$a(2) = 416.91$$

$$a(3) = -2.624$$

$$a(4) = 2.76$$

$T > 100$

$$b(1) = -41.88919$$

$$b(2) = 571.0046$$

$$b(3) = -191.8050$$

$$b(4) = 116.7698$$

$$b(5)=-34.08195$$

$$b(6)=4.153846$$

Aina käytössä:

$$c(1)=0.098$$

$$c(2)=-0.05702$$

$$c(3)=0.05045$$

$$c(4)=-0.01749$$

1.1.2 ”Steam_enthalpy” (J/kg) laskee höyryn entalpian paineen ja höyryn kosteuden funktiona

$$\Delta p = 70 - \text{paine} * 10^{-5}$$

$$r = 1506 + 6.4 * \Delta p$$

$$p = \text{paine} * 10^{-6}$$

Steam_enthalpy (paine, höyryn kosteus) =

$$\left(\begin{array}{l} 2790.52 + 0.074642 * p^3 - 2.54615 * p^2 \\ + 11.60056 * p - r * \text{höyrynkosteus} \end{array} \right) * 10^3 \quad (1.5)$$

1.1.3 Flow_correction

Funktio Flow_correction laskee korjauskertoimen jäähdytteen tai syöttöveden virtaukselle jos lämpötila poikkeaa nimellisestä lämpötilasta. Veden lämpötilariippuvuus saadaan taulukosta, joka pätee välillä 0-290⁰ C.

Lasketaan taulukon avulla tilavuuden vertailuarvo nimellisessä lämpötilassa Tilavuus (T_{ref}) ja mitatussa lämpötilassa Tilavuus (T_{act}).

Korjauskerroin saadaan seuraavasti:

$$Flow_correction(T_{ref}, T_{act}) = \sqrt{\frac{\text{tilavuus}(T_{ref})}{\text{tilavuus}(T_{act})}} \quad (1.6)$$

1.2 Muunnoksia luettuihin parametreihin

1.2.1 Höyryn kosteus

$$f_{moisture} = \frac{f_{moisture}}{100} \quad (1.7)$$

1.2.2 Vakio Q4

Lämpötelaskelmassa käytetty vakio, joka ilmoittaa reaktoriastian kuoren kautta häviävän tehon:

$$Q4 = Q4 * 10^6 \quad (1.8)$$

1.2.3 Maksimi sallittu ero lämpötelaskennalla ja APRM:llä saatujen tehojen välillä

$$f_{max-diff} = \frac{f_{max-diff}}{f_{q-nom}} * 100 \quad (1.9)$$

f_{q-nom} =Reaktorin nimellisteho

1.3 Laskettuja parametreja

1.3.1 Alempi sallittu ero lämpötelaskennalla ja APRM:llä saatujen termisten tehojen välillä

$$f_{low-diff} = 0.67 * f_{max-diff} \quad (1.10)$$

$f_{\max-diff}$ = Maksimi sallittu ero lämpötaselaskennalla ja APRM:llä saatujen tehojen välillä

1.3.2 Termisen tehon ylempi alaraja lämpötaselaskennalle

$$f_{th-high} = f_{th-low} + f_{th-low} * \frac{f_{dead-band}}{100} \quad (1.11)$$

f_{th-low} = Termisen tehon alempi alaraja lämpötaselaskennalle

$f_{dead-band}$ = Rajan ylimenoalue (% raja-arvosta) vaihdettaessa lämpötaseesta APRM:ään ja päinvastoin

1.3.3 Syöttövesivirtauksen ylempi alaraja lämpötaselaskennalle

$$f_{fw-high} = f_{fw-low} + f_{fw-low} * \frac{f_{dead-band}}{100} \quad (1.12)$$

f_{fw-low} = Syöttövesivirtauksen alempi alaraja lämpötaselaskennalle

$f_{dead-band}$ = Ylimenoalue (% raja-arvosta) vaihdettaessa lämpötaseesta APRM:ään ja päinvastoin

1.3.4 Ohivirtaussuhde

$$Q = \frac{APRM}{100} * (1 + f_{APRM-load-off}) - f_{APRM-load-off} \quad (1.13)$$

$$f = \frac{M_{hc-corr}}{f_{hc-max}} \quad (1.14)$$

$$S1 = f_{nom-bp} - 0.1525 + f * (0.4991 + f * ((-0.6094) + f * 0.243)) + 0.02 * Q \quad (1.15)$$

$$S2 = (-0.011) + f * 0.347 \quad (1.16)$$

jos $S2 < S1$ $f_{bp} = S2$

muuten $f_{bp} = S1$

f_{bp} = ohivirtaussuhde

APRM = APRM teho (%) APRM = Average Power Range Monitor

$M_{hc-corr}$ = Lämpötilakorjattu pääkiertovirtaus (kg/s)

$f_{APRM-load-off}$ = Termisen tehon korjaustekijä laskettaessa APRM-arvojen perusteella

(=0.0)

f_{hc-max} = Nimellinen maksimi pääkiertovirtaus (kg/s)

f_{nom-bp} = Nimellinen ohivirtaussuhde (täydellä teholla)

1.3.5 Mittapiste 521K013E

Mittapisteen 521K013E arvo NR_{hcpump} = yli 300 kierrosta minuutissa pyörivien pääkiertopumppujen lukumäärä.

1.3.6 Mittapiste 521K015E

Mittapisteen 521K015E arvo NR_{hcfly} = niiden yli 300 kierrosta minuutissa pyörivien pääkiertopumppujen lukumäärä joiden huimamassa on toiminnassa vähennettynä yhdellä.

1.3.7 Mittapiste 521K004E

Mittapisteen 521K004E arvo R_{hcpump} = lasketaan käynnissä olevien pääkiertopumppujen kierrosluvun keskiarvona:

$$R_{hcpump} = \frac{\sum_{i=1..6} (R_{pi})}{6} \quad (1.17)$$

R_{hcpump} = Pääkiertopumppujen keskimääräinen nopeus (rpm)

R_{pn} = Pääkiertopumpun Pn kierrosluku (rpm), n= 1...6

1.3.8 Reaktorin paine

$$P_{react-corr} = P_{react} + f_{p-corr} * 10^{-5} \quad (1.18)$$

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar)

p_{react} = Hienopaine (bar g)

f_{p-corr} = Paineen korjaus = 101300 Pa

1.3.9 Syöttöveden entalpia

$$H_{fw} = Water_enthalpy(P_{react-corr} * 10^{-5}, T_{fw}) * 10^{-3} \quad (1.19)$$

H_{fw} = Syöttöveden entalpia (kJ/kg)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

T_{fw} = Syöttöveden lämpötila ($^{\circ}$ C)

1.3.10 Syöttöveden virtaus

$$M_{fw-corr} = M_{fw} * Flow_correction(f_{T-fw-nom}, T_{fw}) \quad (1.20)$$

$M_{fw-corr}$ = Lämpötilakorjattu syöttövedenvirtaus (kg/s)

M_{fw} = Syöttöveden virtaus (kg/s)

T_{fw} = Syöttöveden lämpötila ($^{\circ}$ C)

$f_{T-fw-nom}$ = Syöttöveden nimellinen lämpötila ($^{\circ}$ C)

1.3.11 Jäähdytteen entalpia

$$H_{hc} = Water_enthalpy(P_{react-corr} * 10^5, T_{hc}) * 10^{-3} \quad (1.21)$$

H_{hc} = Jäähdytteen entalpia (kJ/kg)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

T_{hc} = Jäähdytteen lämpötila ($^{\circ}$ C)

1.3.12 Pääkiertovirtaus

$$M_{hc-corr} = M_{hc} * Flow_correction(f_{T-hc-nom}, T_{hc}) * \frac{(1 - f_{nom-bp})}{(1 - f_{bp})} \quad (1.22)$$

$M_{hc-corr}$ = Korjattu pääkiertovirtaus (kg/s)

M_{hc} = Pääkiertovirtaus (kg/s)

T_{hc} = Jäähdytteen lämpötila ($^{\circ}$ C)

$f_{T-hc-nom}$ = Pääkiertovirtauksen nimellinen lämpötila ($^{\circ}$ C)

f_{bp} = Ohivirtaussuhde

f_{nom-bp} = Nimellinen ohivirtaussuhde (täydellä teholla)

1.3.13 Ohivirtaus

$$M_{bp} = M_{hc-corr} * f_{bp} \quad (1.23)$$

M_{bp} = Ohivirtaus

$M_{hc-corr}$ = korjattu pääkiertovirtaus (kg/s)

f_{bp} = Ohivirtaussuhde

1.4 Terminen teho

Q_{MW} ja $Q_{\%}$ arvot lasketaan reaktorin lämpötaselaskelman avulla. Jos lämpötaselaskelma ei ole mahdollinen APRM:n avulla:

1.4.1 APRM

$$Q_{\%} = \left(\frac{APRM}{100} * (1 + f_{APRM-load-off}) - f_{APRM-load-off} \right) * 100 \quad (1.24)$$

$$Q_{MW} = \frac{Q_{\%}}{100} * f_{q-nom} \quad (1.25)$$

Q_{MW} = Reaktorin terminen teho (MW)

$Q_{\%}$ = Reaktorin terminen teho (%)

APRM = APRM teho (%)

f_{q-nom} = Reaktorin nimellisteho (MW)

$f_{APRM-load-off}$ = Termisen tehon korjaustekijä laskettaessa APRM-arvojen perusteella (=0.0)

1.4.2 Lämpötase

$$Q_{MW} = (Q1 + Q2 + Q3 + Q4 - Q5) * 10^{-6} \quad (1.26)$$

$$Q_{\%} = \frac{Q_{MW}}{f_{q-nom}} * 100 \quad (1.27)$$

Q_{MW} = Reaktorin terminen teho (MW)

$Q_{\%}$ = Reaktorin terminen teho (%)

$Q1$ = Turpiinille menevä teho (W)

$Q2$ = Häviöt säätösauvojen puhdistusvirtauksessa (W)

$Q3$ = Häviöt puhdistusvirtauksessa (W)

$Q4$ = Lämpötaselaskelmassa käytetty vakio, joka ilmoittaa reaktoriastian kuoren kautta häviävän tehon (W)

$Q5$ = Pääkiertopumpuilta tuleva teho (W)

f_{q-nom} = Reaktorin nimellisteho (MW)

1.4.3 Turbiinille menevä teho

$$Q1 = M_{fw-corr} * \left(\begin{array}{l} \text{Steam_enthalpy}(P_{react-corr} * 10^5, f_{moisture}) \\ - H_{fw} * 10^3 \end{array} \right) \quad (1.28)$$

$M_{fw-corr}$ = Lämpötilakorjattu syöttövedenvirtaus (kg/s)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

$f_{moisture}$ = Höyryn kosteus

H_{fw} = Syöttöveden entalpia (kJ/kg)

1.4.4 Häviöt säätösauvojen puhdistusvirtauksessa

$$Q2 = f_{M-crud} * \left(\begin{array}{l} \text{Water_enthalpy}(P_{react-corr} * 10^5, T_{cr}) \\ - \text{Water_enthalpy}(P_{react-corr} * 10^5, f_{T-crud}) \end{array} \right) \quad (1.29)$$

f_{M-crud} = Crudinpoistovirtaus (kg/s)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

T_{cr} = Lämpötila 321P1, P2 jälkeen (°C)

f_{T-crud} = Crudinpoistovirtauksen lämpötila (°C)

1.4.5 Häviöt puhdistusvirtauksessa

$$Q3 = (M_{clean} - f_{M-crud}) * \left(\begin{array}{l} \text{Water_enthalpy}(P_{react-corr} * 10^5, T_{cr}) \\ - \text{Water_enthalpy}(P_{react-corr} * 10^5, T_{clean}) \end{array} \right) \quad (1.30)$$

M_{clean} = 321-virtaus (kg/s)

f_{M-crud} = Crudinpoistovirtaus (kg/s)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

T_{cr} = Lämpötila 321P1, P2 jälkeen ($^{\circ}$ C)

T_{clean} = Lämpötila 321V30 jälkeen ($^{\circ}$ C)

1.4.6 Pääkiertopumpuilta tuleva teho

$$Q5 = M_{hc-corr} * \Delta P_{hc} * \frac{10^5}{(\rho_{hcpump} * \eta_{hcpump})} \quad (1.31)$$

$M_{hc-corr}$ = Korjattu pääkiertovirtaus(kg/s)

ΔP_{hc} = Pääkiertopumppujen paine-ero (bar)

ρ_{hcpump} = Veden tiheys pääkiertopumpuilla (kg/m^3)

