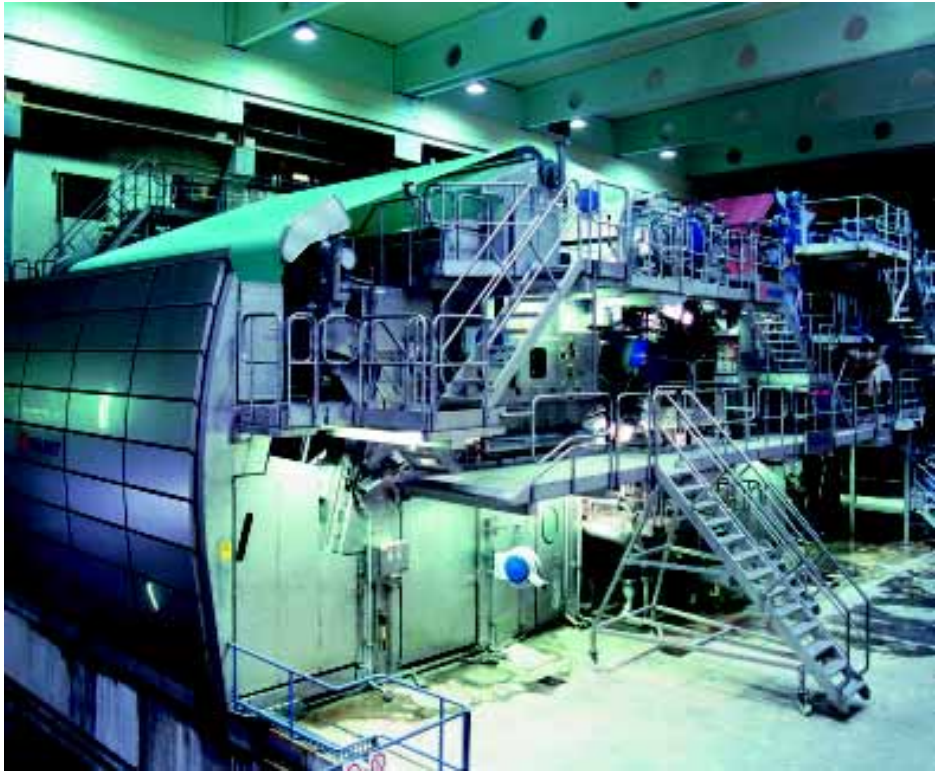


# Käyttövarmuus ja käyttökunnon hallinta



VTT SYMPOSIUM 196

**Avainsanat:**

reliability, operational control, condition monitoring,  
human factors, design, data acquisition, operational  
reliability, pulp and paper, process diagnostics

# Käyttövarmuus ja käyttökunnon hallinta

Espoo, 18.11.1999

Toimittaja

Kenneth Holmberg

VTT Valmistustekniikka

Järjestäjä

VTT Valmistustekniikka



---

TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND  
ESPOO 1999

ISBN 951-38-5272-5  
ISSN 0357-9387

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Valmistustekniikka, Käyttötekniikka, Kemistintie 3, PL 1704, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7002

VTT Tillverknings teknik, Driftsäkerhetsteknik, Kemistvägen 3, PB 1704, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7002

VTT Manufacturing Technology, Operational Reliability,  
Kemistintie 3, P.O.Box 1704, FIN-02044 VTT, Finland  
phone international + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7002

# Alkusanat

Käyttövarmuus kilpailutekijänä (KÄKI) -teknologiaohjelma käynnistyi Teknologian kehittämiskeskuksen päätöksellä syksyllä 1995. Ohjelma ja sen projektit on suunniteltu teollisuusvetoisesti siten, että osallistuvat yritykset ovat yhdessä tutkimuslaitoksien kanssa määritelleet ne kohteet, joissa kaivataan parannusta tuotteiden ja laitoksien käyttövarmuuteen ja käytettävyyteen.

Ohjelman projektit ovat käynnistyneet kolmessa eri vaiheessa. Energia-teollisuuden projektit käynnistyivät alkuvuonna 1996, prosessiteollisuuden projektit vuoden 1997 aikana ja metalliteollisuuden projektit syksyllä 1998 ja keväällä 1999. Lisäksi teollisuuden tuotekehitysprojekteihin liittyen on käynnistetty viisitoista tutkimuslaitoksien vetämiä käyttövarmuusmetodiikan kehittämiseen keskittyviä tavoitetutkimusprojekteja. Ohjelma päättyy vuoden 2000 loppuun mennessä.

Ohjelman tuloksia on esitetty syksyllä 1997 ja 1998 pidettyjen ohjelmaseminaarien yhteydessä, ja ne on julkaistu kahdessa aikaisemmassa seminaarijulkaisussa. Tähän kolmanteen kirjaan sisältyvät raportit edustavat tutkimustuloksia ja selvityksiä, jotka ovat syntyneet vuoden 1999 aikana. Tulokset esitettiin KÄKI-ohjelmaseminaarissa 18. marraskuuta 1999 Otaniemessä.

Kirjoittajat kiittävät kaikkia niitä tahoja, jotka ovat osallistuneet tämän tutkimuskokonaisuuden rahoittamiseen ja myötävaikuttaneet tutkimustyön toteuttamiseen ja tukemiseen monella eri tavalla. Toimittaja kiittää VTT Valmistustekniikan Auli Leveistä ja Åsa Åvallia tämän kirjan raporttien erinomaisesta editointi- ja yhdenmukaistamistyöstä.

# Sisällysluettelo

ALKUSANAT	3
Sellutehtaan käyttövarmuusmalli <i>Saku Pursio, Helena Kortelainen &amp; Jouko Horttanainen</i>	7
Tuotantojärjestelmän käyttökokemustiedon hallintajärjestelmä <i>Jari Konola &amp; Kari M. Mäki</i>	21
Automatic process diagnostic <i>Sara Paunonen, Olli Saarela &amp; Risto Ritala</i>	31
Korroosion monitorointi sellutehtaan valkaisuimossa <i>Irina Aho-Mantila, Kari Saarinen &amp; Jari Hämäläinen</i>	39
Metsäkoneiden luotettavuuden ja toiminnan mittaus <i>Jorma Eschner</i>	47
Ennakkohuollon vaikutus vikaantumiseen (matemaattinen malli) <i>Per-Erik Hagmark</i>	51
Käyttövarmuus paperikoneen kiinnirullaimen tuotekehityksessä <i>Petteri Lannes</i>	65
Telan pinnoitteiden ultraäänitarkastus <i>Tommi Uski &amp; Petri Kuosmanen</i>	75
Venttiileiden kulumismallien hyödyntäminen <i>Kai Laitinen</i>	89
Venttiilin käyttövarmuus ja ennakoiva kunnossapito <i>Jari Riihilahti</i>	95
MEMS-mikroantureiden kehitys koneiden kunnonvalvontaan <i>Jari Halme</i>	103
Automatisoitujen laitteiden käyttövarmuus <i>Tony Rosqvist &amp; Olli Ventä</i>	115

Käynnissäpitohenkilöstön toimintatavat käyttövarmuustekijänä.  
Tutkimusmenetelmien kehittäminen tapaustutkimuksessa 137  
*Maaria Nuutinen & Leena Norros*

Human activity in the improvement of process dependability –  
The conceptions of the operators and the maintenance personnel 147  
*Anneli Leppänen, Ville Nurmi & Auli Fredrikson*

#### LIITTEET

- 1 Julkaisuluettelo
- 2 Käyttövarmuus kilpailutekijänä -teknologiahankkeen organisaatio



# Sellutehtaan käyttövarmuusmalli

Saku Pursio, tutkija  
VTT Automaatio  
Tampere

Helena Kortelainen, erikoistutkija  
VTT Automaatio  
Tampere

Jouko Horttanainen, kehityspäällikkö  
UPM-Kymmene Oyj, Kaukaan sellutehdas  
Lappeenranta

## Tiivistelmä

Sellu- ja paperiteollisuudessa tuotantolinjojen, koneiden ja laitteiden korkea käyttövarmuus on merkittävä tekijä pyrittäessä ylläpitämään ja parantamaan laitosten tuottavuutta. *Tuotantolinjan käyttövarmuuden kokonaismalli* -projektissa laadittiin sellutehtaan kvantitatiivinen käyttövarmuusmalli. Mallin avulla sellutehtaasta voidaan paikantaa käyttövarmuutta heikentävät alueet ja vertailla erilaisten muutosten vaikutuksia tehtaan käytettävyyteen.

## 1. Johdanto

Käyttövarmuudella tarkoitetaan kohteen kykyä suorittaa vaadittua toimintoa, kun ulkoiset edellytykset toiminnon toteutumiselle ovat olemassa, SFS-IEC 50(191). Määritelmää voidaan soveltaa erilaisiin kohteisiin riippumatta niiden koosta ja käyttötarkoituksesta.

Tuotantolinjan käyttövarmuuden kokonaismalli -projektin eräs tehtävä on laatia kokonaiselle tuotantolinjalle käyttövarmuusmalli. Aiemmin laaditun paperikoneen käyttövarmuusmallin (Kortelainen et al. 1998) lisäksi kehitettyjä mallin-



nusperiaatteita sovellettiin sellutehtaaseen (Pursio 1999). Esimerkkikohteeksi valittiin UPM-Kymmene Oyj:n Kaukaan sellutehdas. Projektiin osallistuvat VTT Automaation lisäksi Ahlstrom Machinery Oy, Valmet Oy, UPM-Kymmene Oyj Kaukaan ja Kajaanin tehtaot, Metsä-Serla Savon Sellu Oy ja ABB Industry Oy Pulp & Paper.

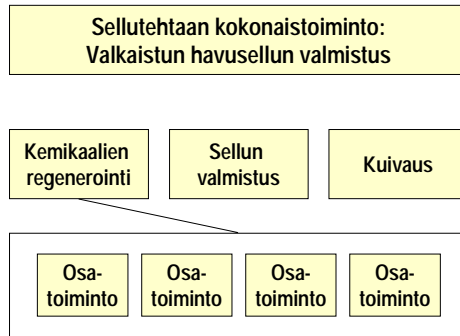
Kaukaan sellutehdas tuottaa valkaistua sulfaattisellua 625 000 tonnia vuodessa. Tuotannosta 350 000 tonnia on pitkäkuitusellua ja 275 000 tonnia lyhytkuitusellua. Valkaistua sellua pumpataan alueella sijaitsevalle paperitehtaalle ja loput kuivataan ja paalataan. Käyttövarmuusmalli laadittiin uusitulle pitkäkuitulinjalle ja yhdelle kuivauskoneelle.

## **2. Käyttövarmuusmalli**

Käyttövarmuusmalli koostuu teknisen järjestelmän luotettavuusteknisen rakenteen mallista, järjestelmän vikaantumis- ja korjausaikatiedoista sekä edelliset yhdistävästä kvantitatiivisesta laskennasta. Laskennan tuloksena saadaan käytettävyys, joka kuvaa järjestelmän käyttövarmuutta. Sellutehtaan käyttövarmuusmallin laskenta perustuu laitteiden ja laiteryhmiin teknisiin vikoihin. Muiden seisokin aiheuttajien ei oleteta tässä mallissa vaikuttavan tehtaan käytettävyyteen.

### **2.1 Toiminnallinen kuvaus**

Sellutehtaan käyttövarmuusmallinnus aloitettiin toiminnallisen kuvauksen laatimisella. Hierarkkisen toiminnallisen kuvauksen avulla selvitetään tarkastelu-kohteen toiminta pääpiirteissään. Ylimmän hierarkiatason kokonaistoiminto jakaantuu toiminnallisessa kuvauksessa päätoimintoihin ja päätoiminnot edelleen osatoimintoihin (kuva 1) (Ross 1985, Papazoglou 1998).



*Kuva 1. Hierarkkisen toiminnallisen kuvauksen lohkoavion muodostuminen: sellutehtaan kokonaistoiminto ja kolme päätoimintoa.*

Toiminnallisen kuvauksen tarkoituksena on nimensä mukaisesti kuvata tarkasteltava kohde joukkona toimintoja, joiden toteutuminen on edellytys kokonaistoiminnon toteutumiselle. Toiminnallinen kuvaus ei käsittele tietyn toiminnon toteuttavan järjestelmän teknisiä yksityiskohtia, jolloin hyvinkin erilaiset laitteistot voidaan kuvata samana toimintona. On mahdollista, että jokin yleisesti tunnettu laitekokonaisuus toteuttaa tietyn toiminnon, jolloin on perusteltua käyttää toiminnosta kyseisen laitekokonaisuuden nimeä. Toiminnallinen kuvaus ei sisällä tietoa toimintojen toteuttamisjärjestyksestä tai teknisten järjestelmien todellisesta rakenteesta ja keskinäisistä kytkennöistä.

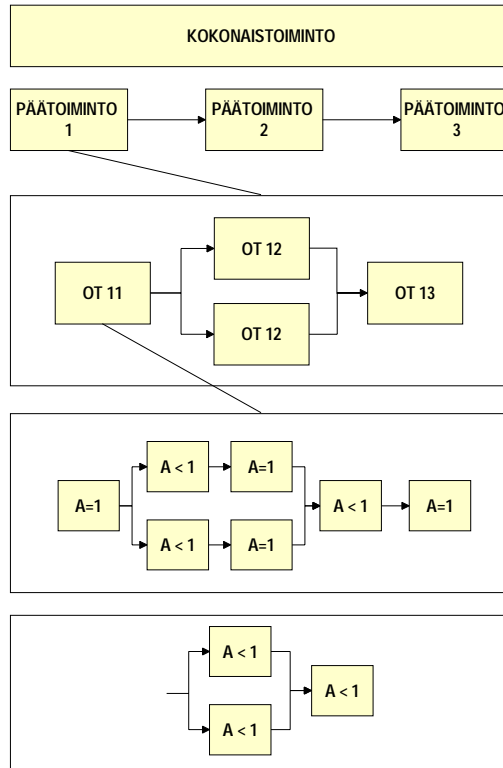
## 2.2 Luotettavuustekninen rakenne

Kvantitatiivisen käyttövarmuusmallin keskeinen osa on tarkasteltavan kohteen luotettavuusteknisen rakenteen malli, johon käytettävyyden laskenta perustuu. Sellutehtaan luotettavuustekninen rakenne esitetään luotettavuuslohkoaviona.

Luotettavuustekninen rakenne ottaa huomioon yksittäisten toimintojen painoarvon kokonaistoiminnon kannalta. Järjestelmän toiminta kuvataan virtauksena luotettavuuslohkoavion läpi, joten jokaisen toiminnon täytyy olla kytkettynä johonkin toiseen toimintoon. Toimintojen väliset luotettavuustekniset kytkennät perustuvat sarja- ja rinnakkaisrakenteisiin ja näiden yhdistelmiin.

Toimintojen sijainti luotettavuusteknisessä rakenteessa noudattaa toiminnallisen kuvauksen pääpiirteitä ja laajan järjestelmän hierarkkisuus säilyy.

Tietty toiminto voidaan toteuttaa tekniseltä rakenteeltaan erilaisilla laitteistoilla. Toiminto voi sisältää käytettävyyden varmistamiseksi suunnitellun sisäisen toimintorakenteen, joka on huomioitava käytettävyyden laskennassa.



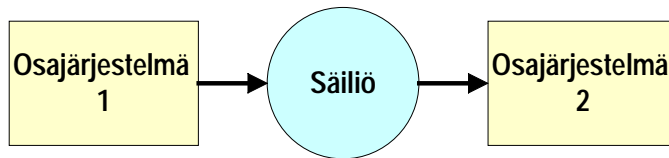
Kuva 2. Hierarkkisen luotettavuusteknisessä rakenteen muodostuminen

Luotettavuusteknisessä rakenteen alin hierarkiataso on osajärjestelmän toiminnon toteuttavista laitteista muodostuva luotettavuustekninen rakenne. Laajan järjestelmän tarkastelua voidaan yksinkertaistaa jättämällä tarkastelun ulkopuolelle ne laitteet, joiden käytettävyys on hyvin korkea,  $A \approx 1$ . Alimmalle hierarkiatasolle jäävät siis ne laitteet, jotka ovat toiminnon toteutumisen kannalta kriittisiä (kuva 2).

### 2.2.1 Säiliöt käyttövarmuusmallissa

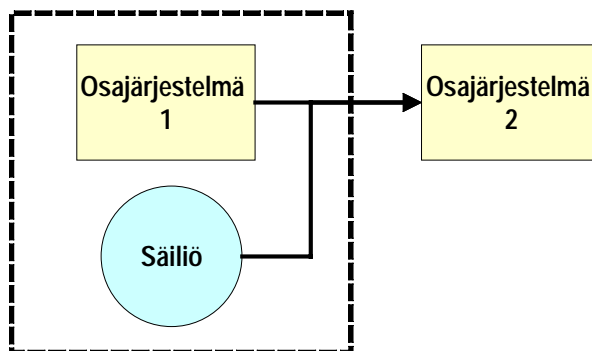
Teknisten järjestelmien toimintaan perustuva käyttövarmuuden laskenta ei huomioi toimintojen välisiä todellisia kytkentöjä, kuten välituotteen siirtoa prosessivaiheiden välillä. Prosessiteollisuuden näkökulmasta kiinnostavin kytkentä on osajärjestelmien tai osastojen välinen säiliö. Säiliön toiminto ja paikka luotettavuusteknisessä rakenteessa täytyy määrittää, jotta säiliö voitaisiin liittää käytettävyyden laskentaan.

Kuvassa 3 on esitetty kahden osajärjestelmän ja säiliön muodostama ´prosessi´. Osajärjestelmä 1 syöttää tuotteensa säiliöön ja osajärjestelmä 2 ottaa samasta säiliöstä raaka-ainetta. Osajärjestelmien välinen tuotantovirta kulkee kokonaisuudessaan säiliön läpi.



*Kuva 3. Säiliö prosessijärjestelmässä.*

Materiaalivirta osajärjestelmästä 1 on osajärjestelmän 2 toiminnan edellytys. Osajärjestelmä 1 on käytettävissä, jos se kykenee täyttämään säiliötä. Osajärjestelmän 2 toiminta on samanlaista riippumatta siitä tuleeko materiaalivirta suoraan edellisestä osajärjestelmästä tai säiliöstä, joten sen kannalta osajärjestelmä 1 käytettävissä aina kun säiliö ei ole tyhjä.



*Kuva 4. Säiliö luotettavuusteknisessä rakenteessa.*

Osajärjestelmä 1 ja sen jälkeinen säiliö voidaan tulkita kuvan 4 esittämällä tavalla yhdeksi toiminnalliseksi kokonaisuudeksi, jolla on sisäinen luotettavuustekninen rinnakkaisrakenne. Osajärjestelmän 1 vikaantuessa säiliö pidentää kokonaisuuden käytettävyyss aikaa tyhjenemiseensä kuluvaan ajan.

### 2.3 Käytettävyyden laskenta

Käytettävyyden laskenta perustuu toteutuneeseen ja suunnitellun tuotantoajan vertaamiseen. Sellutehtaan käyttövarmuusmallissa käytettävyys lasketaan yhtälöllä 1.

$$A = \frac{\text{TOTEUTUNUT TUOTANTOAIKA}}{\text{SUUNNITELTU TUOTANTOAIKA}} \quad (1)$$

Suunnitellussa tuotantoajassa huomioidaan tiedossa olevat ajanjaksot, jolloin tuotanto ei ole mahdollista. Tällaisia ovat esim. lakisäätöiset ja sopimuksilla määrättyt vapaapäivät. Suunnitellut seisokit voidaan myös huomioida suunniteltua tuotantoaikaa lyhentävinä tekijöinä. Sellutehtaan käytettävyyden laskentaperusteita voidaan tarvittaessa muuttaa, joten laskennan tuloksia on mahdollista vertailla muiden laskelmien kanssa.

Sellutehtaan katsotaan olevan käytettävissä aina kun lopputuotetta valmistuu. Käytännössä toteutuneeksi tuotantoajaksi lasketaan kaikki se aika, jolloin paalauslinjalta valmistuu sellupaaleja.

### 2.4 Käytettävyyden laskentaan tarvittavat tiedot

Luotettavuustekninen rakenne muuttuu käyttövarmuusmalliksi, kun kuvassa 2 esitetyn rakenteen alimman hierarkiatason kohteiden käytettävyydet voidaan laskea. Käytännössä on tiedettävä vikaantuvien laitteiden kaikki vikamuodot, sekä niihin liittyvät vikaantumis- ja korjausajat. Käytettävyys voidaan laskea myös koko tarkastelujakson yhteenlaskettuun epäkäytettävyyss aikaan perustuen.

Valitusta käytettävyyden laskentaperiaatteesta johtuen kohteiden viat jaetaan kriittisiin ja ei-kriittisiin. Kriittinen vika määritellään sellaiseksi, joka estää toiminnon toteutumisen ja vaatii välittömän korjauksen. Kriittinen vika alentaa aina järjestelmän käytettävyyttä. Ei-kriittiset viat eivät johda järjestelmän täydelliseen toimintakelvottomuuteen, mutta voivat vaikuttaa tuotannon määrään tai tuotteen laatuun. Ei-kriittinen vika ei yleensä vaadi välitöntä korjausta, joten sen vaikutus järjestelmän käytettävyyteen riippuu sovitusta laskentaperusteista. Yksittäisen laitteen toiminnan keskeyttävä vika voi olla järjestelmän kannalta ei-kriittinen, jos laitteella on varalaite tai sen toiminto voidaan korvata muulla tavoin.

Säiliöistä on tiedettävä ainakin keskimääräinen pinnankorkeus, tilavuus ja lähtövirtaus. Lähtövirtauksen avulla voidaan laskea säiliön tyhjenemiseen kuluva aika, joka on samalla järjestelmän käytettävyyssajan pidennys.

Sellutehtaan käyttövarmuusmallin vaatimat tiedot kerättiin haastattelemalla laitoksen henkilökuntaa. Haastatteluissa varmistettiin, että ennakkoon laadittu toiminnallinen kuvaus vastaa todellista järjestelmää ja tarvittaessa kuvausta tarkennettiin. Tuotantolinjan toimintojen keskeytysten syyt ja seuraukset käytiin läpi toiminnoittain suhteellisen karkealla tasolla. Tarkasteltavat toiminnot oli valittu siten, että mahdolliset keskeytysten syyt voitiin kohdistaa tietyille toimintoon kuuluvalla laitteella tai laiteryhmälle.

Toiminnan keskeytys määriteltiin koskemaan pääasiassa laitevikoja ja rajatusti prosessihäiriöitä. Yksittäisistä toiminnan keskeytymisistä haluttiin tietää

- toiminnan keskeyttäneet laitevikat ja mahdolliset muut syyt
- em. vikojen esiintymistaajuuudet
- keskeytysten seuraukset vikojen kriittisyyden arvioimiseksi
- vikojen korjausajat ja seisokkien pituudet.

Säiliötiedot oli saatavissa suoraan prosessinohjausjärjestelmästä, koska säiliön pinnankorkeus on yksi prosessin hallintaparametreista. Kaukaalla säiliöiden pinnankorkeus mitataan kymmenen sekunnin välein ja myöhemmin tiedot muutetaan tunnin keskiarvoiksi. Jotta käytettävyyden laskentaa varten saatiin luotettava arvio säiliöiden pinnankorkeuksista ja niiden muutoksista, tutkittiin

jokaisen säiliön pinnankorkeustietoja vuoden ajalta. Tiedoista määritettiin säiliöiden pinnankorkeuden keskiarvot.