η_{hcpump} = Pääkiertopumppujen hyötysuhde

1.4.7 Carry-Under (=reaktoriin palaavan jäädytteen höyryprosentti)

$$X_{cu} = \left(\frac{r * H_{hc} * 10^3 - M_{fw-corr} * H_{fw} * 10^3 + Q2 + Q3 - Q5}{Vapor_heat * (M_{hc-corr} - M_{fw-corr})} \right) * 100 \quad (1.32)$$

$$\frac{Satur_enth}{Vapor_heat}$$

$$Satur_enth = Steam_enthalpy(P_{react-corr} * 10^5, 1.0) \quad (1.33)$$

$$Vapor_heat = Steam_enthalpy(P_{react-corr} * 10^5, 0.0) - Satur_enth \quad (1.34)$$

X_{cu} = Carry-Under

$M_{hc-corr}$ = Korjattu pääkiertovirtaus(kg/s)

H_{hc} = Jäähdytteen entalpia (kJ/kg)

$M_{fw-corr}$ = Lämpötilakorjattu syöttövedenvirtaus (kg/s)

H_{fw} = Syöttöveden entalpia (kJ/kg)

$Q2$ = Häviöt säätösauvojen puhdistusvirtauksessa (W)

$Q3$ = Häviöt puhdistusvirtauksessa (W)

$Q5$ = Pääkiertopumpuilta tuleva teho (W)

Satur_enth = Kylläisen höyryn entalpia (kJ/kg)

Vapor_heat = Höyrystyslämpö (kJ/kg)

$P_{react-corr}$ = Korjattu reaktorin paine (bar g)

1.5 Hyötysuhteet

1.5.1 Turbiinin hyötysuhde

$$\eta_{turbin} = \frac{Q_{gentot}}{Q_{MW}} * 100 \quad (1.35)$$

η_{turbin} = Turbiinin hyötysuhde

Q_{gentot} = Generaattorin teho (MW)

$Q1$ = Turpiinille menevä teho (W)

1.5.2 Hyötysuhde brutto

$$\eta_{unitgross} = \frac{Q_{gentot}}{Q_{MW}} * 100 \quad (1.36)$$

$\eta_{unitgross}$ = Hyötysuhde brutto

Q_{gentot} = Generaattorin teho (MW)

Q_{MW} = Reaktorin terminen teho (MW)

1.5.3 Hyötysuhde netto

$$\eta_{\text{uminet}} = \frac{(-Q_{\text{aux1}}) - Q_{\text{aux2}}}{Q_{\text{MW}}} * 100 \quad (1.37)$$

η_{uminet} = hyötysuhde netto

Q_{aux1} = 613T101 omakäytön pätöteho (MW)

Q_{aux2} = 613T201 omakäytön pätöteho (MW)

Q_{MW} = Reaktorin terminen teho (MW)

1 CONDIN-OHJELMAN KÄYTTÄMIEN MITTAPISTEIDEN KALIBROINTI

1.1 Veden entalpian laskentaan käytetty paine ja lämpötila

1.1.1 211K101 Painelähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausavosta

$$X = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.02 + 0.02 + 0.01 + 0.01 + 0.02 \\ + 0.00 + 0.02 + 0.04 + 0.00 \end{array} \right) mA}{9} = 0.0155 mA \quad (1.1)$$

1.1.2 211K101 I/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.000 + 0.001 + 0.000 + 0.001)V}{5} = 0.0004V \quad (1.2)$$

1.1.3 211K101 Eristysvahvistin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.001 + 0.005 + 0.000 + 0.002 + 0.009)V}{5} = 0.0034V \quad (1.3)$$

1.1.4 211K102 Painelähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.09 + 0.02 + 0.03 + 0.04 + 0.04 \\ + 0.04 + 0.03 + 0.02 + 0.09 \end{array} \right) mA}{9} = 0.044 mA \quad (1.4)$$

1.1.5 211K102 I/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.001 + 0.000 + 0.002 + 0.001 + 0.003)V}{5} = 0.0014V \quad (1.5)$$

1.1.6 211K102 Eristysvahvistin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta ennen viritystä

$$X = \frac{(0.003 + 0.022 + 0.013 + 0.014 + 0.016)V}{5} = 0.0136V \quad (1.6)$$

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta virityksen jälkeen

$$X = \frac{(0.000 + 0.019 + 0.012 + 0.012 + 0.015)V}{5} = 0.0116V \quad (1.7)$$

1.1.7 211K103 Panielähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta ennen viritystä

$$\Delta x = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.06 + 0.10 + 0.11 + 0.09 + 0.07 \\ + 0.09 + 0.12 + 0.13 + 0.09 \end{array} \right) mA}{9} = 0.0777mA \quad (1.8)$$

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta virityksen jälkeen

$$X = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.01 + 0.05 + 0.04 + 0.01 + 0.03 \\ + 0.00 + 0.02 + 0.03 + 0.01 \end{array} \right) mA}{9} = 0.02mA \quad (1.9)$$

1.1.8 211K103 I/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.003 + 0.001 + 0.003 + 0.001)V}{5} = 0.0016V \quad (1.10)$$

1.1.9 211K103 Eristysvahvistin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.001 + 0.011 + 0.015 + 0.014)V}{5} = 0.041V \quad (1.11)$$

1.1.10 211K104 Painelähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.02 + 0.02 + 0.01 + 0.00 + 0.00 \\ + 0.00 + 0.01 + 0.02 + 0.02 \end{array} \right) mA}{9} = 0.011mA \quad (1.12)$$

1.1.11 211K104 I/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.005 + 0.003 + 0.003 + 0.001 + 0.002)V}{5} = 0.0028V \quad (1.13)$$

1.1.12 211K104 Eristysvahvistin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta ennen viritystä

$$X = \frac{(0.007 + 0.027 + 0.017 + 0.020 + 0.009)V}{5} = 0.016V \quad (1.14)$$

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta virityksen jälkeen

$$X = \frac{(0.000 + 0.016 + 0.004 + 0.005 + 0.009)V}{5} = 0.0068V \quad (1.15)$$

1.1.13 312K501 Lämpötilalähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.044 + 0.052 + 0.023 + 0.043)V}{5} = 0.0324V \quad (1.16)$$

1.1.14 312K501 U/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.001 + 0.002 + 0.003 + 0.004)V}{5} = 0.002V \quad (1.17)$$

1.1.15 312K502 Lämpötilalähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.000 + 0.049 + 0.061 + 0.037 + 0.024)V}{5} = 0.0342V \quad (1.18)$$

1.2 Syöttöveden virtaus

1.2.1 312K301 Virtauslähetin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.007 + 0.001 + 0.003 + 0.014 + 0.013 \\ + 0.014 + 0.005 + 0.003 + 0.002 \end{array} \right) mA}{9} = 0.0068mA \quad (1.19)$$

1.2.2 312K301 I/U-muunnin

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

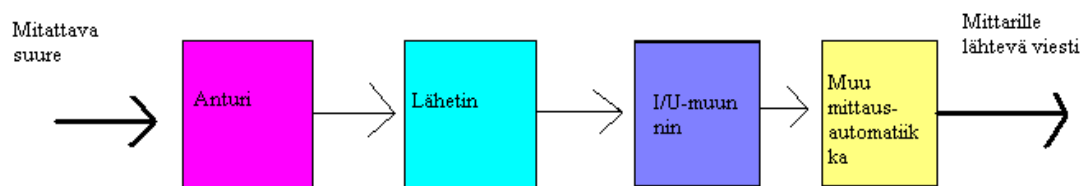
$$X = \frac{(0.002 + 0.001 + 0.001 + 0.001 + 0.001)V}{5} = 0.0012V \quad (1.20)$$

1.2.3 312K301 Juurtolaite

Keskimääräinen poikkeama mittausarvosta

$$X = \frac{(0.001 + 0.012 + 0.001 + 0.002 + 0.004 + 0.004)V}{6} = 0.0048V \quad (1.21)$$

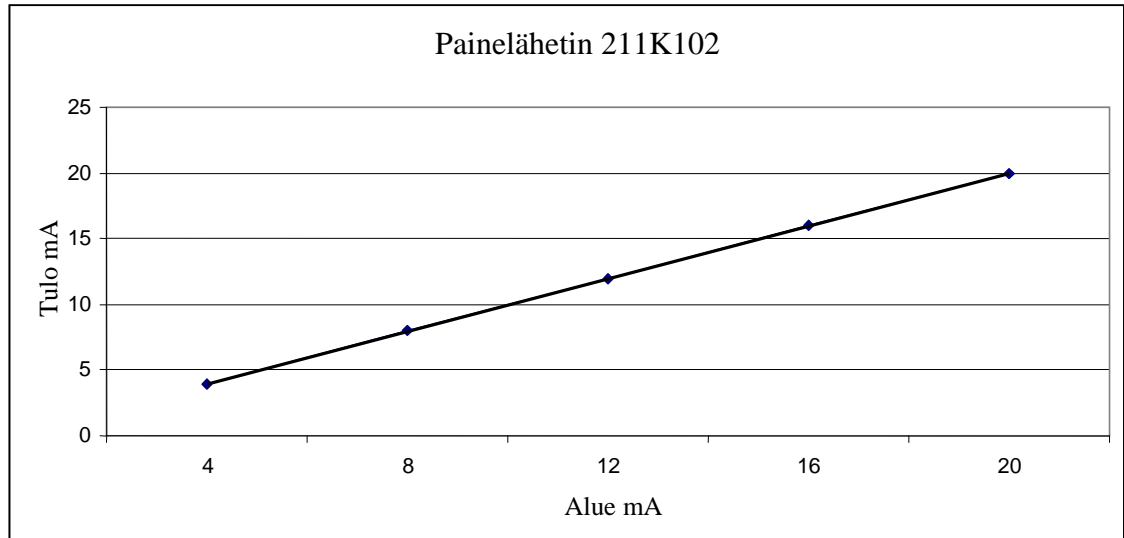
1.3 Yksinkertaistettu kuva mittausketjusta



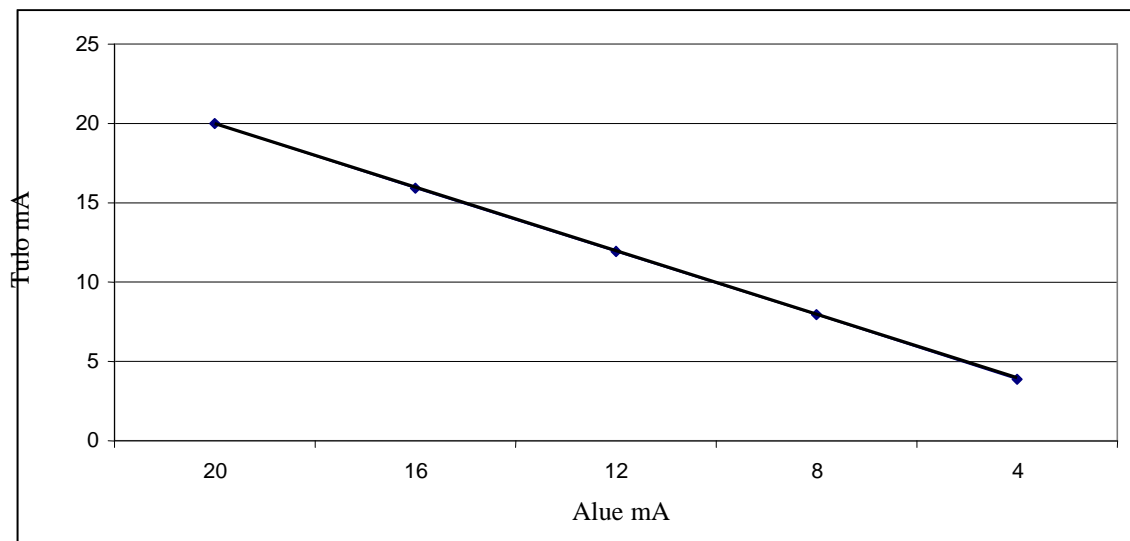
Kuva 14: Mittausketju

1 REGRESSIOANALYYSI MITTALAITTEILLE

1.1 Painelähetin 211K101



Kuvio 1. Painelähttimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.