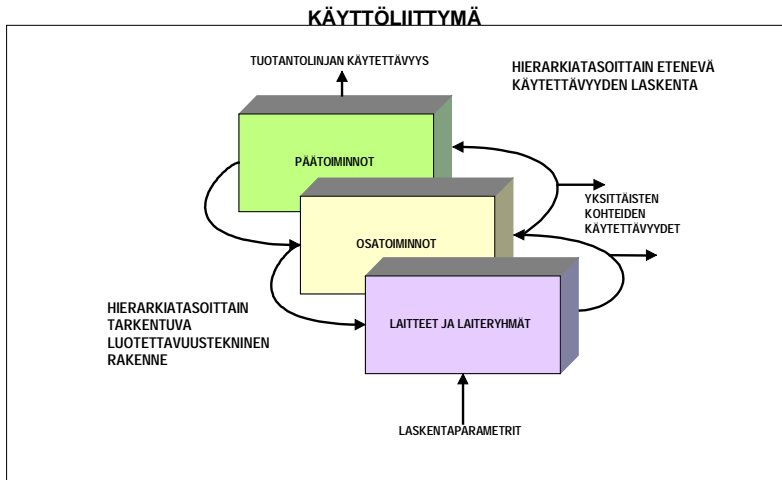
## **2.5 Laskentaparametrit ja laskentatyökalun valinta**

Sellutehtaan käyttövarmuusmalli laadittiin käyttäen sekä Avsim-simulointiohjelmaa että Excel-taulukkolaskentaa. Projektin edetessä pääpaino asetettiin Excel-malliin, koska tavoitteena oli yleiskäyttöisen työkalun kehittäminen.

Luotettavuustekninen rakenne määrää yksiselitteisesti, kuinka laitteiden ja osajärjestelmien käytettävyyksistä lasketaan koko järjestelmän käytettävyys. Laitteiden käytettävyyksien laskentaan tarvitaan jokaisen vikamuodon vikataajuus ja korjausaika. Perustapauksessa Excel-laskenta perustuu ko. parametrien keskiarvoihin, jolloin laskennan tuloksena saadaan järjestelmän keskimääräinen käytettävyys tietyllä ajanjaksolla. Koska todellisuudessa vikataajuudet ja korjausajat eivät ole vakioita, laskentaan voi tulla virhettä pelkkiä keskiarvoja käytettäessä. Virheen pienentämiseksi Excel-malliin voidaan syöttää parametrien keskimääräiset arvot ja näiden lisäksi todennäköiset minimi- ja maksimi-arvot. Laskennassa käytetään satunnaisesti valittua arvoa minimin ja maksimin väliltä, jolloin peräkkäisten laskentakierrosten jälkeen saadaan tarkastelujakson käytettävyyden vaihteluväli.

## **3. Sellutehtaan käyttövarmuusmalli**

Excel-pohjainen käyttövarmuusmalli jakaantuu käyttöliittymään ja varsinaiseen laskentaan, jota on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Sellutehtaan käyttövarmuusmallin periaatekaavio

Käyttöliittymän avulla laskennassa tarvittavat tiedot voidaan helposti syöttää malliin. Käyttäjän ei tarvitse tehdä muutoksia varsinaisiin laskentataulukoihin, vaan pääpaino on tulosten tarkastelussa.

### 3.1 Laskentaparametrien syöttö

Tietojen syöttämiseksi käyttöliittymässä on *alkutiedot*-näyttö (kuva 6), *säiliötiedot*-näyttö jokaiselle mallin säiliölle (kuva 7) sekä taulukot laitevika-tietojen syöttämiseksi (kuva 8).

**ALKUTIEDOT**

Suunniteltu vuotuinen käyttöaika	<input type="text" value="8760"/>	h
TES-seisokit	<input type="text"/>	h
Juhannus	<input type="text"/>	h
Joulu	<input type="text"/>	h
Muut seisokit	<input type="text"/>	h
Sellutonnin hinta	<input type="text"/>	mk
Kunnossapitotunnin hinta	<input type="text"/>	mk

Kuva 6. Käyttövarmuusmallin alkutietonäyttö.



Alkutietoina määritellään suunniteltu tuotantoaika ilmoittamalla TES- ja suunniteltujen seisokkien kestot Kustannuslaskentaa varten syötetään kunnossapitotyötunnin ja sellutonnin hinta.

SÄILIÖTIEDOT	
SAKEAMASSATORNI	
TILAVUUS	5000 m <sup>3</sup>
ALARAJA	5 %
YLÄRAJA	90 %
KESKIMÄÄRÄINEN TÄYTÖS	65 %
SAKEUS	12 %

Kuva 7. Käyttövarmuusmallin eräs säiliötietonäyttö

Säiliötietoina annetaan säiliön tilavuus, ala- ja yläraja sekä keskimääräinen täytös. Kaukaan sellutehtaan tapauksessa keskimääräinen täytös saatiin kerätyistä säiliötiedoista. Edellisten lisäksi voidaan syöttää laskennassa tarvittavia lisätietoja, kuten massan sakeus.

TEKNISTEN JÄRJESTELMIEN VIAT JA EHKÄISEVÄ KUNNOSSAPITO

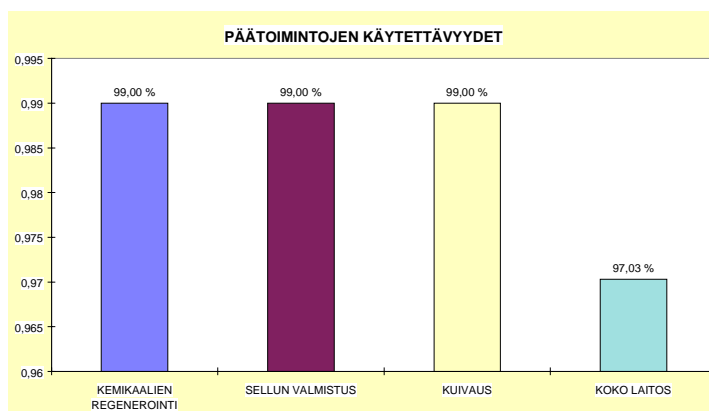
VIKAMUODOT	rinnan (kpl)	vikoja / vuosi			korjausaika (h)			kriittisyys 1 tai 0	käytettävyys
		min	keskim.	max	min	keskim.	max		
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1
	1								1

Kuva 8. Käyttövarmuusmallin laitteiden vikatiетojen syöttötaulukko.

Malliin syötetään laitteen tai laiteryhmän vikamuoto, montako kyseisiä laitteita on kytketty rinnan, vikamuotojen lukumäärä vuodessa, korjausaika ja kriittisyys. Laitetason laskennan perusoletus on, että kaikki laitteet on kytketty sarjaan, jolloin mahdolliset rinnakkaiskytkennät on ilmoitettava erikseen.

## 3.2 Tulokset ja mallin käyttö

Sellutehtaan käyttövarmuusmalli laskee käytettävyyden jokaiselle luotettavuusteknisen rakenteen lohkolle. Toimintojen käytettävyyksiä voidaan tarkastella hierarkiatasoisin pylväsdiagrammeina, kuten kuvassa 9 on esitetty.



*Kuva 9. Päätoimintojen ja koko laitoksen käytettävyydet (luvut eivät perustu kohdelaitokselta saatuihin tietoihin).*

Käyttövarmuusmallin avulla laajaa järjestelmää voidaan tarkastella yhtenä kokonaisuutena, josta voidaan paikallistaa ne osajärjestelmät ja laitteet, jotka heikentävät eniten järjestelmän käytettävyyttä. Mallin avulla voidaan helposti vertailla eri parannusvaihtoehtojen vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen ja siten kohdistaa rajalliset resurssit mahdollisimman tehokkaasti. Laitos- ja laitesuunnittelussa malli tarjoaa keinon vertailla nopeasti eri laiteratkaisujen ja säiliörakenteiden vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen.

Säiliöillä on huomattava merkitys prosessilaitoksen käyttövarmuuteen. Kun säiliöt jätettiin huomiotta, sellutehtaan laskettu käytettävyys heikkeni 20 %-yksikköä verrattuna normaaliin ajotilanteeseen. Mallia voidaan käyttää myös prosessin ajoparametrien optimointiin, koska säiliöiden keskimääräisten pinnankorkeuksien muuttaminen tarjoaa mahdollisuuden käytettävyyden parantamiseen.

## 4. Käyttäjien kokemuksia

Projektissa kehitetty Excel-taulukkolaskentaan perustuva käyttövarmuusmalli osoittautui helppokäyttöiseksi ja Kaukaalla tulokset asettuivat pääsääntöisesti oikeaan suuruusluokkaan. Tietyissä sellutehtaan osissa erilaiset prosessihäiriöt ja käytön työt ovat teknisiä vikoja merkittävämpiä seisokin syitä, joten teknisiin vikoihin perustuvan käytettävyyden laskennan tulos poikkeaa tehtaan omista arvioista. Malli voidaan vaivattomasti laajentaa koskemaan myös muita seisokin aiheuttajia, jos näistä saadaan riittävästi tietoa laskentaa varten.

## 5. Yhteenveto

Toiminnallinen kuvaus sisältää suunnittelijan määrittämät tavoitteet ja käyttäjän vaatimukset. Toiminnallisen kuvauksen avulla tunnistetaan järjestelmä- ja toimintotasojen käytettävyydskriteerit. Kohteen käytettävyyden tutkimiseksi toiminnot on järjestettävä luotettavuustekniseksi rakenteeksi, jonka alimman hierarkiatason muodostavat käytettävyyden kannalta merkitykselliset laitteet ja laiteryhmät. Varsinainen käyttövarmuusmalli muodostetaan yhdistämällä luotettavuustekninen rakenne, valittu käytettävyyden laskentaperiaate ja laitteiden vikatiedot.

Käyttövarmuusmallin avulla sellutehdasta tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena, jolloin koko laitoksen käytettävyyttä eniten heikentävät osat voidaan helposti paikallistaa. Mallin avulla voidaan helposti vertailla erilaisia teknisiin järjestelmiin tehtäviä muutoksia ja muutosten vaikutus sellutehtaan käytettävyyteen nähdään heti. Käyttövarmuusmalli soveltuu päätöksenteon tueksi ja tiedonsiirron apuvälineeksi suunnittelijoiden, käyttäjien ja laitetoimittajien välille.

## Kirjallisuusviitteet

Kortelainen H., Ristimäki P. & Oinonen K. 1998. Paperikoneen käyttövarmuusmallin kehittäminen. Teoksessa: Holmberg, K. (toim.) Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta. Espoo, 19.11.1998. Espoo: VTT Valmistustekniikka. S. 87 - 93. (VTT Symposium 188.) ISBN 951-38-5261-X

Papazoglou, I. 1998. Functional block diagrams and automated construction of event trees. Reliability engineering and system safety, vol. 61, s. 185 – 214.

Pursio, S. 1999. Tuotantolinjan käyttövarmuusmalli. Diplomityö. Tampere. 85 s.

Ross, D. 1985. Applications and Extentions of SADT. IEEE, April 1985, s. 25 – 34.

SFS-IEC 50(191) 1996. Sähköteknillinen sanasto. Suomen Standardisoimisliitto. 143 s.



# Tuotantojärjestelmän käyttökokemustiedon hallintajärjestelmä

Jari Konola, tutkija  
VTT Automaatio/Riskienhallinta  
Tampere

Kari M. Mäki, tuotekehityspäällikkö  
Valmet Corporation Service/T&K  
Jyväskylä

## Tiivistelmä

Tiedonkeruu-hankkeen tavoitteena on kehittää paperi- ja sellutehtaille muuttuvaan tehdasympäristöön soveltuva pysyvä käyttökokemustiedon keruujärjestelmä, jonka avulla laitoksella syntynyt käyttökokemustieto saadaan kerättyä ja tallennuttua sellaisessa muodossa, että sitä voidaan käyttää laitoksen toiminnan kehittämiseen ja toisaalta saadaan siirtymään laitostoimittajille ja edelleen tämän alihankkijoina toimiville laite- ja komponenttitoimittajille.

Tällä hetkellä laitoksilla syntyvä käyttökokemustieto on vika- ja häiriötapahtumiin nähden hyvin hajanaista ja vähäistä. Jotta käyttökokemustietoa saataisiin sellaisessa muodossa, että sitä voitaisiin käyttää toimintojen ja laitteiden kehittämiseen täytyy kiinnittää huomiota käyttöliittymien kehittämiseen, tiedon syöttämisen helppouteen, tiedon luokitteluun syöttövaiheessa sekä kirjauksia tekevän henkilökunnan koulutukseen ja motivointiin.

## 1. Johdanto

Paperi- ja selluteollisuuden tuotantojärjestelmien kokonaistehokkuuden parantaminen on koko Suomen metsäklusterin kannalta merkittävä tekijä. Laitosten, osajärjestelmien ja komponenttien toimittajat pyrkivät kehittämään tuotteensa käyttövarmuudeltaan kilpailijoitaan paremmaksi. Paperi- ja sellu-

tehtaat pyrkivät tuotantolinjojensa käyttövarmuutta kehittämällä parantamaan laitostensa kokonaistehokkuutta.

Kokonaistehokkuuden voidaan ajatella muodostuvan tuotantojärjestelmän käyttövarmuudesta, laaduntuottokyvystä ja varsinaisesta suorituskyvystä, jolla tässä yhteydessä tarkoitetaan koko tuotantojärjestelmän kykyä – mukaan lukien ihmisen toiminnot – saavuttaa järjestelmän teoreettinen tuotantokapasiteetti.

Yhteistyön molemmat osapuolet – sekä laitoksen tai järjestelmän toimittaja että käyttäjä – tarvitsevat käyttökokemustietoa pyrkiessään parantamaan toimintaansa. Käyttökokemustiedolla tarkoitetaan kaikkea tietoa, joka liittyy esimerkiksi järjestelmässä esiintyviin vikoihin, vikojen syihin, korjaustoimenpiteisiin, vikojen tuotannolliseen vaikutuksiin sekä ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin.

Tiedonkeruun kehittämishankkeessa ovat mukana VTT Automaation lisäksi Ahlstrom Machinery Oy, ABB Industry Oy Pulp & Paper, UPM-Kymmene Oyj Kajaani, UPM-Kymmene Oyj Kaukas, Valmet Oy sekä Neles Automation Oy. Projekti on osa Tekesin Käyttövarmuus kilpailutekijänä -teknologiaohjelmaa.

## **2. Systemaattisella tiedonkeruulla saavutettavat hyödyt**

Tehokkaammalla ja yksityiskohtaisemmalla tiedonkeruulla ja tietojen järjestelmällisellä kirjaamisella saavutetaan mm. seuraavia etuja ja hyötyjä:

- Paperikoneen tai sellutehtaan epäkäytettävyys voidaan kohdistaa osaprosessi-, laitepaikka- ja jopa laitetasolle, jolloin on helppo löytää eniten ongelmia aiheuttavat kohteet. Tietoja voidaan hyödyntää tehokkaasti esim. käynnissäpidon, korvausinvestointien ja uusintojen suunnittelussa.
- Laitetoimittajalle voidaan toimittaa yksityiskohtaisempia ja luotettavimpia vikatilastoja, jolloin laitetoimittaja voi panostaa ongelmakohteiden tuotekehitykseen sekä suorittaa toimittamiensa järjestelmien käyttövarmuus-tarkasteluita.

- Vikojen ja niiden korjaustoimenpiteiden kirjaamisen myötä tehtaalle syntyy vikaistoriatietokanta, jota voidaan hyödyntää myöhemmin etsittäessä ratkaisuja ongelmatilanteissa.

### **3. Käyttövarmuustarkasteluissa tarvittavat tiedot**

Käyttövarmuuden hallinnan tehostamiseksi on vikatapahtumista kirjattava ainakin seuraavat tiedot:

- vikaantuneen laitteen sijainti (osaprosessi ja laitepaikkanumero)
- vikaantunut osa
- vian havaitsemisajankohta (= seisokin alkuaika)
- korjauksen alkamisajankohta
- korjauksen päättymisajankohta
- korjausseisokin päättymisajankohta
- viive korjauksen jälkeen ennen tuotannon alkamista ja syyt siihen (muut korjaukset, laatu poikkeamat,...)
- miten vika havaittiin?
- vian syy (perimmäinen primäärisyy)
- laitteen käyttötunnit ennen vikaa
- korjaukseen käytetyt miestyötunnit
- vaihdetut osat ko. kohteeseen
- vian luokittelu erilaisten kriteerien mukaan
- tehdyt korjaustoimenpiteet.

### **4. Nykyinen kirjausmenettely**

Laitoksilla käyttövarmuustieto on hyvin hajanaisessa muodossa ja tiedoista tallentuu vain murto-osa. Hajanaisen tiedon jatkoanalysointi on vaikeaa ja usein jopa kannattamatonta. Tällä hetkellä laitoksilla häiriö- ja vikatietoa kertyy eri järjestelmiin ja dokumentteihin, joita ovat mm.

- käyttöraportit
- vuoromestarien raportit
- valvomohenkilökunnan vikakirjat



- kunnossapidon tietojärjestelmät
- käyttötilastot
- ennakkohuollon raportit
- säiliö/paineestiakirjat ja -tarkastukset
- tuotannonhallintajärjestelmät.

Laitosten tavoitteena on tietojärjestelmien yhdistäminen, jolloin vikojen havaitseminen, toimenpiteet havaitsemisen jälkeen ja vian poistoon liittyvät toimenpiteet tulisivat kirjattua siten, että näiden tietojen avulla voitaisiin esimerkiksi seurata laitteiden käytettävyyden kehitystä. Suuret häiriöt kirjataan ja analysoidaan tälläkin hetkellä tarkasti, mutta tietoa voidaan joutua hakemaan useammista dokumenteista. Pienten häiriöiden tiedot tallennetaan vain harvoin. Osa korjauspyynnöistä tehdään suullisesti suoraan työnjohtajille, jolloin ne eivät tallennu mihinkään rekisteriin. Lisäksi valvomoissa käytetään liitutauluja, joihin vuoroissa ilmenneitä vikoja ja korjaustarpeita kirjataan.

## 4.1 Nykyisen kirjausmenettelyn puutteita

Käyttövarmuuden laskennan kannalta suurimpia nykyisissä kirjauskäytännöissä tunnistettuja puutteita ovat:

- seisokki- ja korjausaikatiedot puuttuvat
- kaikkia vikoja ei kirjata
- vikakirjauksia ei kohdisteta korjattavalle laitteelle
- vikojen luokittelu esim. syiden mukaan puuttuu tai on puutteellinen
- kirjattujen vikojen vaikutusta prosessin toimintaan ei kirjata
- kunnossapidon tietojärjestelmät ja tuotannonohjausjärjestelmät eivät linkity keskenään esim. seisokki ja katkoaikatietojen osalta.

## 4.2 Mahdollisia syitä kirjausten vähäisyydelle

Kunnossapidon tietojärjestelmiin tehtävät kirjaukset ovat tapahtumien määrään nähden vähäisiä, vaikka tekniset valmiudet kattavaan tietojen saantiin nykyistenkin järjestelmien avulla olisi. Mahdollisia syitä tähän voivat olla esim.:

- Vian sattuessa ja kiireessä ei ehditä tehdä kirjausta ja myöhemmin se unohtuu.
- Henkilöstö ei välttämättä tiedosta tiedonkeruusta saatavaa hyötyä ja kirjaaminen koetaan ylimääräiseksi rasitteeksi. Selkeä motivaatio kirjaamisen suorittamiseksi puuttuu
- Inhimillisiä virheitä ei haluta kirjata.
- Vian syyn selvittäminen on usein vaikeaa ja se voi selvitä vasta pidemmän ajan kuluttua, jolloin sen kirjaaminen ei tunnu mielekkäältä tai se unohtuu.
- Kerättyjen tietojen käyttötarkoitus ei ole selvä.
- Pienten, usein toistuvien korjausten kirjaaminen on turhauttavaa ja työlästä
- Tietojärjestelmä on vaikeakäyttöinen, eivätkä kirjauksista vastuussa olevat henkilöt osaa käyttää sitä riittävän hyvin.
- Henkilöstö ei saa palautetta tehdyistä kirjauksista.

## 5. Käyttövarmuustiedon keruumenetelmien tehostaminen

Tärkeä rooli käyttövarmuustiedon keruun tehostamisessa on tietojen tarkemmalla kohdistamisella, tietojen luokittelulla sekä henkilöstön koulutuksella ja motivoinnilla sekä automaatiojärjestelmien hyödyntämisellä tiedonkeruussa.

### 5.1 Tietojen kohdistaminen

Kaikki tiedot vioista, niiden korjaustoimenpiteistä, ennakkohuoltotöistä ja muista kunnossapitotöistä pitää kohdistaa laitepaikkatasolle. Laitepaikoille on kirjattava myös laitteiden vaihdot vaihdon syystä riippumatta. Vian tarkemmalla kuvauksella vika voidaan kohdistaa edelleen paikan laitteelle tai osalle. Laitepaikkakin edustaa usein useiden yksittäisten laitteiden muodostamaa kokonaisuutta. Tietyllä laitepaikalla oleva laite voidaan lisäksi ajoittain vaihtaa, jolloin laitepaikalle kertynyt tieto koostuu useiden laiteyksilöiden tiedoista.

Tulevaisuudessa vikaseuranta tulisi voida kohdistaa entistä enemmän nk. laitelajeille, jolloin kerääntyneestä määrämuotoisesta informaatiosta olisi laitetoimittajillekin enemmän hyötyä. Samoin tehtäillä laitelajitason seuranta voi monessa tilanteissa olla riittävä taso. Tämä laitelajijattelu edellyttää yhtenäis-

tämistyötä laitetoimittajien ja paperitehtaiden välillä, jotta esim. laitetoimittaja voisi tehdä käyttövarmuustarkasteluja useiden eri tehtaiden kesken luotettavasti.

## 5.2 Tietojen luokittelu

Hyvin toteutetulla vikatietojen luokittelulla voidaan tehostaa ja helpottaa laajasta tietomassasta tehtävien analyysien tekemistä. Jos vikatietojen kirjaaminen toteutetaan kuten edellä on kuvattu, voidaan viat luokitella esimerkiksi seuraavien luokitteluperiaatteiden mukaisesti:

- **Kriittisyys:** vika pysäyttää tuotannon, vika rajoittaa tuotantoa jne.
- **Vian syy:** ylikuorma, inhimillinen virhe, huono raaka-aine, lika, ym.
- **Vikaryhmä:** automaatiovika, mekaaninen vika, sähkövika jne.
- **Vian oire:** ei käynnisty, tukossa, harhatoiminto ym.
- **Havainto:** aistihavainto, ennakkohuolto, kunnonvalvontajärjestelmä.
- **Työlaji:** ennakkohuolto, huoltosopimus, kehitystyö, vika/korjaus mek., ym.
- **Ympäristöolosuhteet:** normaali, huomattavan likainen, märkä, ym.
- **Vian kohde:** laakeri, tela, akku, I/O-liitäntä, kytkin, ym.
- **Vian korjaustoimenpide:** korjaus, vaihto, huolto/tarkastus, viritys, muutostyö, ei toimenpidetarvetta, ym.

Suurin hyöty vikojen luokittelussa on tiedon jatkoanalysoinnin merkittävä helpottuminen, koska luokiteltu tieto tallentuu määrämuotoisena. Lisäksi kynnys syöttää tarvittavat tiedot tietojärjestelmään pienenee, kun kirjoitettavan tiedon osuus vähenee. Mahdollisuus kirjoittaa tekstiä tulee kuitenkin olla olemassa tarkempia kuvauksia varten ainakin tehtyjen korjauksien, vian oireen ja vian syyn osalta. Laitetoimittajan kannalta paras tilanne olisi, jos eri tehtailla olisi mahdollisimman yhtenäinen tapa luokitella vikatietoja. Paperi- ja selluteollisuuteen olisi mahdollista kehittää jopa oma vikatietojen käsittelystandardi. Luokittelua on kuvattu yksityiskohtaisemmin viitteessä Konola & Mäki, 1999.