Kuvio 2. Painelähttimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

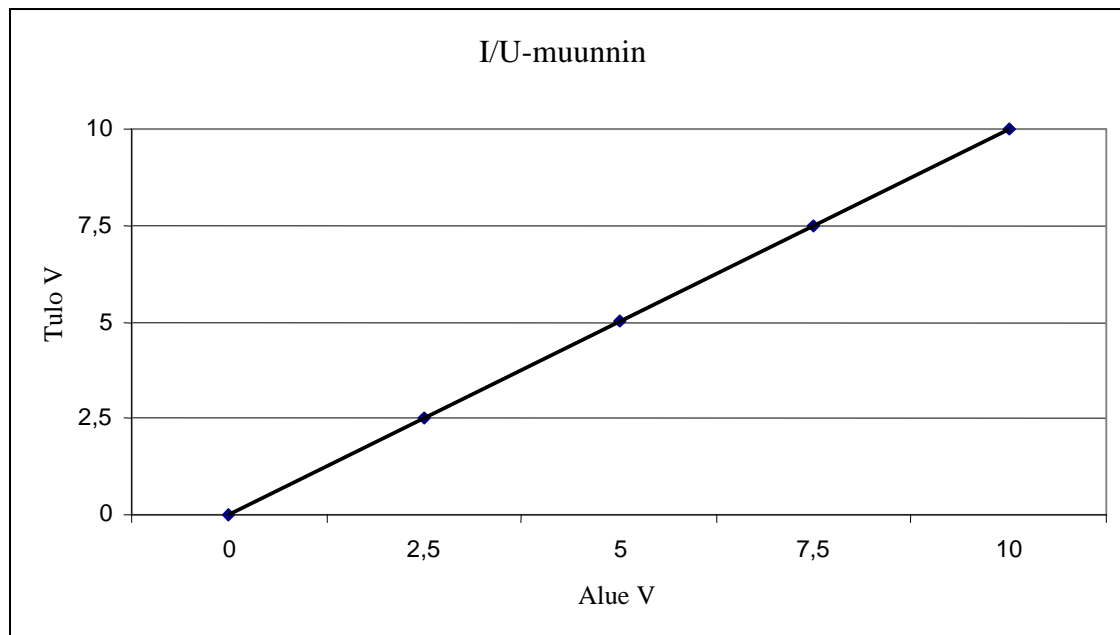
Regression Statistics	
Multiple R	0,999992903
R^2	0,999985807
Adjusted R^2	0,999981076
Standard Error	0,027568098
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,068	0,028913665	-2,351829177	0,100139352
X Variable 1	1,002	0,002179449	459,7491307	2,26935E-08

Regression Statistics	
Multiple R	0,999992903
R^2	0,999985807
Adjusted R^2	0,999981076
Standard Error	0,027568098
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,068	0,028913665	-2,351829177	0,100139352
X Variable 1	1,002	0,002179449	459,7491307	2,26935E-08

1.2 211K101 I/U-muunnin



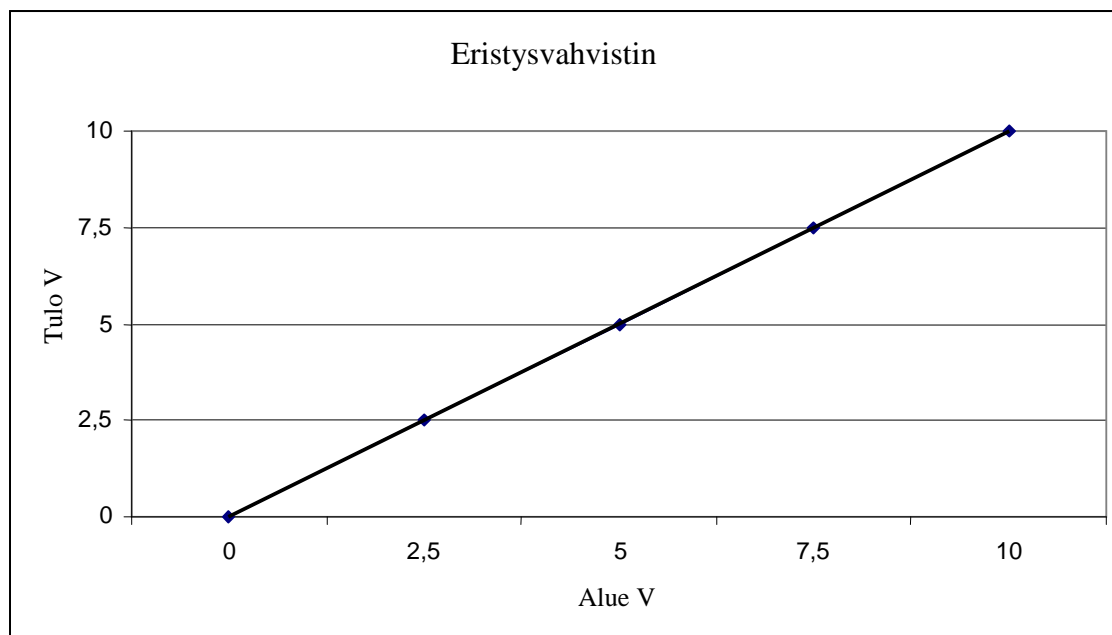
Kuvio 3. I/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999994
R^2	0,999999987
Adjusted R^2	0,999999983
Standard Error	0,000516398
Observations	5

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	62,5100004	62,5100004	234412501,5	6,14468E-13
Residual	3	8E-07	2,66667E-07		
Total	4	62,5100012			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	0,0004	0	1
X Variable 1	1,00008	6,53197E-05	15310,53564	6,14468E-13

1.3 211K101 Eristysvahvistin



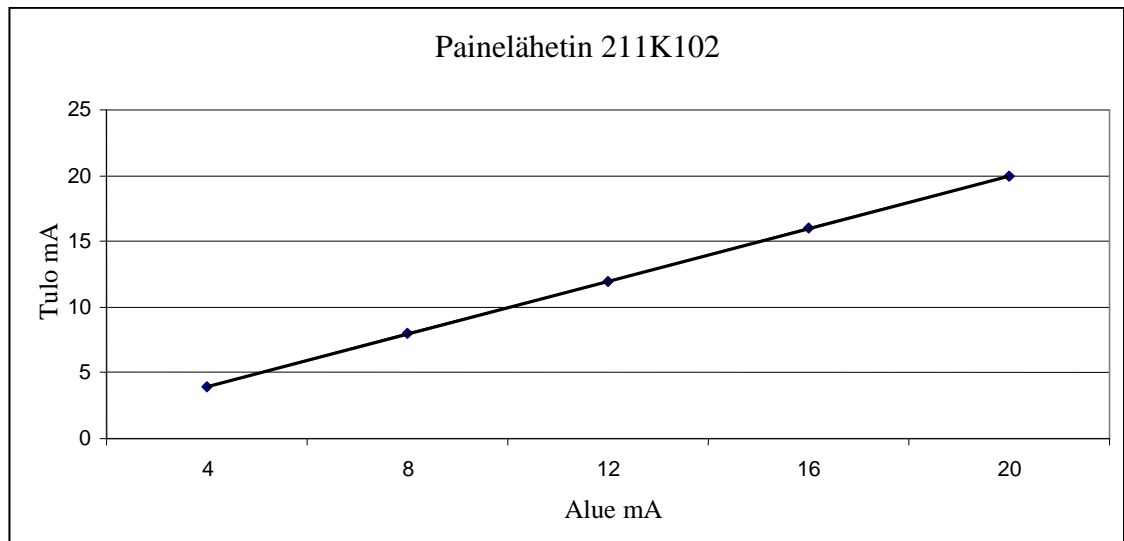
Kuvio 4. Eristysvahvistimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999703
R^2	0,999999406
Adjusted R^2	0,999999207
Standard Error	0,003516627
Observations	5

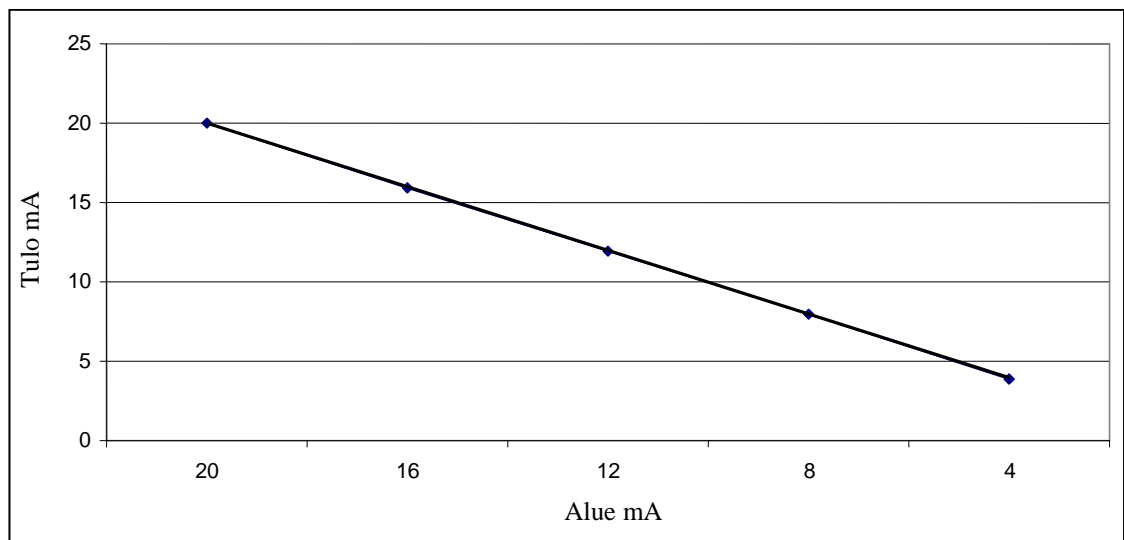
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	62,4150289	62,4150289	5047037,377	1,94498E-10
Residual	3	3,71E-05	1,23667E-05		
Total	4	62,415066			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0004	0,002723968	0,14684462	0,892567697
X Variable 1	0,99932	0,000444822	2246,561234	1,94498E-10

1.4 211K102 Painelähetin



Kuvio 5. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

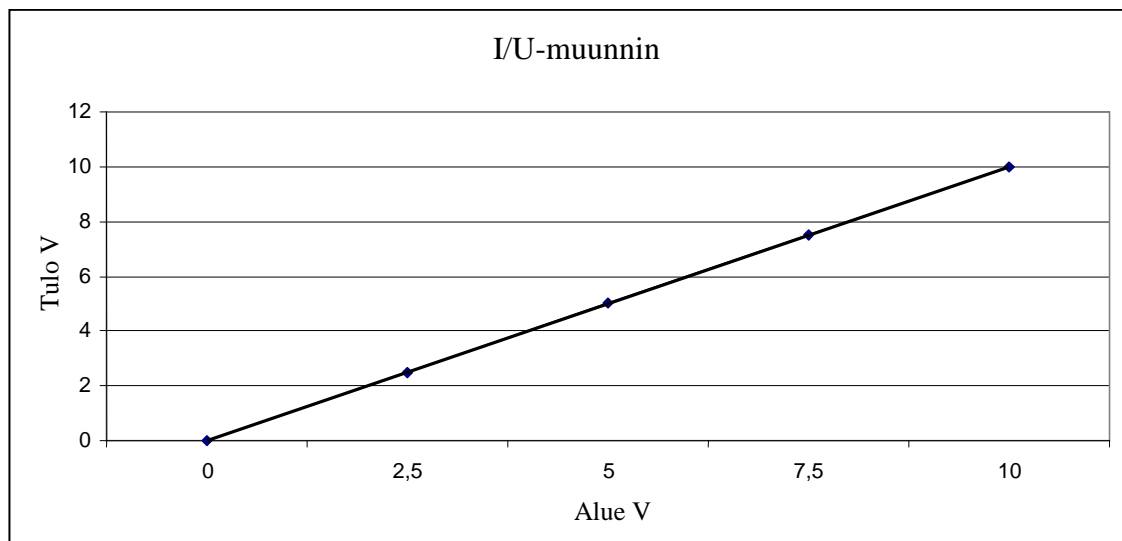


Kuvio 6. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999992903
R^2	0,999985807
Adjusted R^2	0,999981076
Standard Error	0,027568098
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,068	0,028913665	-2,351829177	0,100139352
X Variable 1	1,002	0,002179449	459,7491307	2,26935E-08

1.5 I/U-muunnin

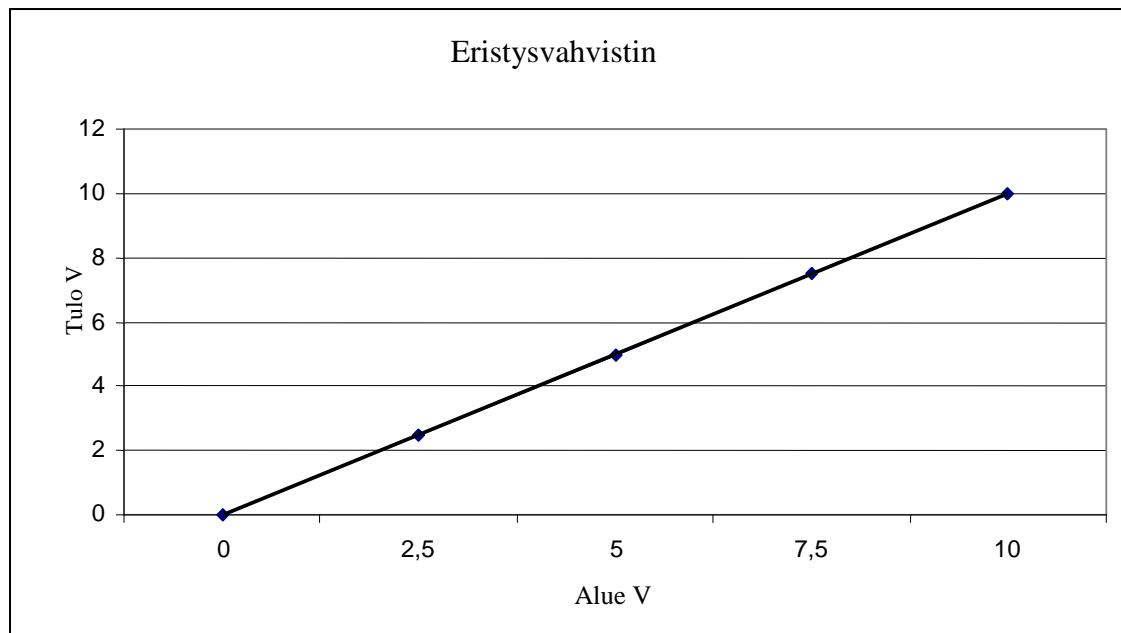


Kuvio 7. I/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999978
R^2	0,999999957
Adjusted R^2	0,999999942
Standard Error	0,000948683
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0004	0,000734847	0,544331054	0,624065195
X Variable 1	1,0002	0,00012	8335	3,8085E-12