### **5.3 Henkilöstön motivointi ja koulutus**

Tietojärjestelmien kehittämisen lisäksi tulisi kiinnittää huomiota kirjauksia tekevien henkilöiden motivointiin ja koulutukseen. Vaikka käytössä olisivat kuinka helppokäyttöiset ja tehokkaat järjestelmän ei tarvittavia tietoja järjestelmään kerry ilman ihmisten tekemiä kirjauksia. Kirjauksista vastuussa oleville henkilöille tulisi korostaa tiedonkeruun tärkeyttä ja tulosten hyödynnettävyyttä myös heidän oman työnsä onnistumisen kannalta. Koulutuksen aikana on tuotava selkeästi esille tietojen hyödyntämisen periaatteet, jolloin turhat pelot tietojen käyttötarkoituksesta voidaan poistaa. Tietojärjestelmien tehokkaan käytön edellytys on yrityksen johdon sitoutuminen asiaan.

Mikäli yrityksessä ollaan ottamassa käyttöön kunnossapidon tietojärjestelmää, tulisi koulutus järjestelmän käyttöön aloittaa, mikäli mahdollista, jo ennen järjestelmän käyttöönottoa. Lisäksi koulutusta tulisi vaiheistaa niin, että osa koulutusta järjestettäisiin sitten, kun käyttäjillä on jo hieman kokemusta järjestelmän käytöstä. Tällä tavoin välttäisiin negatiivisten asenteiden muodostumiselta ja saataisiin kunnossapidon tietojärjestelmä heti tehokkaaseen käyttöön. Koulutuksen laatuun tulisi kiinnittää erityistä huomiota, sillä jo nyt useilla laitoksilla henkilökunnan koulutuspäivien määrä on ääri rajoilla vaikeuttaen päivittäisten työtehtävien tekemistä. Koulutuksen tulisi keskittyä olennaiseen ja sen tulisi vastata koulutettavien henkilöiden tarpeita.

## **6. Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen tiedonkeruussa**

Tiedonkeruun kehittämishankkeessa on kokeiltu myös erilaisia automaattisen tiedonkeruun mahdollisuuksia. Yksi tällainen kokeilu on laitteen turvakytkimen kiinni/auki- asentotiedon hyödyntäminen. Turvakytkimen asentotiedon avulla voidaan saada selville automaatiojärjestelmän avulla laitteen korjausaika sekä vikataajuus. Tyypillisesti laitetta korjattaessa kyseisen laitteen turvakytkin käännetään työn suorittamisen ajaksi auki ja työn suorittamisen jälkeen kiinni. Kokeilu toteutettiin tekemällä prosessinohjausjärjestelmään ohjelmasovellus, jonka avulla tiedot laitteen turvakytkimen käytöstä tallentuvat tehtaan historiatietokantaan. Tallentuneiden tietojen perusteella sovellus laskee aikaa, jonka turvakytkin on ollut päällä ja laite näin pois tuotannollisesta käytöstä.

Sovellutuksen avulla saadaan selville yksittäisen korjauksen kesto sekä laitteen vika/korjaustaajuus pidemmällä ajanjaksolla.

Sellu- ja paperiteollisuudessa olisi mahdollista erilaisilla anturoinneilla ja jo olemassa olevilla järjestelmillä seurata yksittäisten laitteiden osalta laitteen käytettävyyttä ja määrittellä erikseen ne ajat, jolloin laite seisoo korjauksen takia tai jostain muusta syystä. Sovellukset joudutaan kuitenkin aina laatimaan tapauskohtaisesti.

## **7. Laitetoimittajan visio keskitetystä käyttövarmuustiedon hallinnasta**

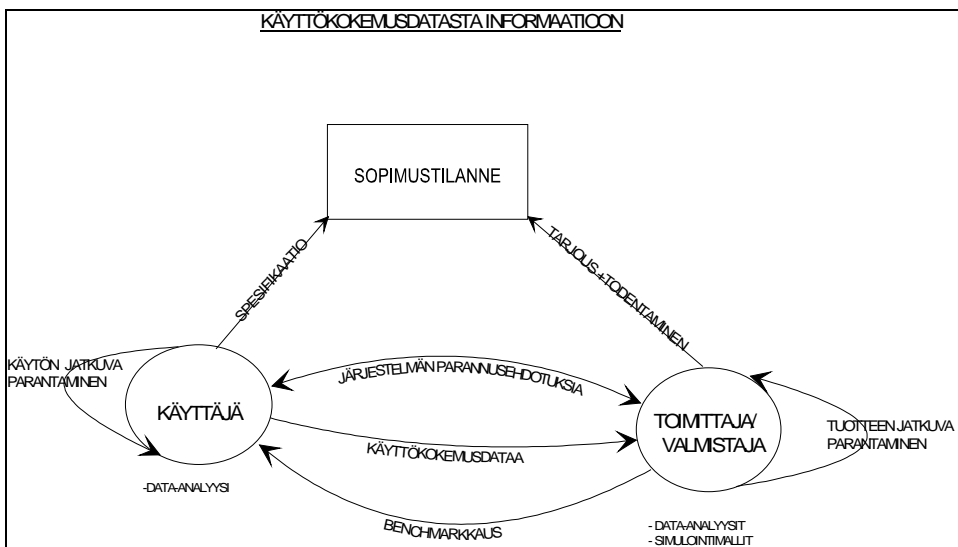
Laitetoimittajan näkökulmasta katsoen eri tehtailla tulisi suorittaa vikatietojen kirjaaminen, kohdistaminen ja luokittelu mahdollisimman standardoiduilla menettelytavoilla ja järjestelmillä. Tällöin laitehistoriatietojen siirto laitevalmistajan keskitettyyn vikatietopankkiin olisi helppoa ja taloudellisesti järkevää. Kun tiedonsiirto tehdään moderneilla tietoliikenneyhteyksillä, voidaan asiakkaan tietoturva taata kaikissa tiedonkäsittelyvaiheissa tiedonsiirrosta asiakastehtaalla tallennukseen ja käsittelyyn tietopankissa. Tietoliikennelinkit laitevalmistajan ja tehtaiden järjestelmien välillä mahdollistavat myös entistä tehokkaammat ja tarkemmin kohdistetut laitetoimittajan huoltopalvelut.

Keskitetty vikatietojen keruu ja analysointi mahdollistaa myös laitetoimittajan ja tehtaiden yhteistyön, jolla voidaan tehtaiden järjestelmiä ja toimintatapoja kehittää yhä tehokkaimmiksi. Esimerkkejä kehitys- ja analysointi-projekteista voivat olla kunnossapitoanalyysit ja käyttövarmuustarkastelut.

Laitetoimittajan keskitetyn vikatietopankin kautta on jatkossa mahdollista tarjota tehtaalle erityyppisiä benchmarking-analyysejä laitteiden toimivuudesta ja kunnossapidon tehokkuuksista. Tällaiset vertailuanalyysit tehdään aina anonyymeinä, jolloin tietojen luottamuksellisuus säilyy.

## 8. Yhteenveto

Tiedonkeruun kehittämisessä on kysymys paljon tietojen mekaanista keräämistä laajemmista asioista. Koko asian ytimenä on luoda yrityksessä sellaiset olosuhteet ja yrityskulttuuri, että henkilöstö kokee käyttövarmuuteen liittyvien tietojen kirjaamisen tärkeäksi ja kirjattuja tietoja analysoimisella vaikutetaan koko laitoksen toiminnan tehostumiseen. Tiedon keruu ja kerätyn tiedon hyödyntäminen sekä laitoksen oman toiminnan kehittämisessä että laite-toimittajan tuotekehityksessä saa aikaan informaatiovirtoja, joita on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Käyttövarmuuden hallinnan informaatiovirtoja valmistajan/toimittajan ja käyttäjän näkökulmasta (Rosqvist et al. 1997).

Tiedon keruun ja hyödyntämisen lisääntymistä voidaan edesauttaa kehittämällä tietojärjestelmiä yhä helpokäyttöisemmiksi mm. parempien käyttöliittymien ja tietojen esiluokittelukenttien kehittämisen avulla. Työntekijöille on myös tarjottava laadukasta koulutusta tietojärjestelmien käytöstä useammassa vaiheessa järjestelmiä käyttöön otettaessa, antaa palautetta kerätyistä tiedoista ja tuoda sopivissa yhteyksissä esille tiedonkeruun tärkeys ja sen avulla saavutettavat hyödyt.

Laitetoimittajan osuus tiedonkeruun ja analysoinnin kehitystyössä tulee olemaan erittäin keskeinen, jotta konelinjan tehokkuutta ja käyttövarmuutta voidaan yhteistyössä tehtaiden kanssa ylläpitää ja kehittää koko elinkaaren ajan.

## **Kirjallisuusviitteet**

1. Konola, J. & Mäki, K. M. Käyttövarmuustiedonkeruun tarpeet ja mahdollisuudet. RIS B001. Tampere, 1999. 12 s.
2. Rosqvist, T., Kortelainen, H. & Bergman, E. Käyttövarmuusdatasta informaatioon. Tampere: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. 30 s. (Raportti VALB 286).

# Automatic process diagnostics

Sara Paunonen, M.Sc  
Olli Saarela, M.Sc.  
Risto Ritala, Dr.  
KCL Development Oy  
Espoo, Finland

## Abstract

Lately intelligent field devices have emerged to the paper mills. Their capabilities for self-diagnostics form a step towards more reliable and efficient process operation. However, it is not sufficient to analyse individual process components separately. To gain efficient production the paper making process needs to be diagnosed as a larger entity as well. This analysis of the overall process behaviour is not straightforward. The process has obvious and hidden dependencies that complicate the refining of the measurement data to useful information about the current status of the process. Automatic process diagnostics is a modern tool for controlling the paper making process.

## 1. Introduction

At present process analysis and diagnostics are based mainly on operators' experience and visual examination of the measurement trend plots. Many advantages can be gained by automating diagnostic activities. The performance of computer-based diagnostics depends neither on human skills, mental alertness, nor experience. The automatic diagnostics proves to be most profitable when monitoring variables representing both the runnability of the mill and the product quality. As a result the degradation of the product quality and the defects of process components are detected early enough.

An automatic process diagnostic system is a useful aid in process analysis performed by the operating personnel. As a result of the diagnostic calculations the detected fault symptoms and the candidates for their original cause are found out.



The generation of these results consist of many successive tasks, examining measured process data, which implies a certain degree of inherent unreliability. On the other hand only the mill personnel have the needed general knowledge of the process to validate the results of the diagnostic system. If the user understands and accepts the detected fault, the candidates and the reasoning, which lead to these results, he can take the needed corrective actions.

This paper presents the general tasks of diagnostics, the diagnostics performed in KCL-WEDGE and the future range of work of KCL about automatic process diagnostics.

## **2. Diagnostic tasks**

The tasks performed by a diagnostic system can be divided into typical phases. First the measurement signal must be to some extent validated and conditioned. The validated signal is searched for symptoms of predefined process faults and malfunctions (fault detection). The original cause of the detected fault symptoms can be isolated to the certain sub process and identified inside this sub process depending on how accurate fault models can be used. Finally the system may explain the fault and suggest the proper way to correct it. Most diagnostic systems do not perform all these tasks. The final step is the actual correction performed by the operator.

### **2.1 Data validation and signal conditioning**

In real world the measurement data is, to a certain degree, incomplete. Some common problems in measurement data include:

- There are missing points in the signal due to sensor malfunctions or communication disturbances.
- The imperfections in calibration cause signal drifting.
- Web breaks cause sudden changes in signal level.
- The signal can have suspiciously high or low values, which are out of the physical measurement range.

- The signal can have features that seem correct when values of only one signal are examined, but which do not fulfil the mass balance equations with other measured signals.

In an interactive KCL-WEDGE analysis the user normally removes suspicious data intervals from the signals before applying the actual diagnostic tools. In performing automatic diagnostics this kind of information must be automatically recognized, regenerated or otherwise handled. This automatic data validation is not trivial, and is the focus of the ongoing research project.

## **2.2 Diagnostic calculations**

Fault detection is a task where the deviations from the normal condition of the process are detected. As part of the system configuration, there must be a definition of what is acceptable performance of the mill and what is not. Usually this information is given in the form of parameters. The initial values of the parameters can be calculated automatically but the user must confirm them.

Fault detection can be performed by a number of different methods, each methods being best suited for certain types of process faults. In case of model-based diagnosis the system models are used with a certain set of preconditioned plant measurements to estimate the values of model variables during normal operation. The models are constructed according to the physical composition of a sub process. The estimates are compared with the parameters representing normal operation. A difference between the estimated model parameters and normal condition parameters implies a process malfunction.

An essential precondition for continuous process diagnostics is a sufficient measurement sensor density in the process. The available sensor density can constrain the selection of the diagnostic systems available. Normally model based diagnostic systems require quite a dense process instrumentation, and a significant amount of work in system configuration and maintenance. When applying model-based diagnosis proves to be to laborious, other methods can be selected.

A simple but efficient way of performing fault detection is to extract features from a single measurement or a combination of measurements. A feature is a certain form of the measurement signal.

Fault detection is followed by fault isolation where the fault is located in the process. Again, different methods can be used for this task. The isolation can be done by identifying a parameter in a physical process model. The origin of the malfunction can be sought by black box methods like MAR or PCA analysis. In KCL-WEDGE the isolation is based on fitting the signal feature, which was detected as malfunction and consequently raised the alarm, to the candidate signals with the least squares method.

### **3. Diagnostics in KCL-WEDGE**

The KCL-WEDGE process analysis system is widely used in paper mills. The user can easily visually examine the measurement trend plots and apply a set of diagnostic tools for interactive process analysis. The tools implemented in KCL-WEDGE address primarily problems with the dynamic behaviour of industrial processes. The principal diagnostic method implemented in KCL-WEDGE is the multivariate autoregressive (MAR) modelling, which addresses fluctuation problems in dynamic feedback controlled processes. These fluctuations are typically caused by, e.g., badly turned control loops, actuator wear, increased sensor noise, and variations in raw material quality. The advanced mathematics has been wrapped in an easy to use analysis tool (MAR Navigator).

Diagnostic tools for other types of process disturbances are available as well. For example, sudden changes in the pH of tail water or the components of the stock may denote difficulties in the paper making process. Gradual changes may be difficult to notice by an operator. Simple balance calculations detect inconsistencies in measurement signals.

So far the diagnostic tools in KCL-WEDGE have mainly been used interactively. As the first phase of automating and enhancing the KCL-WEDGE tools for process diagnostics, KCL participated in an European research project Esprit 20498 [1]. Diagnostic tools based on statistical process control (SPC and PCA) are also available.

### 3.1 Architecture of the continuous monitoring

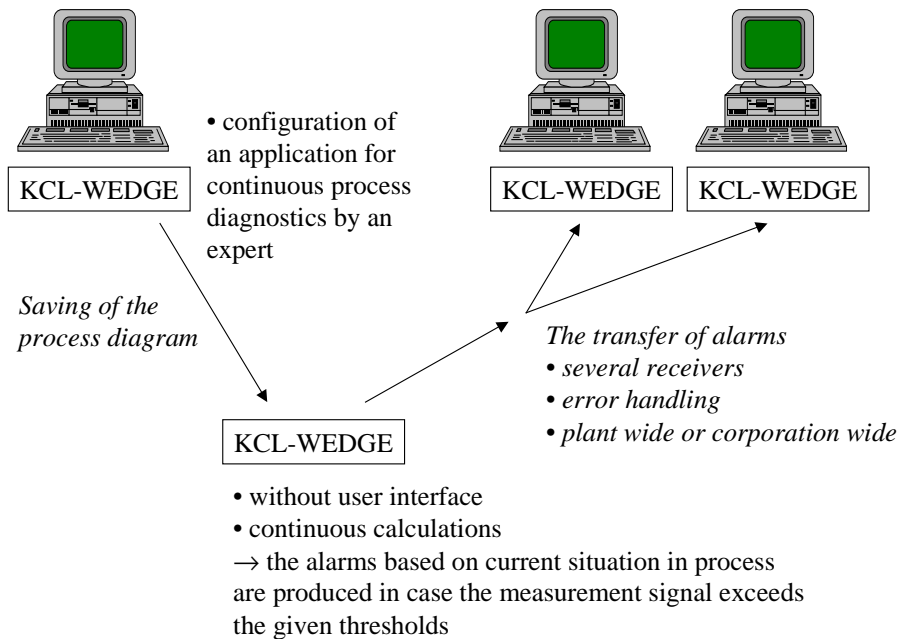


Figure 1. Architecture of continuous monitoring in KCL-WEDGE.

Figure 1 shows the software architecture of the continuous process diagnostics in KCL-WEDGE. All the information needed for performing automatic diagnostics is gathered in a typical process diagram used in KCL-WEDGE. In this diagram the user defines what measurements or values he wants to monitor, what are the parameters for signal conditioning and the threshold values for normal operation. Also the general parameters for diagnostics (data retrieval intervals, data lengths, time level used, the isolation method and its parameters) are defined. The configuration is edited with a graphical user interface. New configuration takes effect as soon as the process diagram is saved.

The KCL-WEDGE without the user interface controls the actual continuous operations and raises alarms based on the configured process diagram and the current measurement data values. It also automatically invokes diagnostic tools, so that an end user receives the diagnostic results together with the alarm itself. In addition, the alarm contains the necessary bookkeeping information needed, so that

the end user can invoke an interactive analysis with a single click of the mouse. Several end users can subscribe the alarms, each possibly selecting a subset of entities being monitored.

The data communication is based on an object bus. With this decentralized solution the system is more robust against communication failures, and more importantly, it is possible to distribute the alarms and the diagnostic results to several end users through the network. The alarms are explicitly stored in a separate event server.

### 3.2 Using the diagnostic application

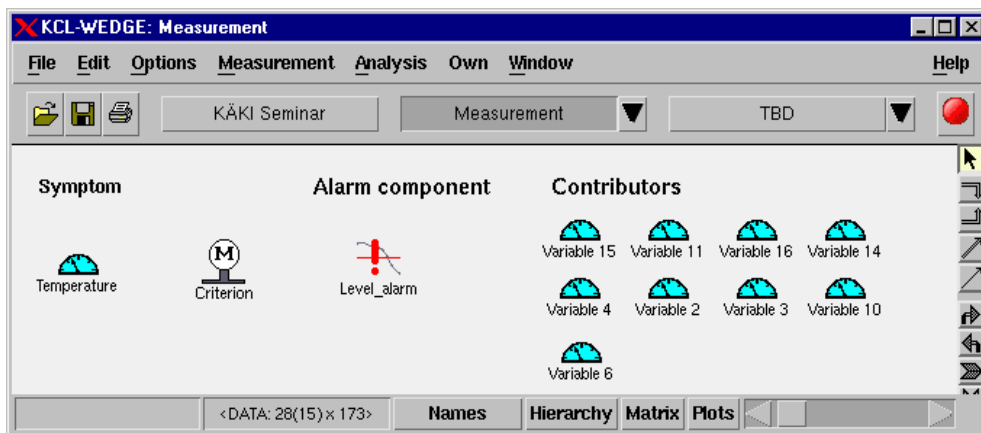


Figure 2. The KCL-WEDGE application for the background diagnostics.

The background diagnostics application is very easy to implement and use. Figure 2 shows a typical process diagram enhanced with the components needed in diagnostics. The essential components are the monitored measurement (“Temperature”), the criteria for the measurement (“Criterion”) and the alarm component (“Level\_alarm”). In this example the alarm component raises an alarm if the measurement is out of the limit 54,3. The contributors represent process measurements, which *possibly* have an influence on the symptom monitored by the alarm component. The diagnostic tools are configured to check their actual influence whenever the alarm is raised. The colour of the alarm component indicates whether the alarm is currently on.

The alarm button can be seen in the top right corner of figure 2. List of all the alarms can be seen by clicking this button with the mouse. The diagnostic results can be viewed by selecting an alarm from the list and clicking the “show” button. Figure 3 shows this result of the fault isolation. The uppermost curve is the monitored measurement and the detected level change is highlighted. Next curves are four best contributors to the level change based on least squares method. The best matches in the curves are highlighted.

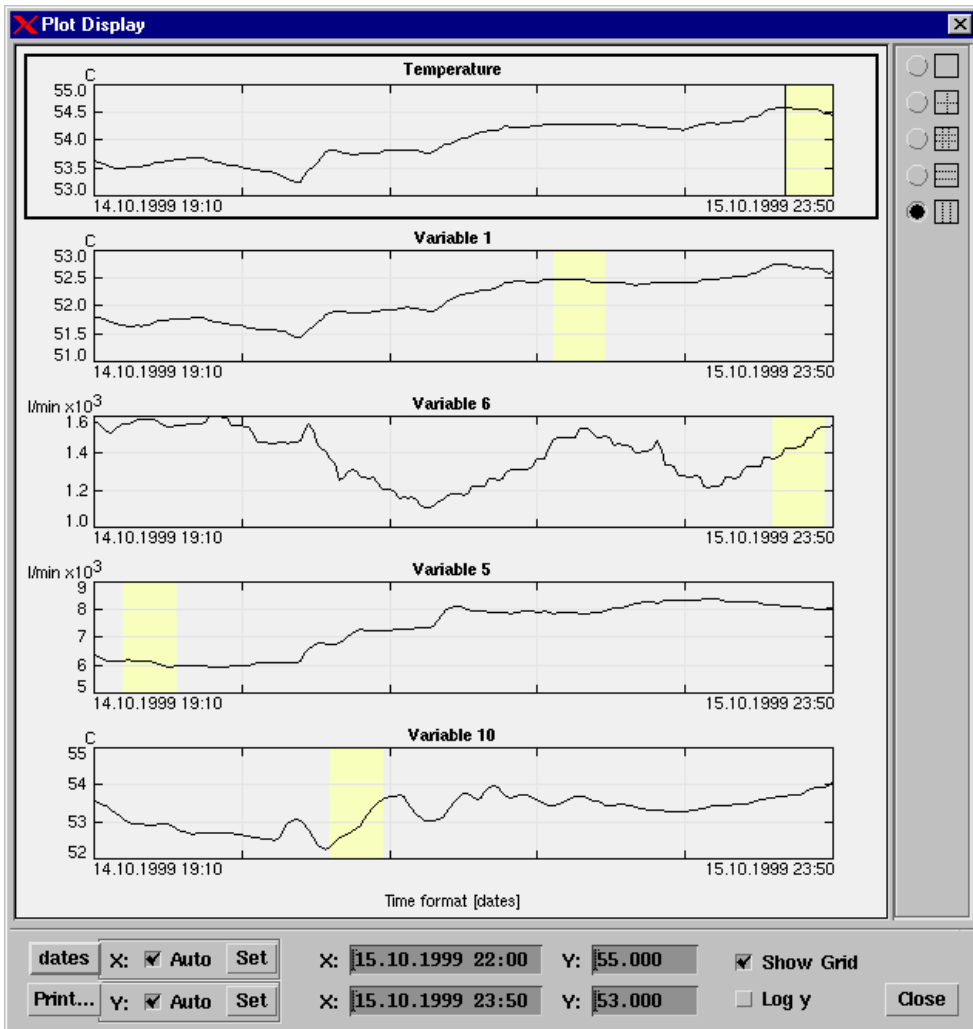


Figure 3. Result of the isolation. The highlighted period in the uppermost curve is the detected symptom.

## 4. Conclusions and future work

The KCL-WEDGE process analysis system is used in on-line diagnostics at paper mills. The applications focus more in the plant-wide operation of the process than in the operation of individual process components. When an alarm is raised, the corresponding diagnostic tool is executed automatically, and the process operator receives the diagnostic results together with the alarm indication.

A key feature in the reliability of the results from an on-line diagnosis is the reliability of the measurement data. The research underway places a strong emphasis on the validation and conditioning of the measurement data.

## References

1. Chantler, M. J., Bonavita, N., Kayser, T., Mathisen, K. W. & Saarela, O. PRIDE: An integrated architecture and tool set for industrial model-based diagnosis. IEEE Conference on Control Applications, 1–4 September 1998.
2. Mathisen, K. W., Mjaavatten, A. & Kooijmans, R. A. G. Industrial Implementation and testing of model-based diagnosis in the PRIDE project. In: Dhurjati, P.S. & Cauvin, S. (Eds.), Preprints from IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries. Solaize (Lyon), France, 4 -5 June 1998.
3. Cermignani, S. & Torielli, G. GIOTTO: A diagnostic system for continuous static processes. Proceedings of the International Conference on Automation, Milan, Italy, 23–25 November 1993. Pp. 589–601.