1.6 211K102 Eristysvahvistin

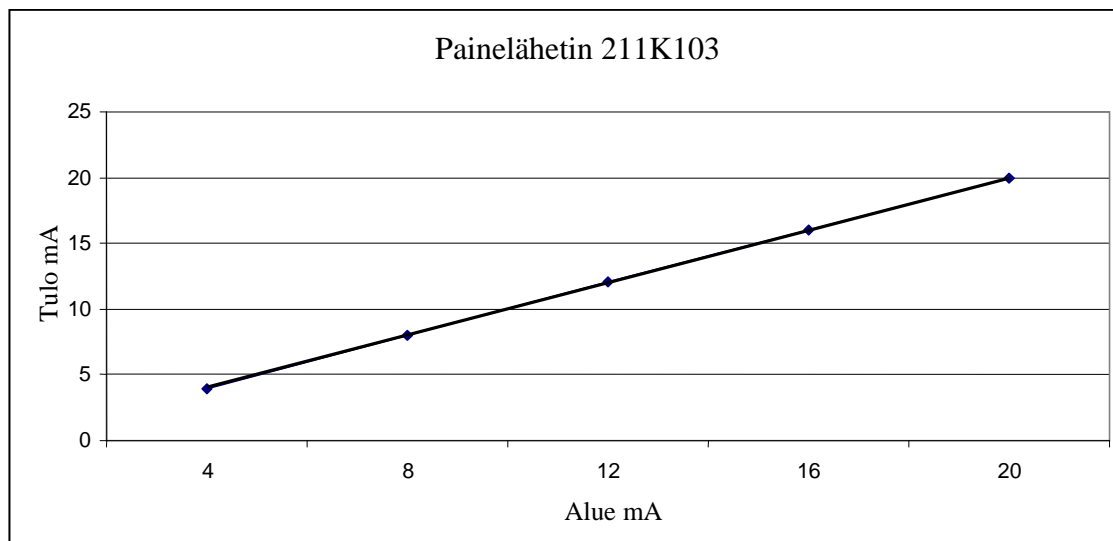


Kuvio 8. Eristysvahvistimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

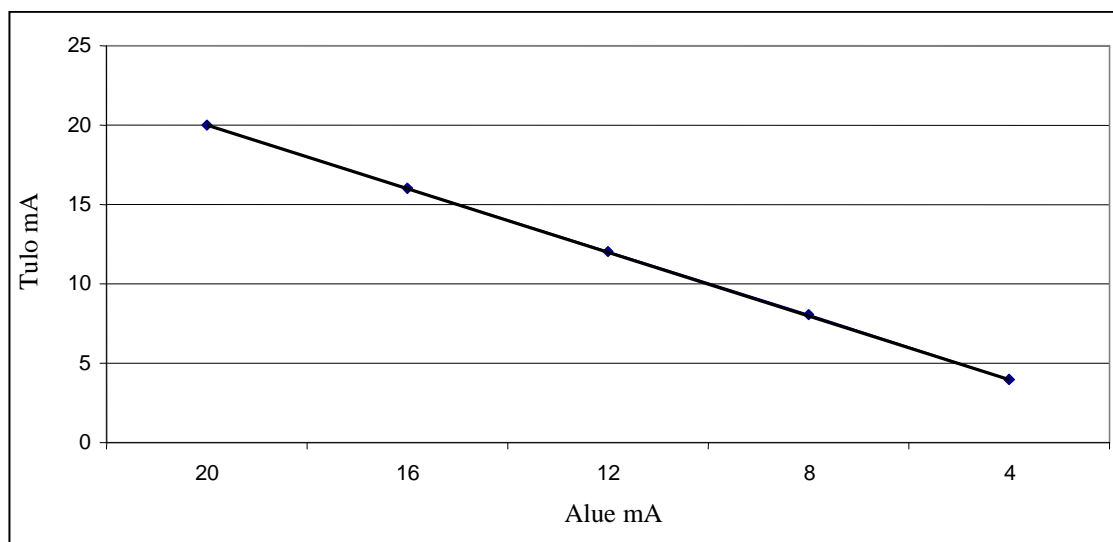
Regression Statistics	
Multiple R	0,999998811
R^2	0,999997623
Adjusted R^2	0,99999683
Standard Error	0,007030884
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,007	0,0054461	-1,285323555	0,288917936
X Variable 1	0,99908	0,000889344	1123,38941	1,55553E-09

1.7 211K103 Painelähetin



Kuvio 9. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.



Kuvio 10. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

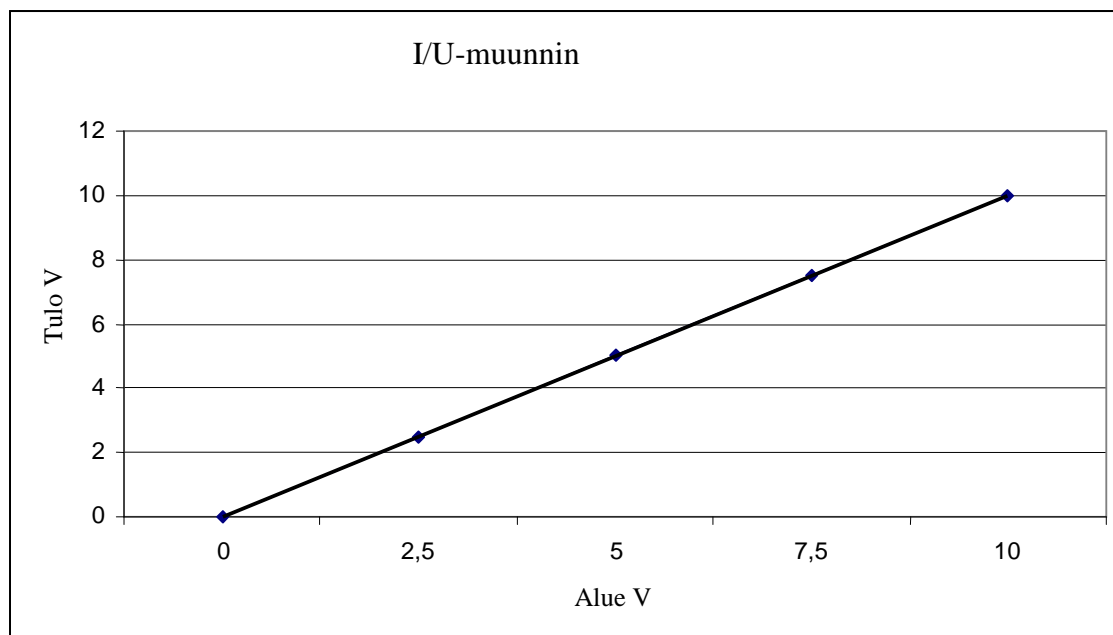
Regression Statistics	
Multiple R	0,999987952
R^2	0,999975904
Adjusted R^2	0,999967872
Standard Error	0,035777088
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,036	0,037523326	0,959403224	0,408131825
X Variable 1	0,998	0,002828427	352,8462838	5,01997E-08

Regression Statistics	
Multiple R	0,999994387
R^2	0,999988773
Adjusted R^2	0,999985031
Standard Error	0,024426761
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,023	0,025619003	0,897771068	0,435467974
X Variable 1	0,99825	0,001931105	516,9320055	1,59648E-08

1.8 211K103 I/U-muunnin

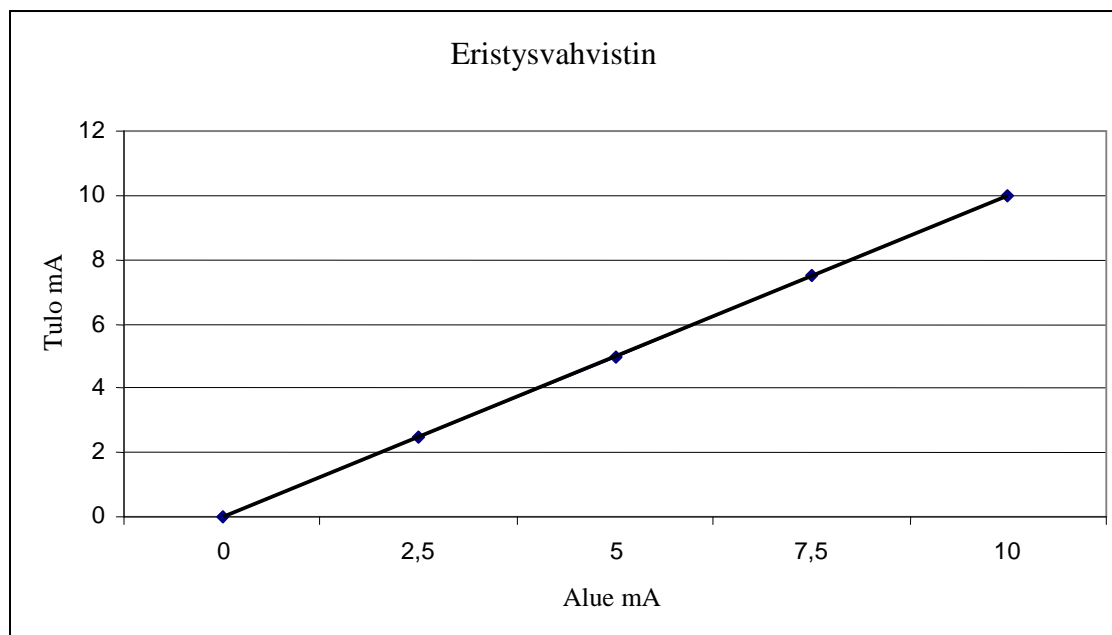


Kuvio 11. I/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999946
R^2	0,999999891
Adjusted R^2	0,999999855
Standard Error	0,001505545
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,0012	0,00116619	-1,028991511	0,379187241
X Variable 1	0,99992	0,000190438	5250,630231	1,52348E-11