# Korroosion monitorointi sellutehtaan valkaisimossa

Irina Aho-Mantila, erikoistutkija  
Kari Saarinen, erikoistutkija  
VTT Valmistustekniikka

Jari Hämäläinen, erikoistutkija  
VTT Automaatio  
Espoo

## Tiivistelmä

Nykyaikainen valkaisu voidaan toteuttaa joko klooridioksidilla tai kloorittomilla valkaisukemikaaleilla. Klooridioksidi on voimakas hapetin ja voi yhdessä prosessissa esiintyvien kloridi-ionien kanssa aiheuttaa laitteistoihin syöpymää lyhyessäkin ajassa. Klooridioksidin vaikutuksiin on perinteisesti varauduttu materiaalinvalinnan keinoin käyttämällä kohteissa titaania tai lujitemuoveja. Runsaasti seostettujen ruostumattomien terästen korroosionkestävyys on myös osoittautunut hyväksi prosessiolosuhteiden pysyessä normaaleina. Korroosion monitorointi on keino valvoa laitteistojen kuntoon vaikuttavaa korroosioalttiutta prosessiolosuhteiden vaihdellessa esimerkiksi käyntiinlähtövaiheiden tai prosessimuutosten aikana.

## 1. Johdanto

Korroosion esiintymistä on perinteisesti pyritty estämään materiaalinvalinnan, kunnossapitotoimien ja erilaisten suojausmenetelmien avulla. Käyttövarmuuden lisääminen edellyttää jatkossa uusien menetelmien käyttöönottoa. Kunnonvalvonta kuuluu osana nykyaikaiseen kunnossapitoon. Kunnonvalvonta ymmärretään usein värähtelyjen valvontana, koska useimmat laitteet värähtelevät ja monet viat näkyvät värähtelyissä. Laitteistojen eheyden valvontaan on



kuitenkin käytettävissä useita muitakin menetelmiä, joista korroosion monitorointi on yksi.

Klooridioksidivalkaisussa prosessiolosuhteet voivat vaihdella. Erityisesti laitoksen tai uuden kuitulinjan käyntiinlähtövaiheet tai ajolinja- ja prosessimuutokset voivat aiheuttaa väliaikaisesti suuriakin heilahteluja prosessiolosuhteisiin. Prosessiolosuhteet muuttavat korroosio-olosuhteita, jotka ruostumattomien terästen kyseessä ollen eivät voi paljon poiketa tavanomaisista ilman että seurauksena on korroosiovaara.

Selluteollisuudessa käytetään klooridioksidin rinnalla kloorittomia valkaisu-kemikaaleja. Ruostumattomien terästen käyttö on lisääntynyt selluteollisuudessa, koska ne kestävät molempia valkaisuolosuhteita, ne ovat edullisempia kuin titaani ja kestävät lujitemuovia paremmin korotettuja lämpötiloja. Ruostumattomien terästen kannalta haitallisia ovat suurista kemikaaliannoksista aiheutuvat kemikaalijäämät ja korkeat kloridi-ionipitoisuudet. Kloridi-ionipitoisuuksia kohottaa myös vesikiertojen sulkemisasteen kasvu selluteollisuudessa.

Työssä selvitetään korroosion monitoroinnin ja siihen yhdistetyn prosessin-hallinnan mahdollisuuksia sellutehtaan pesureiden kunnonvalvontaan. Työssä on mukana VTT Valmistustekniikan lisäksi VTT Automaatio ja teollisuusosa-puolina Ahlstrom Machinery, KCL Development, Neles Automation, Savcor Consulting ja UPM-Kymmene.

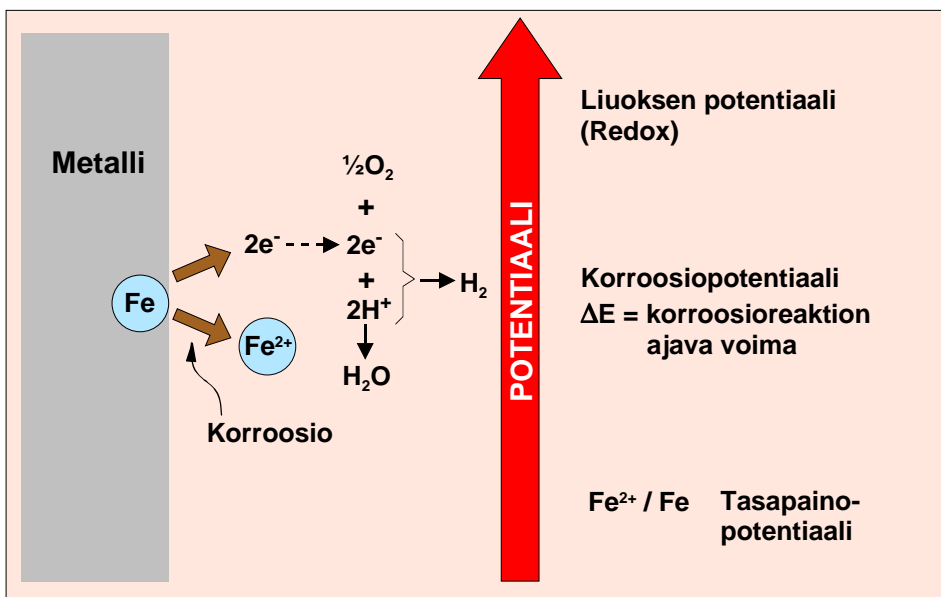
## **2. Korroosio klooridioksidivalkaisussa**

Ruostumattomien terästen korroosioon klooridioksidivalkaisussa vaikuttavat erityisesti kemikaalijäämät. Valkaisukemikaalina käytetty klooridioksidi ei aina kulu valkaisureaktioissa, vaan sitä jää liuokseen. Klooridioksidi on hapetin, joka nostaa teräksen sähkökemiallista potentiaalia. Korroosion estymiseksi kloori-dioksidijäämien pitäisi pysyä alle 50 mg/l (aktiivikloorina), jos kyseessä on runsaasti seostettu ruostumaton teräs (1, 2). Tavalliselle ja haponkestävälle teräkselle raja on matalampi ja käytännöllisesti katsoen ne eivät, ilman erityisolosuhteita kuten virtausta, kestä lainkaan klooridioksidijäämiä.

Hapettavissa olosuhteissa korroosio voi esiintyä joko paikallisena korroosiona tai yleisenä, transpassiivisena liukenemisena. Paikallinen korroosio voi olla pistesyöymistä tai rakokorroosiota, joka ydintyy helpommin kuin piste-korroosio. Korroosionmuoto on hapettavuuden lisäksi riippuvainen teräksen seostuksesta. On ehdotettu, että yleinen, transpassiivinen syöpyminen on yhteydessä teräksen seosaineisiin kromi (Cr), molybdeeni (Mo) ja nikkeli (Ni) (3, 4, 5). Runsaasti seostettujen terästen hitsausliitokset, jotka hitsataan nikkelipohjaisilla lisäaineilla voivat olla alttiita liukenemiselle klooridioksidivalkaisun erittäin hapettavissa olosuhteissa (6).

### **3. Korroosion monitorointi**

Korroosiovaaran monitorointi pesurilla perustuu teräksen potentiaalimittaukseen. Pesurien toimintaa ja korroosion monitorointia on esitelty aiemmin (7). Teräksen sähkökemiallinen potentiaali mitataan liuoksessa teräksen ja referenssielektrodin välillä, kuva 1. Poikkeusolosuhteissa potentiaali nousee useita satoja millivolteja normaalitilanteeseen verrattuna. Potentiaalimonitorointi on epäsuora korroosion monitorointimenetelmä, se ei suoraan mittaa korroosionopeutta. Potentiaalimittauksen etuna on, että se on helppo toteuttaa tehdasolosuhteissa. Korkeat potentiaalit kertovat, että korroosion vaara on olemassa, eivät suoraan sitä, että korroosiota todella tapahtuu. Toisaalta kuitenkin tiedetään, että jos potentiaalit ovat matalia, korroosiota ei tapahdu.



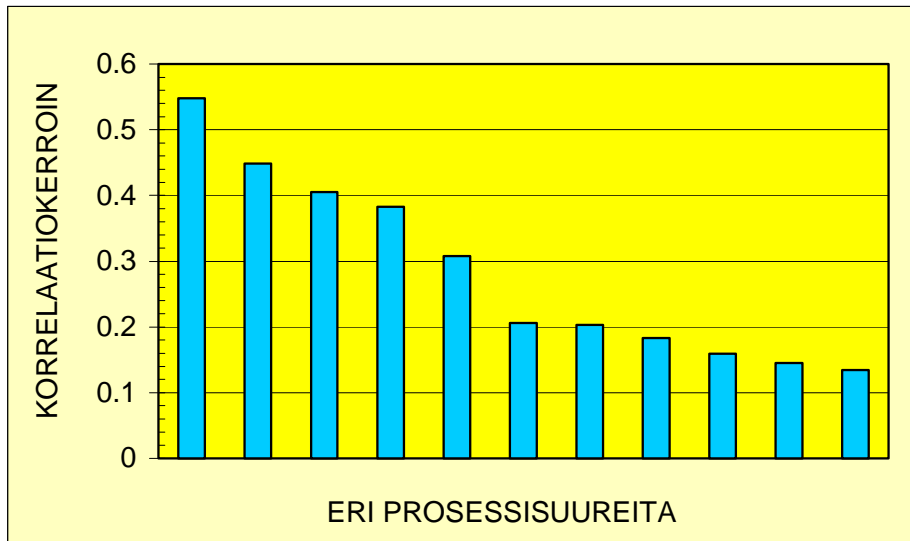
Kuva 1. Teräksen korroosipotentiaali asettuu yleensä teoreettisen tasapainopotentiaalin ja liuoksen potentiaalin välille. Mitä kauempana korroosipotentiaali on tasapainopotentiaalista, sitä suurempi on korroosioreaktion ajava voima ja sitä suurempi on korroosiovaara.

#### 4. Korroosioon vaikuttavat prosessiolosuhteet sellutehtaan valkaisuolinjalla

Sellutehtaan valkaisuolinja koostuu useista eri vaiheista, joissa sellumassa valkaistaan ja pestään. Kun tarkasteltiin valkaisun loppupään pesurin olosuhteita huomattiin, että linjan alkupään tapahtumat vaikuttavat prosessiolosuhteisiin loppupäässä. Prosessi- ja korroosio-olosuhteiden ymmärtämiseksi mitattiin useiden prosessisuureiden arvoja kuitulinjalla. Työn kuluessa prosessisuureita lisättiin seurattavien joukkoon siten, että loppuvaiheessa mukana oli kaikkiaan noin 30 suuretta.

Mitattuja prosessisuureiden arvoja ja korroosipotentiaalin arvoja verrattiin toisiinsa tilastollisen analyysiohjelman avulla (8). Tilastollisella analyysillä laskettiin aineiston muuttujien keskiarvot, hajonnat, minimi- ja maksimiarvot sekä pareittaiset korrelaatiot. Tilastollisen analyysin perusteella korroosio-

potentiaalinsa kanssa voimakkaimmin korreloivat kemikaalien syöttösuureet, jäämämittausten tulokset, tuotantoa kuvaavat parametrit ja massan vaaleutta kuvaavat tekijät. Korrelaatiokertoimet eivät olleet kovin suuria, mutta ne olivat tilastollisesti merkitseviä (kuva 2).



*Kuva 2. Eri prosessisuureiden ja korroosipotentiaalinsa väliset korrelaatiokertoimet tietyllä ajanjaksolla. Tilastollinen analyysi mahdollisti otantojen tarkan analysoinnin.*

Tilastolliseen analyysiin päädyttiin sen vuoksi, että jäämämittausten ja korroosipotentiaalimittausten välillä ei ollut johdonmukaista korrelaatiota. Aineiston tilastollinen käsittely toi selittävinä tekijöinä mukaan muita suureita kuten tuotantoa ja vaaleutta kuvaavat tekijät. Klooridioksidin jäännökset eittämättä nostavat korroosipotentiaalia, mutta tulosten perusteella voidaan esimerkiksi olettaa, että jäännösten kulumista tapahtuu vielä pesurilla.