1.9 Eristysvahvistin 211K103

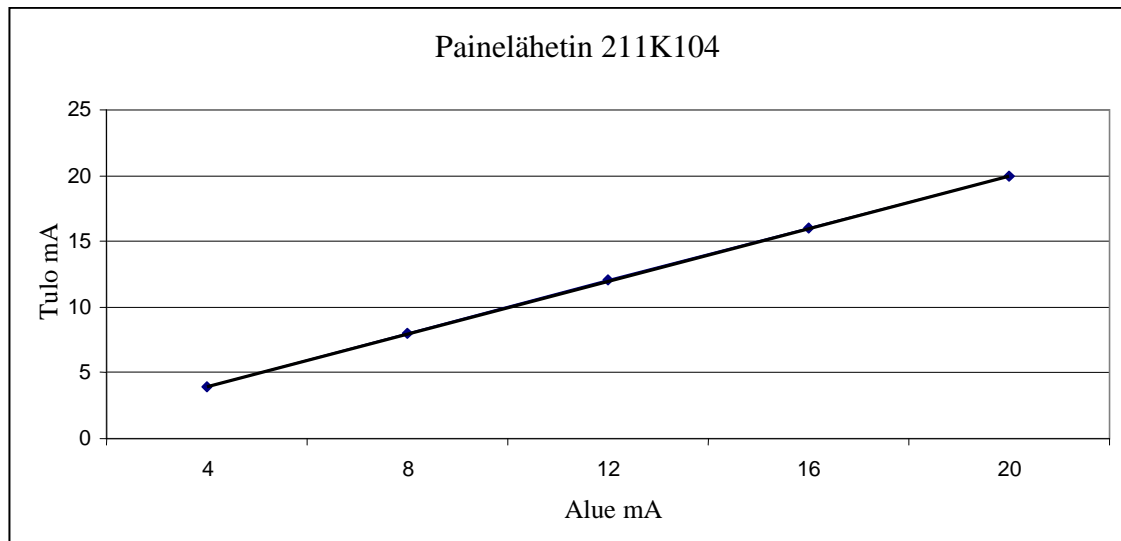


Kuvio 12. Eristysvahvistimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

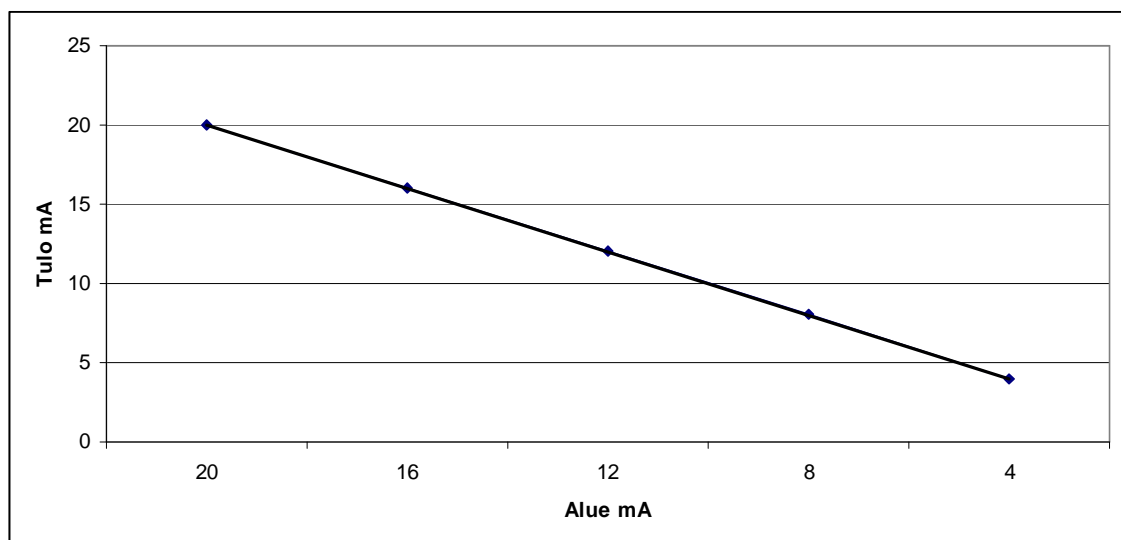
Regression Statistics	
Multiple R	0,999999756
R^2	0,999999512
Adjusted R^2	0,999999349
Standard Error	0,00318329
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0002	0,002465766	0,081110711	0,940462095
X Variable 1	0,99832	0,000402658	2479,325893	1,447E-10

1.10 Painelähetin 211K104



Kuvio 13. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

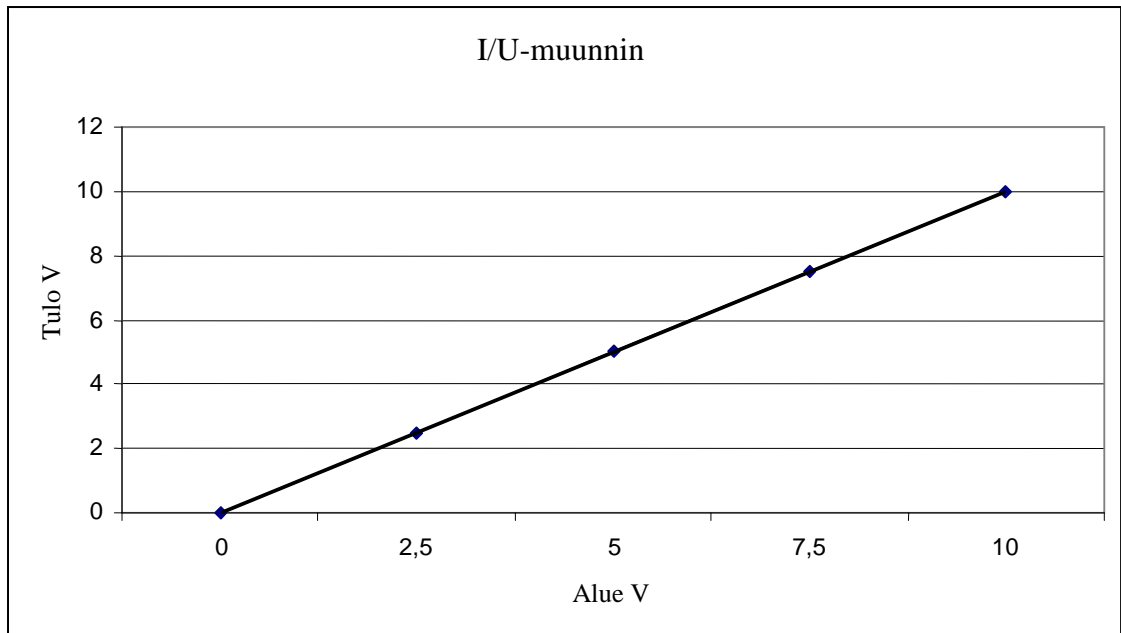


Kuvio 14. Painelähtetimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999997378
R^2	0,999994755
Adjusted R^2	0,999993007
Standard Error	0,016733201
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,004	0,017549929	-0,227921153	0,834358476
X Variable 1	1,0005	0,001322876	756,3069105	5,09769E-09

1.11 I/U-muunnin

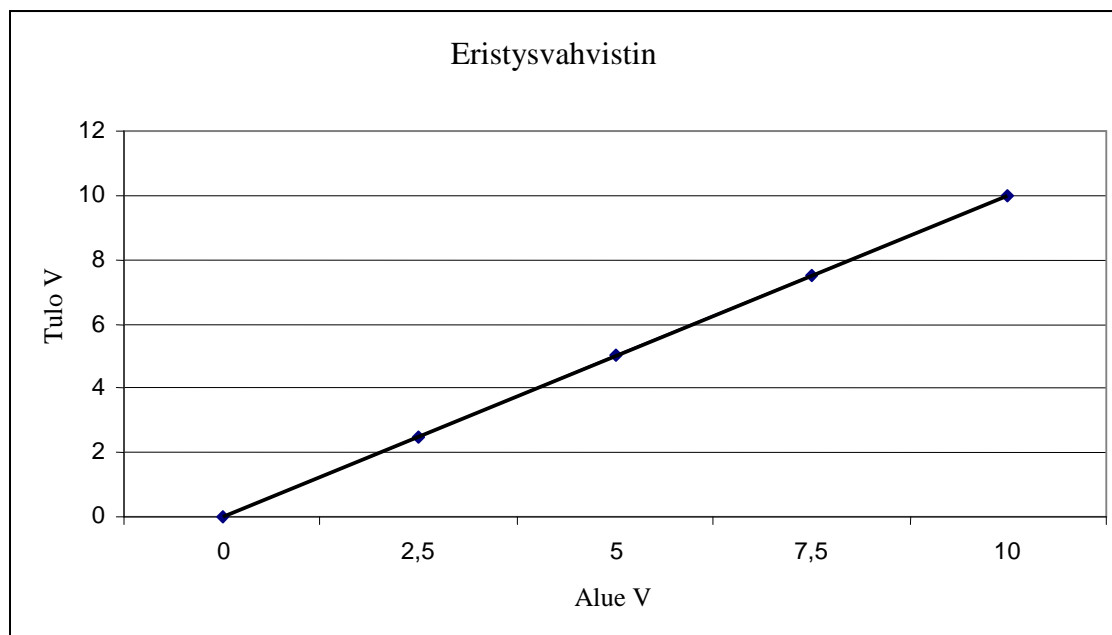


Kuvio 15. I/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999981
R^2	0,999999962
Adjusted R^2	0,999999949
Standard Error	0,000894427
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0044	0,00069282	6,350852961	0,007897838
X Variable 1	0,99968	0,000113137	8836,006338	3,19671E-12

1.12 Eristysvahvistin

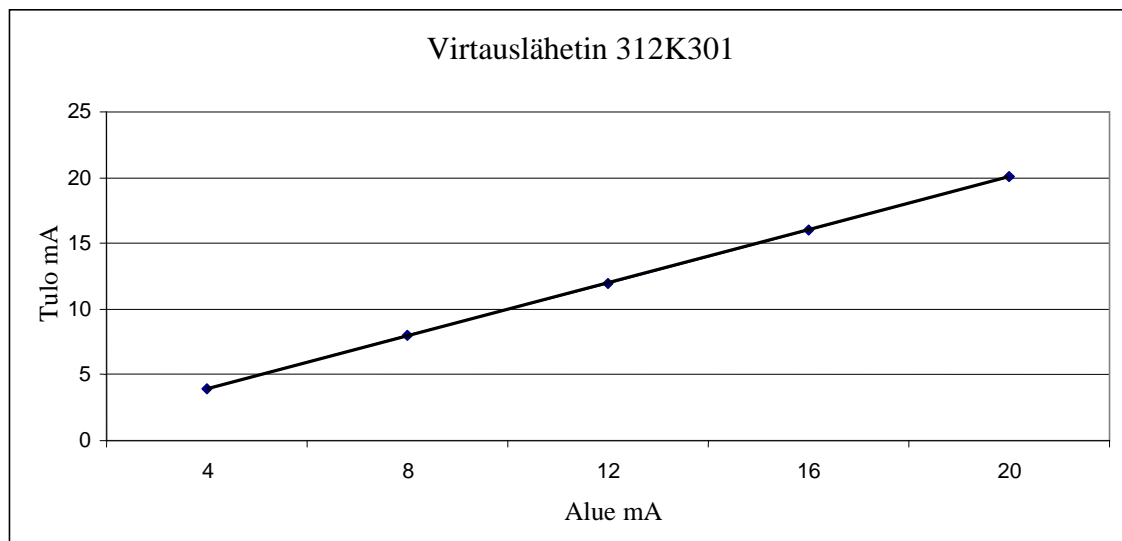


Kuvio 16. Eristysvahvistimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

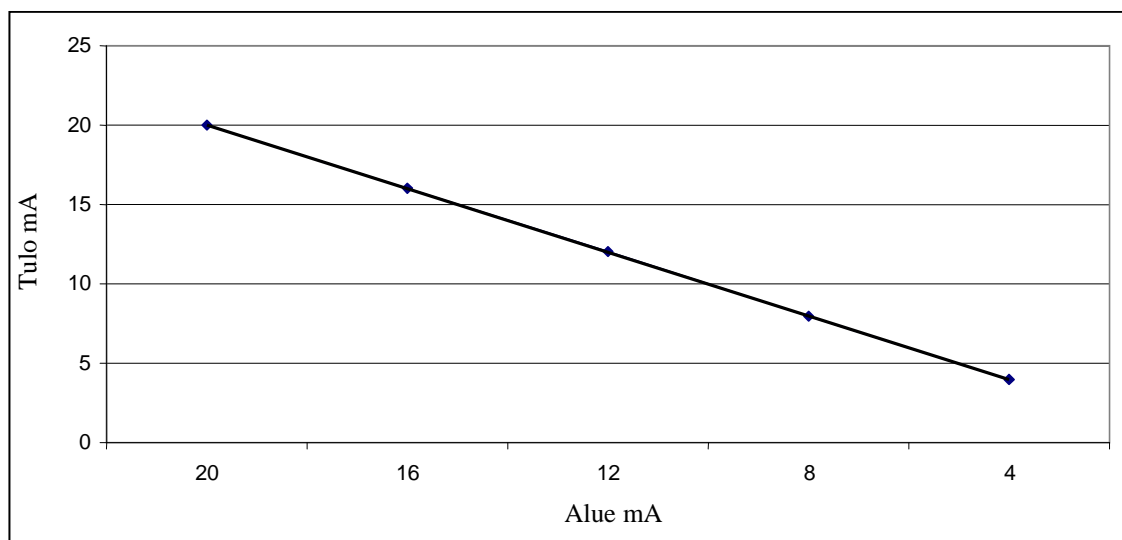
Regression Statistics	
Multiple R	0,999998063
R^2	0,999996126
Adjusted R^2	0,999994834
Standard Error	0,008994443
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,009	0,006967065	-1,291792098	0,286947527
X Variable 1	1,00116	0,001137717	879,9727781	3,23639E-09

1.13 Virtauslähetin 312K301



Kuvio 17. Virtauslähettimen tulo arvo koko mittausalueen funktiona.



Kuvio 18. Virtauslähettimen tulo arvo koko mittausalueen funktiona.

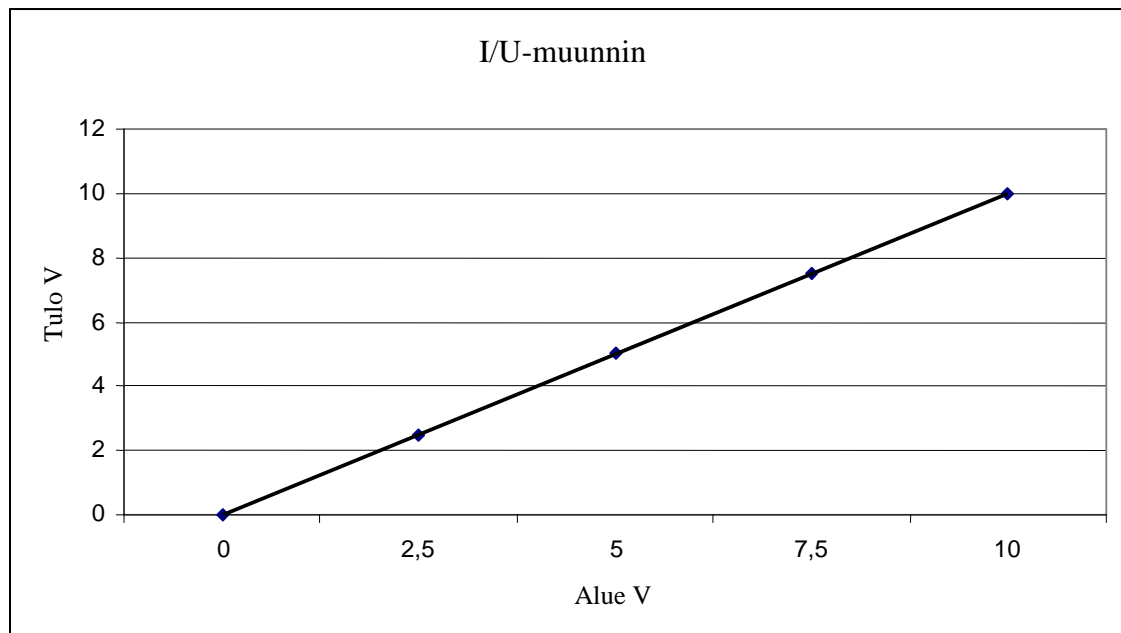
Regression Statistics	
Multiple R	0,999999913
R^2	0,999999826
Adjusted R^2	0,999999768
Standard Error	0,00304959
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,0111	0,003198437	-3,470444967	0,04033335
X Variable 1	1,001325	0,000241091	4153,302623	3,07815E-11

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999937
R^2	0,999999873
Adjusted R^2	0,999999831
Standard Error	0,002601282
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,0025	0,002728247	-0,916339219	0,427061556
X Variable 1	1,000825	0,000205649	4866,657073	1,91328E-11

1.14 I/U-muunnin

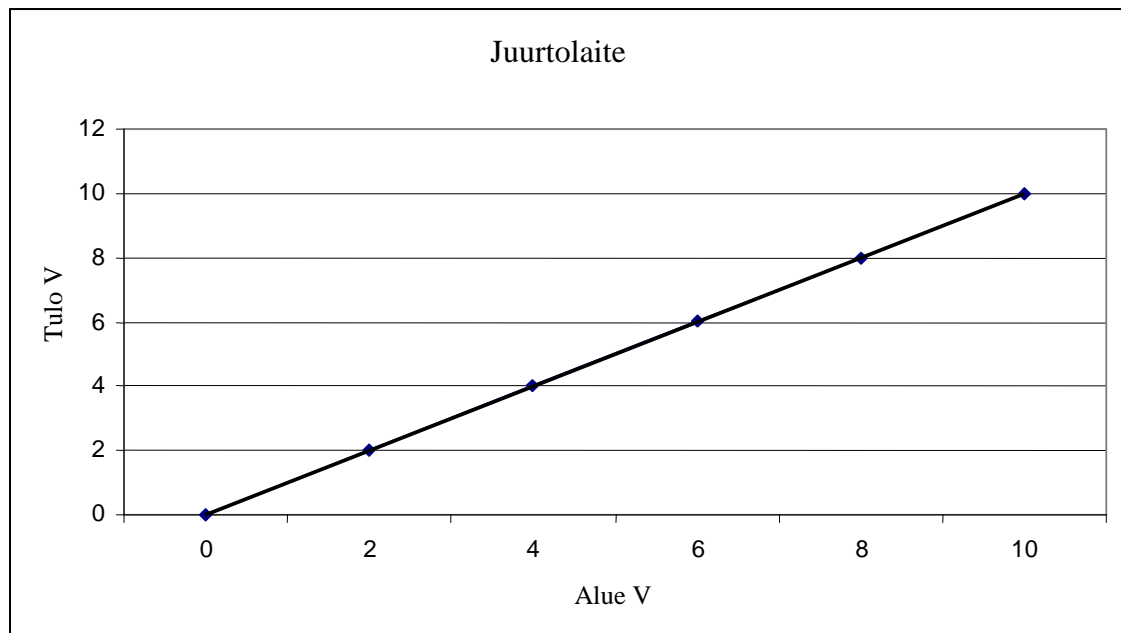


Kuvio 19. I/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999997
R^2	0,999999994
Adjusted R^2	0,999999991
Standard Error	0,000365148
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0016	0,000282843	5,65685425	0,010937657
X Variable 1	0,99992	4,6188E-05	21648,90304	2,17352E-13

1.15 Juurtolaite

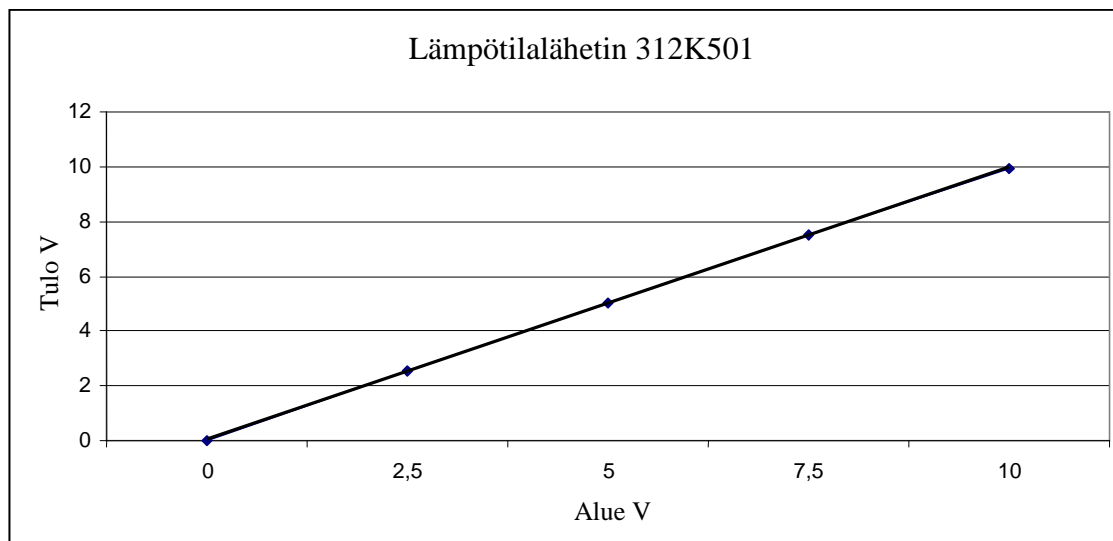


Kuvio 20. Juurtolaitteen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999999151
R^2	0,999998302
Adjusted R^2	0,999997877
Standard Error	0,005456756
Observations	6

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-0,005047619	0,00394931	-1,278101393	0,270342528
X Variable 1	1,000942857	0,000652207	1534,700865	1,08157E-12

1.16 312K501 Lämpötilalähetin

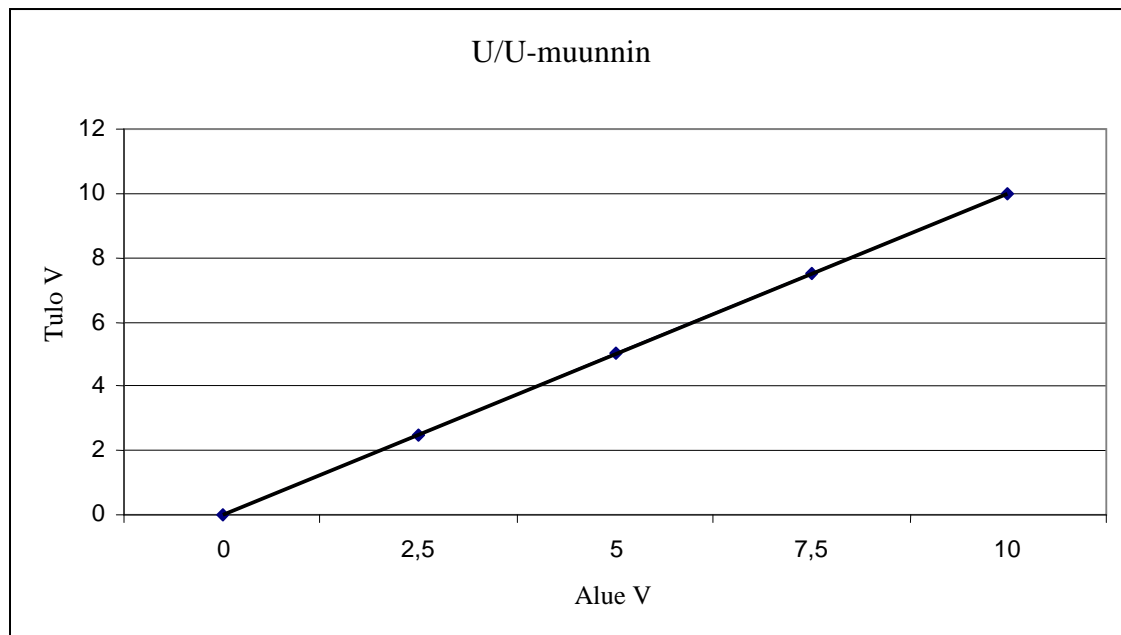


Kuvio 21. Lämpötilalähettimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999961934
R^2	0,999923869
Adjusted R^2	0,999898492
Standard Error	0,039656441
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0366	0,030717747	1,191493622	0,319130038
X Variable 1	0,99572	0,005016187	198,5013665	2,8193E-07

1.17 312K501 U/U-muunnin

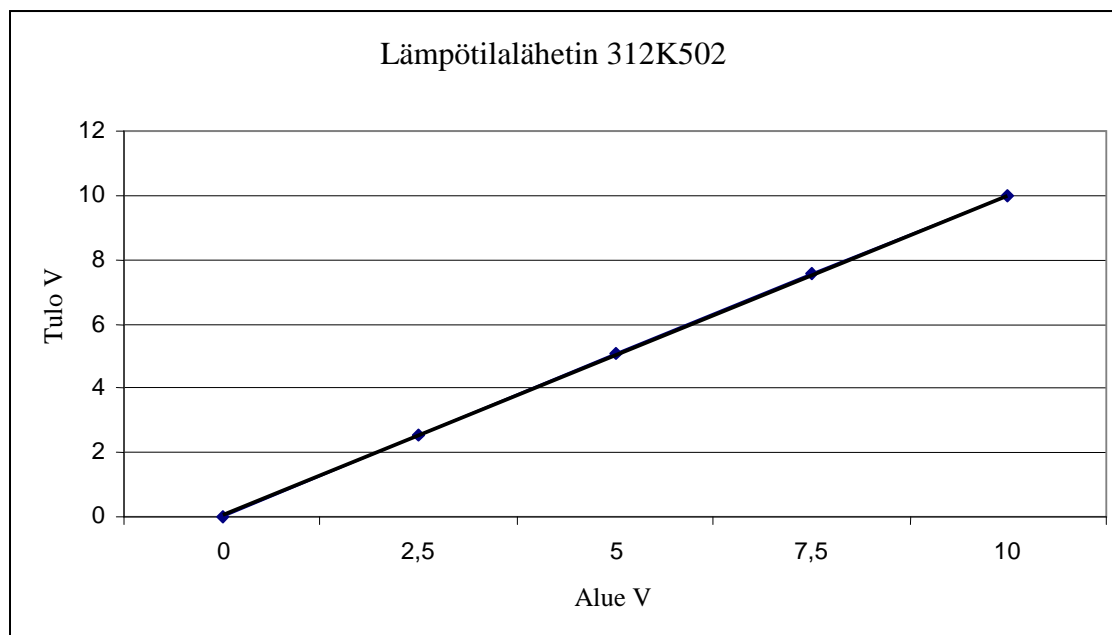


Kuvio 22. U/U-muuntimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	1
R^2	1
Adjusted R^2	1
Standard Error	1,90518E-15
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-2,27374E-15	1,47575E-15	-1,540737967	0,221029763
X Variable 1	0,9996	2,40988E-16	4,14792E+15	3,09015E-47

1.18 312K502 Lämpötilalähetin



Kuvio 23. Lämpötilalähettimen tulon arvo koko mittausalueen funktiona.

Regression Statistics	
Multiple R	0,999962372
R^2	0,999924746
Adjusted R^2	0,999899661
Standard Error	0,039501899
Observations	5

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0,0366	0,030598039	1,196155081	0,317555166
X Variable 1	0,9976	0,004996639	199,6542127	2,77074E-07

1 REGRESSIOANALYYSIN LASKEMIEN ARVOJEN SELITYKSET:

1.1 T-testi

Testin tuloksena jokaiselle selittävälle muuttujalle saadaan t-arvo, jonka suuruus ratkaisee sen, voidaanko muuttujan kerrointa pitää nollaa suurempana tilastollisten kriteerien mukaan.

1.2 Korrelaatiokerroin R^2

Käytetään myös nimitystä Pearsonin korrelaatiokerroin. Arvioi muuttujien vaikuttavuutta toisiinsa. Kertoimen arvo on 0–1. Jos arvo on 1, otoksen korrelaatio on täydellinen eli lasketut ja todelliset y-arvot ovat täsmälleen samat. Jos arvo on 0, y-arvoja ei voi laskea regressioyhtälöstä.

1.3 Selitysaste R^2

Kertoo, millä todennäköisyydellä toisen muuttujan arvo on pääteltävissä toisesta. Korjattu R^2 -luku ottaa huomioon mallin sisältämien selittävien muuttujien lukumäärän. Se on arvoltaan aina pienempi tai yhtä suuri kuin varsinainen R^2 -luku. Korjaus R^2 -lukuun tarvitaan sen vuoksi, että uusien selittävien muuttujien lisääminen regressioanalyysiin nostaa aina R^2 -lukua, vaikka nämä lisätyt muuttujat eivät todellisuudessa pystyisikään lisäämään selityskykyä. Silloin kun tarkasteltavana on vain yksi regressiomalli, ei korjatun R^2 -luvun käyttäminen ole tarpeellista, mutta regressiomalleja verratessa siitä on hyötyä.

1.4 Kesquivirhe

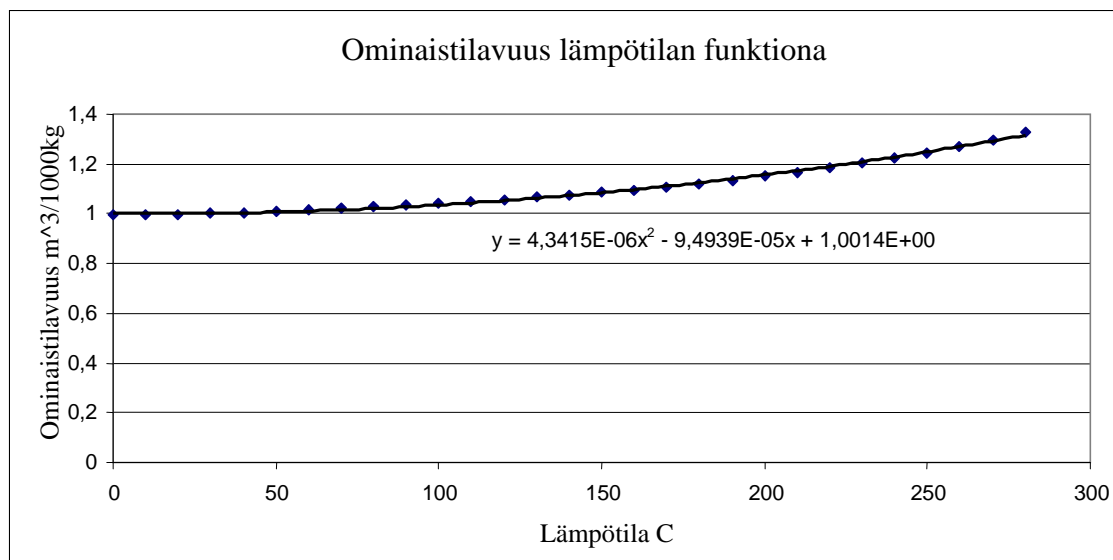
Yksittäisten havaintojen etäisyys regressiosuorasta.

1.5 df

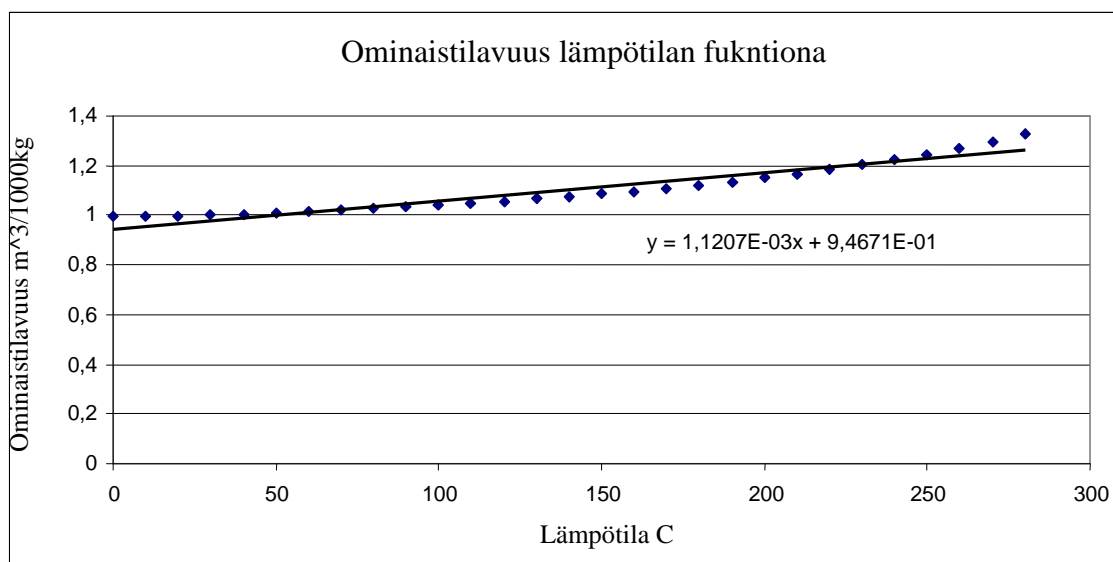
Vapausasteet. Vapausasteiden avulla löydetään F-arvoissa käytettävät merkitsevyysrajat taulukkokirjojen taulukosta.

1 OMINAISTILAVUUS LÄMPÖTILAN FUNKTIONA EXCELILLÄ

1.1 Taulukkokirjan arvojen mukaan tehtynä:

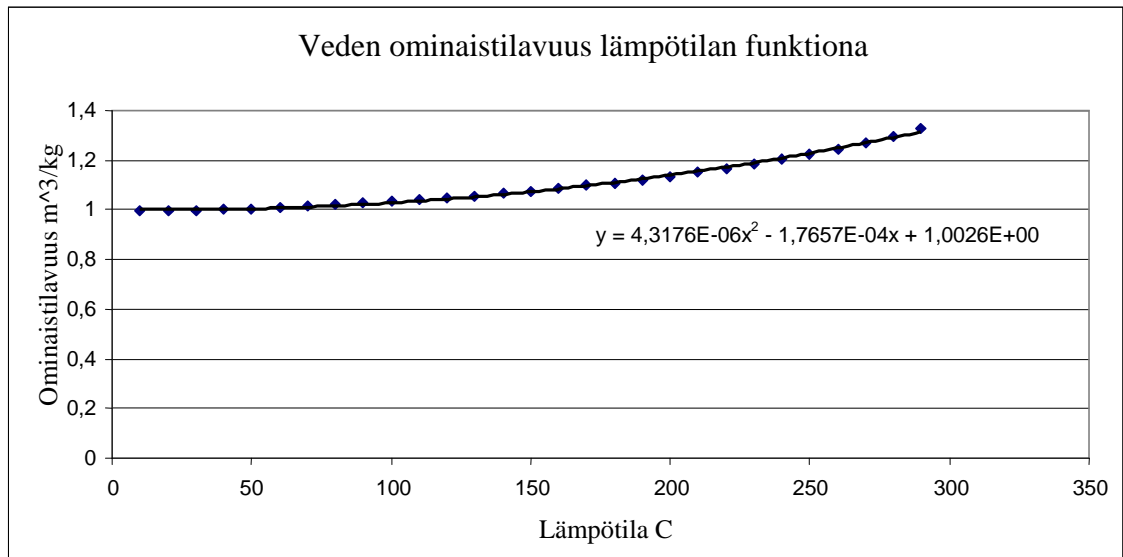


Kuvio 1. Ominaistilavuus lämpötilan funktiona taulukkokirjan:n arvojen mukaan.



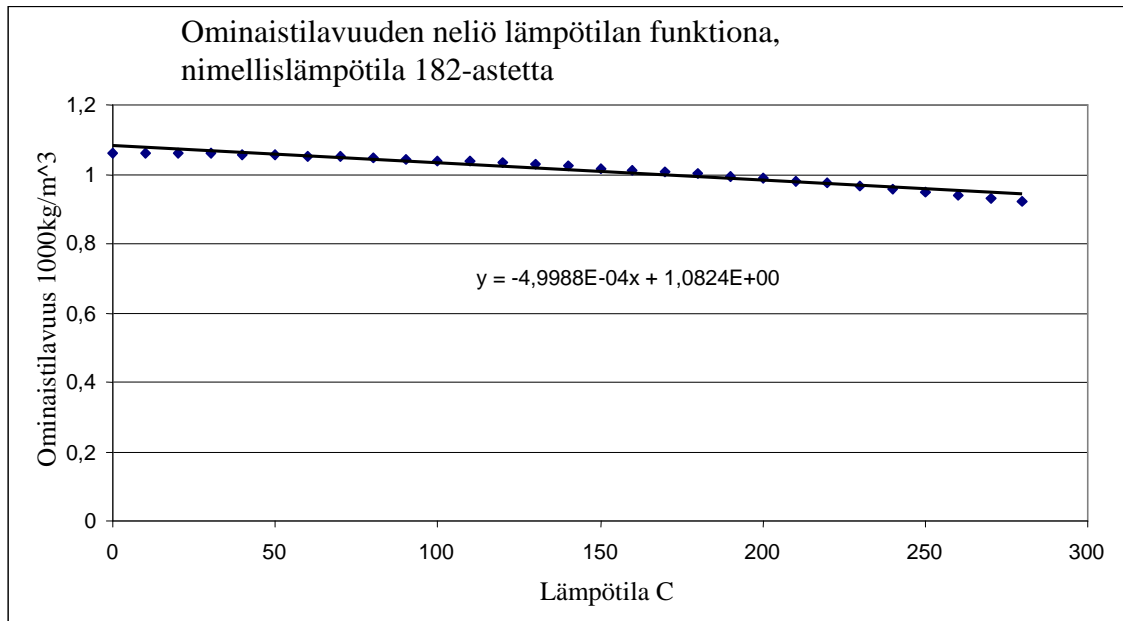
Kuvio 2. Ominaistilavuus lämpötilan funktiona taulukkokirjan:n arvojen mukaan.

1.2 Nykyisin käytössä olevien arvojen mukaan tehtynä:

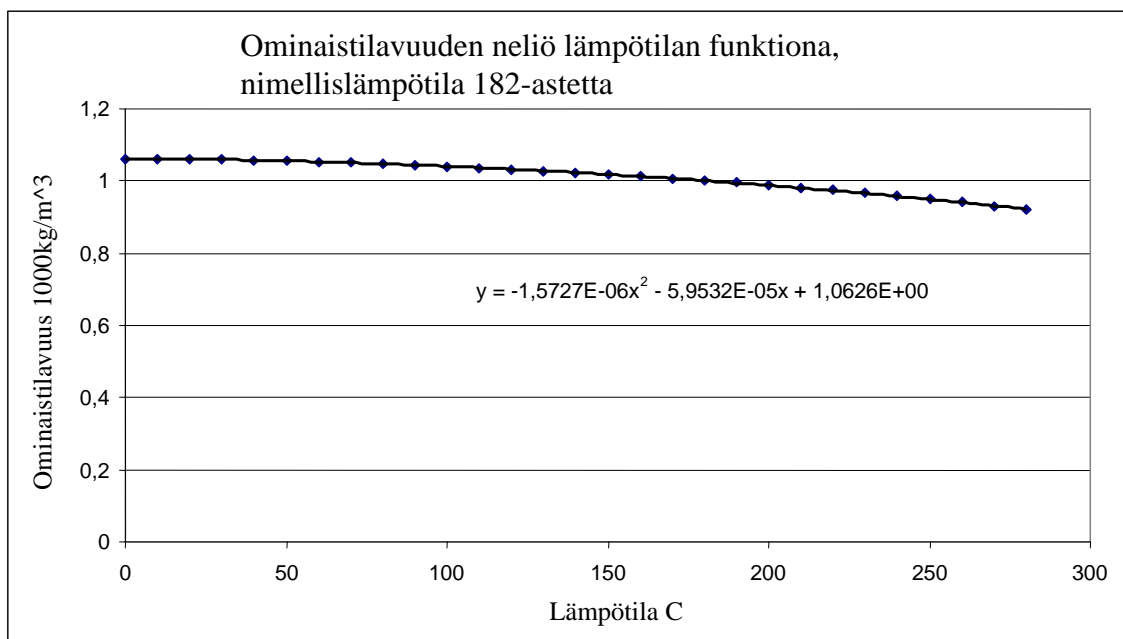


Kuvio 3. Ominaisilavuus lämpötilan funktiona TVO:n arvojen mukaan.

1 OMINAISTILAVUUDEN NELIÖJUURET, NIMELLISLÄMPÖTILA 182⁰C



Kuvio 1. Ominaisilavuuden neliö lämpötilan funktiona, nimellislämpötila 182⁰C



Kuvio 2. Ominaisilavuuden neliö lämpötilan funktiona, nimellislämpötila 182⁰C

Regressioanalyysi:

Regression Statistics	
Korrelaatiokerroin R	0,97325617
Selitysaste R^2	0,947227572
Sovitettu R^2	0,945273037
Keskivirhe	0,010230723
Havainnot	29

	Kertoimet	Keskivirhe	t Stat	P-arvo
Omin. til.	1,082404498	0,003703387	292,274177	8,46287E-49
Lämpötila	-0,000499878	2,27069E-05	-22,01433183	8,8242E-19

1 CONDININ KÄYTTÄMIEN KAAVOJEN VIRHELASKENTA

1.1 Water_enthalpy

Funktio "Water_enthalpy" laskee veden entalpiain **paineen** (Pa) ja **lämpötilan** (°C) funktiona seuraavasti:

```

dp = paine * 10-5 - 70.0
t  = lämpötila * 10-2

Jos ( t <= 1.0 ) niin
  h70 = a[1] + t*(a[2] + t*(a[3] + t*a[4] ))
muuten
  h70 = b[1] + t*(b[2] + t*(b[3] + t*(b[4] + t*(b[5] +
    t*b[6] ))))

dhdp = c[1] + t*(c[2] + t*(c[3] + t*c[4] ))

Water_enthalpy(paine, lämpötila) =
    ( h70 + dhdp * dp ) * 103

```

.....



3.7 SYÖTTÖVEDEN ENTALPIA

Mittapisteen 521K006E arvo (=H_{fw}) lasketaan reaktorin paineen ja syöttöveden lämpötilan funktiona .

$$H_{fw} = \text{Water_enthalpy}(P_{\text{react-corr}} * 10^5, T_{fw}) * 10^{-3}$$

missä

H_{fw} Syöttöveden entalpia (kJ/kg)

 P_{react-corr} Reaktorin paine, korjattu (bar g)
 T_{fw} Syöttöveden lämpötila (°C)

$$paine = 70.013 * 10^5 = 7001300$$

$$\Delta p = 70.013 - 70 = 0.013$$

$$t = 183.4 * 10^{-2} = 1.834$$

Water_enthalpy =

$$\begin{aligned}
 & (h70 + \Delta h \Delta p * \Delta p) * 10^3 \\
 & = \left(\begin{aligned} & b[1] + b[2]t + b[3]t^2 + b[4]t^3 + b[5]t^4 + b[6]t^5 \\ & + (c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3) * \Delta p \end{aligned} \right) * 10^3 \\
 & = \left(\begin{aligned} & (-41.88919) + 571.0046 * 1.834 + (-191.805) * 1.834^2 \\ & + 116.7698 * 1.834^3 + (-34.08195) * 1.834^4 \\ & + 4.153846 * 1.834^5 \\ & + \left(\begin{aligned} & 0.098 + (-0.05702) * 1.834 \\ & + 0.05045 * 1.834^2 + (-0.01749) * 1.834^3 \end{aligned} \right) * \Delta p \end{aligned} \right) * 10^3 \\
 & = 781.11306 + 0.15297 * 0.013 = 781.11504 * 10^3 \tag{1.1}
 \end{aligned}$$

$\frac{\partial \text{Water_enthalpy}}{\partial t} * \Delta t =$

$$\begin{aligned}
 & \left(\left(\begin{aligned} & b[2] + 2 * b[3]t + 3 * b[4]t^2 + 4 * b[5]t^3 + 5 * b[6]t^4 \\ & + c[2]\Delta p + 2 * c[3]t\Delta p + 3 * c[4]t^2\Delta p \end{aligned} \right) * 10^3 \right) * \Delta t \\
 & = \left(\left(\begin{aligned} & 571.0046 + 2 * (-191.8050) * 1.834 \\ & + 3 * 116.7698 * 1.834^2 + 4 * (-34.08195) * 1.834^3 \\ & + 5 * 4.153846 * 1.834^4 + (-0.05702) * 0.013 \\ & + 2 * 0.05045 * 1.834 * 0.013 \\ & + 3 * (-0.01749) * 1.834^2 * 0.013 \end{aligned} \right) * 10^3 \right) * \Delta t \\
 & = \left(\left(\begin{aligned} & 571.0046 + (-703.54074) + 1178.28528 \\ & + (-840.973711) + 234.97286 + (-0.00074126) \\ & + 0.0024056 + (-0.0022943) \end{aligned} \right) * 10^3 \right) * \Delta t
 \end{aligned}$$

$$= (439.7476 * 10^3) * 0.5195 * 10^{-2} = 2.28448 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \text{Water_enthalpy}}{\partial p} =$$

$$((c[1] + c[2]t + c[3]t^2 + c[4]t^3) * 10^3) * \Delta p$$

$$= \left(\left(\begin{array}{l} 0.098 + (-0.05702) * 1.834 + 0.05045 * 1.834^2 \\ + (-0.01749) * 1.834^3 \end{array} \right) * 10^3 \right) * \Delta p$$

$$= (0.055225 * 10^3) * 0.0247 = 0.00136 \quad (1.3)$$

1.2 Paine $P_{\text{react-corr}}$

3.6 REAKTORIN PAINE

Mittapisteen 521K001E arvo (= $P_{\text{react-corr}}$) lasketaan lisäämällä mitattuun reaktorin paineeseen 1 ilmakehä ja muutetaan yksiköksi bar.

$$P_{\text{react-corr}} = P_{\text{react}} + f_{\text{p-corr}} * 10^{-5}$$

missä

$P_{\text{react-corr}}$ Reaktorin paine, korjattu (bar)

P_{react} Hienopaine (bar g)

$f_{\text{p-corr}}$ Paineen korjaus = 101300 Pa

$$P_{\text{react-corr}} = 69 + 101300 * 10^{-5} = 70.013 \text{ bar} \quad (1.4)$$

1.3 Steam_enthalpy

$$\begin{aligned} dp &= 70.0 - \text{paine} * 10^{-5} \\ r &= 1506.0 + 6.4 * dp \\ p &= \text{paine} * 10^{-6} \quad (\text{Pa} \rightarrow \text{MPa}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Steam_enthalpy}(\text{paine}, \text{höyryn_kosteus}) = \\ (2790.52 + 0.074642 * p^3 - 2.54615 * p^2 + \\ 11.60056 * p - r * \text{höyryn_kosteus}) * 10^3 \end{aligned}$$

$$69 + 101300 * 10^{-5} = 70.013 \text{bar}$$

$$\Delta p = 70 - 70.013 = -0.013$$

$$r = 1560 + 6.4 * (-0.013) = 1560 - 0.0832$$

$$p = 70.013 \text{bar} = 7001300 \text{Pa} = 7.0013 \text{MPa}$$

Steam _enthalpy =

$$\left(\begin{aligned} &2790.52 + 0.074642 p^3 - 2.54615 p^2 \\ &+ 11.60056 p - r * f_{\text{moisture}} \end{aligned} \right) * 10^3$$

$$= \left(\begin{aligned} &2790.52 + 0.074642 * 7.0013^3 - 2.54615 * 7.0013^2 \\ &+ 11.60056 * 7.0013 - (1560 - 0.0832) * 0.023 \end{aligned} \right) * 10^3$$

$$= (2790.52 + 3.65881 - 124.80769 + 81.2190 - 35.878) * 10^3$$

$$= 2667.051 * 10^3$$

(1.5)

$$\frac{\partial \text{Steam_enthalpy}}{\partial p} * \Delta p =$$

$$\begin{aligned}
 & \left((0.074642 * 3p^2 - 2.54615 * 2p + 11.60056 - 6.4 f_{moisture}) * 10^3 \right) * \Delta p \\
 & = \left((0.2239 p^2 - 5.0923 p + 11.60056 - 6.4 f_{moisture}) * 10^3 \right) * \Delta p \\
 & = \left((10.9764 - 35.6527 + 11.60056 - 0.1472) * 10^3 \right) * \Delta p \\
 & = \left(-13.22294 * 10^3 \right) * 0.0247 = 326.61 \tag{1.6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \text{Steam_enthalpy}}{\partial f_{moisture}} * \Delta f_{moisture} = \\
 & \left((-1506 + 6.4 * \Delta p) * 10^3 \right) * \Delta f_{moisture} \\
 & = \left(-(1506 - 0.0832) * 10^3 \right) * f_{moisture} \\
 & = \left(1505.9168 * 10^3 \right) * 0.05 = 75.295 * 10^3 \tag{1.7}
 \end{aligned}$$

1.4 Termi Q1

Turpiinille menevä teho

$$Q1 = M_{fw-corr} * (\text{Steam_enthalpy} (P_{react-corr} * 10^5, f_{moisture}) - H_{fw} * 10^3)$$

missä

$M_{fw-corr}$	Syöttöveden virtaus, lämpötilakorjattu (kg/s)
$P_{react-corr}$	Reaktorin paine, korjattu (bar g)
$f_{moisture}$	Höyryn kosteus
H_{fw}	Syöttöveden entalpia (kJ/kg)

1.5 Syöttöveden virtaus

3.8 SYÖTTÖVEDEN VIRTAUS

Mittapisteen 521K016E (= $M_{fw-corr}$) arvo lasketaan mitatusta virtauksesta ottamalla huomioon syöttöveden nimellisen ja todellisen lämpötilan välinen ero.

$$M_{fw-corr} = M_{fw} * \text{Flow_correction} (f_{T-fw-nom} , T_{fw})$$

missä

$M_{fw-corr}$	Syöttöveden virtaus, lämpötilakorjattu (kg/s)
M_{fw}	Syöttöveden virtaus (kg/s)
T_{fw}	Syöttöveden lämpötila (°C)
$f_{T-fw-nom}$	Syöttövesivirtauksen nimellinen lämpötila (°C)

1 CONDININ LASKEMIEN TERMIEN TARKASTELUSSA KÄYTETYT MITTAUSARVOT

CONDINin mittausarvot:						
Aika	521K016E kg/s	312K301SE kg/s	312K301 kg/s	312K50SXE °C	312K501 °C	312K502 °C
13.3 klo:12:08	1250	1251,3	1253,2	183,4	183,4	183,4
12:10	1251	1252,2	1251,8	183,4	183,4	183,3
12:15	1251	1251,7	1254,5	183,4	183,4	183,3
12:20	1251	1252,2	1262,7	183,4	183,4	183,3
12:25	1250	1251,1	1237	183,4	183,4	183,4
12:30	1252	1253	1255,5	183,4	183,4	183,3
12:35	1250	1251,7	1270,8	183,4	183,4	183,4
12:40	1250	1251,7	1237,7	183,4	183,4	183,4
12:42:30	1250	1250,8	1243,2	183,4	183,4	183,3
12:45	1251	1252	1266	183,4	183,4	183,3

Taulukko 1. Condinin mittausarvoja

521K016E = syöttöveden virtaus, perustuu mittauksiin 312K301SE (312K301) ja 312K50SXE (312K501 ja 312K502)

CONDINin mittausarvot:							
Aika	521K001E bar	211K10SXE bar g	211K101 bar g	211K102 bar g	211K103 bar g	211K104 bar g	521K006E kJ/kg
13.3 klo:12:08	70	69	69,1	69	69	69	780,9
12:10	70	69	69	69	69	69	780,9
12:15	70	69	69	68,9	69	69	781
12:20	70	69	69	69	69	69	780,9
12:25	70	69	69	69	69	69	780,9
12:30	70	69	69,1	69	69	69	781
12:35	70	69	69	68,9	69	69	780,9
12:40	70	69	69	68,9	69	69	780,9
12:42:30	70	69	69	69	69	69	780,9
12:45	70	69	69	69	69	69	781

Taulukko 2. Condinin mittausarvoja.

521K001E = Hienopaine, perustuu mittaukseen 211K10SXE (211K101-211K104)

521K006E = Syöttöveden entalpia, perustuu mittauksiin 211K10SXE ja 312K50SXE

521K051E MW	521K007E %
2499	100
2500	100
2499	100
2501	100
2499	99,9
2502	100,1
2499	100
2499	100
2498	99,9
2500	100

Taulukko 3. Condinin mittausarvot teholle megawatteina ja prosentteina