## 5. Prosessiolosuhteiden hallinta

Korroosiota aiheuttavat olosuhteet syntyvät klooridioksidivalkaisussa kemikaaliannoksista, jotka eivät syystä tai toisesta kulu valkaisuainelinjalla suunnitellusti. Prosessin hallinta, jonka tavoitteena on välttää korroosiota aiheuttavat olosuhteet, johtaa tässä tapauksessa todennäköisesti entistä tarkempaan valkaisuainekemikaalin

annosteluun. Prosessin hallintaa tuskin toteutettaisiin vain korroosionäkökohdista lähtien, mutta tässä tapauksessa korroosion estämiseen tarvittavat toimenpiteet ovat myös prosessin ja laitoksen kannalta edullisia.

Korroosion huomioonottava prosessin ohjaus voi saada lisää painoarvoa, kun halutaan jatkaa laitoksen elinikää, toteuttaa prosessimuutoksia ja edelleen vähentää vedenkäyttöä. Pieniä komponentteja tai putkistoja voidaan vaihtaa ja korjata seisokkien yhteydessä, mutta suurten, keskeisten ja monimutkaisten komponenttien kunnonvalvonta on kustannustehokkaampaa kuin kaikkien potentiaalisten prosessiolosuhteiden huomioonottaminen suunnittelussa ja valmistuksessa.

## 6. Johtopäätökset

Kunnonvalvonnan rooli kunnossapidossa korostuu ja kunnonvalvontaan kehitetään jatkuvasti uusia menetelmiä. Korroosion monitorointiin on viime aikoina usein ollut esillä sähkökemiallisen kohinan (EN, Electrochemical Noise) mittaus (9). Menetelmässä mitataan kahden identtisen elektrodin välistä potentiaali- tai virtakohinaa eli pienellä taajuudella ja amplitudilla tapahtuvaa huojuntaa. Myöskin pintafilmin vastusmittauksella (CER, Contact Electric Resistance) on sovelluskohteita. Menetelmässä mitataan toisiaan vasten painettujen mittapäiden välistä vastusta, joka on riippuvainen pintaa suojaavista kerroksista.

Korroosion monitorointi edellyttää tietoa prosessissa mahdollisista korroosio- muodoista, korroosio- muotoon sopivaa mittausmenetelmää ja kohteeseen räätä- löityjä mittauspäitä. Kaikkien näiden osalta tehdään kehitystyötä erilaisissa sovelluskohteissa.

Korroosipotentiaalın ja prosessiolosuhteiden monitorointi sekä tilastollinen tarkastelu ovat osoittaneet, että korroosioon vaikuttavia tekijöitä voidaan havaita. Mahdollisuus korroosion huomioonottavaan prosessinohjaukseen on olemassa ja se edellyttää diagnostiikkaan liittyvien apuvälineiden kehittämistä.

## Kirjallisuusluettelo

1. Troselius, L. & Andreasson, P. Optimal use of stainless steels in ClO<sub>2</sub> bleaching service. 9th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry. Ottawa, Canada, 26–29 May, 1998. Pp.103–109.
2. Grocki, J., McCaur & Taylor, R. Performance of a 6% Mo austenitic stainless steel in bleach washer service. Fifth International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry. Vancouver, Canada, 3–6 June, 1986. In: Pulp and paper industry corrosion problems, Vol. 5. NACE, CPPA. Pp. 89–97.
3. Arlt, N. Effect of iron on transpassive dissolution of stainless alloy. Corrosion'95, Paper no 577. Houston, TX: NACE, 1995. 13 p.
4. Voigt, C., Werner, H., Kirchheiner, R. & Schambach, L. Die Bedeutungen der pH-abhängigen Durchbruchsreaktionen bei NiCrMo-Werkstoffen in Medien der Chemie- und Umwelttechnik mit hohem Redoxpotential. Werkstoffe und Korrosion, 1995. Vol. 46, pp. 27–32.
5. Wallén, B, Alfonsson, E., Brorsson, A. & Tuveson-Carlsson, L. Influence of filler metal composition on the corrosion resistance of stainless steel weld in strongly oxidizing chloride environments. Pulp & Paper Industry Corrosion Problems, 1995. Vol. 8, pp. 65–74.
6. Pohjanne, P. & Aho-Mantila, I. High alloy stainless steel (6% Mo) in bleaching applications. 9th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry. Ottawa, 26–29 May, 1998. P. 157–160.
7. Pulkkinen, E. Prosessiolosuhteiden hallinta laitoksen käyntinajovaiheessa – Sellun valkaisulinjan käyttövarmuus kilpailutekijänä. Teoksessa: Holmberg, K. (toim.) Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998. S. 65–72. (VTT Symposium 188)

8. The SAS system for Windows™. Release 6.12. TS Level 0020. SAS Institute Inc.
9. Varis, P. & Laitinen, T. Sähkökemiallinen kohina -menetelmä korroosion seurantaan, Kirjallisuusselvitys. Espoo: VTT Valmistustekniikka, 1999. 18 s. (Raportti VALB366)

# Metsäkoneiden luotettavuuden ja toiminnan mittaus

Jorma Eschner  
Plustech Oy  
Tampere

## Tiivistelmä

Timberjack luotettavuusprojektin yhtenä tärkeimmistä tutkimusalueista on metsäkoneiden testaukset sekä asiakkailta että omissa prototyyppikokeissaan. Asiakkaalla tehtävät koneiden luotettavuuden mittaukset eivät ole aivan uusia asioita, mutta tarkkaa tietoa koneiden käyttäytymisestä ja työaikojen seurannasta ei ole kerätty. Tieto, joka on saatu on hajanaista eri tavoin mitattua tietoa, jolloin laajoja yhteenvetoja koneiden käyttöajoista ja käytettävyydestä ei ole tehty.

Projektin alkuvaiheessa määriteltiin halutut tiedot, joihin haluttiin myös koneen toiminnan olosuhteiden kuvaus. Metsäkoneen ohjausjärjestelmä käyttää ja tuottaa valmista tietoa, jota voidaan käyttää hyväksi osana luotettavuus-tiedostosta, kuitenkin nykyinen järjestelmä tukee varsinaisesti koneen käyttöä, jolloin sen antama tieto sellaisenaan ei riitä tutkimustarpeisiin.

## 1. Tutkimustavat

Koska koneen tietojärjestelmää ei projektin aikana ollut mahdollista muuttaa ja kehittää, jäi vaihtoehtoiksi kerätä tieto manuaalisesti tai hankkia sopiva ulkopuolinen mittalaite tiedon keräämiseen. Osa koneista on varustettu ajan-seuranta ohjelmalla. Ohjelmaan kirjataan vuoron aloitukset ja lopetukset. Koneen käytön ohjelma tunnistaa tärinäanturilla ja taukojen ilmennettyä ohjelma kysyy tauon syytä joka voi olla huoltoa, korjausta tai tauko. Näihin kohtiin annetaan vielä tarkennus mikäli se on tiedossa.



Nopein tapa oli luonnollisesti aloittaa tiedon keräys manuaalisesti tekemällä haastatteluita ja pyytää koneen käyttäjää täyttämään päivittäin luotettavuusraportit. Tätä toimintaa varten kehitettiin kyselylomake, johon pyrittiin kirjamaan ne päivittäiset tiedot, jotka koneen tietojärjestelmä tuotti. Tähän kuuluu esimerkiksi leimikon koko, puun keskikoko ja edellä mainitut, ohjausjärjestelmän tulokset lisättynä korjauksen ja huollon tarkennukset ja vaihdetut osat.

Lista kerättävistä tiedoista

- Leimikon olosuhteet
- Puun määrä ja keskikoko
- Kokonaistyöaika
- Koneen tehokas käyttöaika
- Koneen tietojärjestelmän käyttö aika ja tarkistusmittaukset
- Huollot
- Korjaukset ja tarvittavat komponentit
- Korjauksen ja huollon odotukset
- Varaosien odotukset
- Tauot.

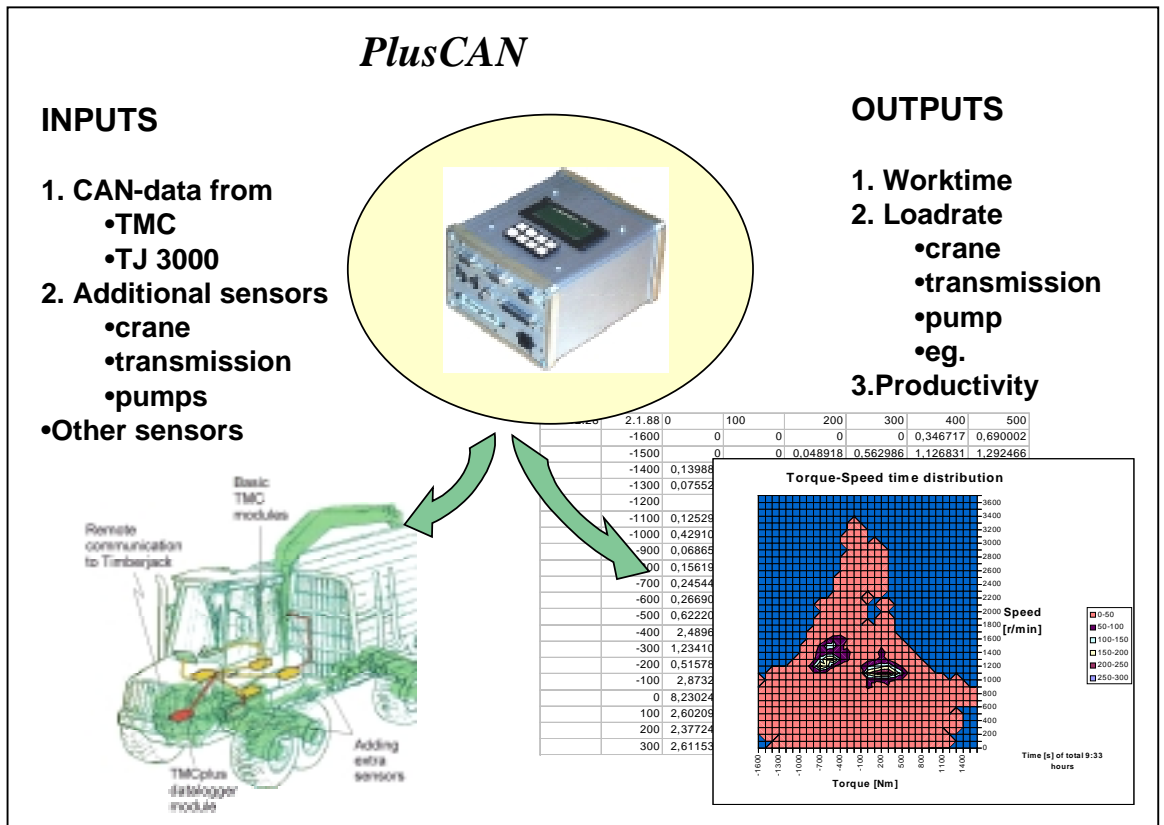
## **2. Tutkimuksen ongelmat**

Tiedon keräyksen aloitus osoittautui hieman ongelmalliseksi, koska alkunostuksen jälkeen lomakkeen täyttäminen säännöllisesti ei kaikilta onnistunut, ja lisäksi esimerkiksi koekoneiden kohdalta suunnittelijat tarvitsevat tarkempaa tietoa koneiden rasituksista ja toiminnan olosuhteista. Tähän tietoon ei riitä, että ilmoitetaan leimikossa olleen kiviä tai jyrkkiä rinteitä, vaan tarvitaan myös tarkkaa tietoa käytetyistä kierroksista hydraulipaineista tai koneen lämpötiloista.

## **3. Automaattinen mittalaite (PlusCAN)**

Projektissa on toteutetun mittalaitteen kehityksen tavoitteena oli kehittää laite, joka on hyvin yksinkertainen ja nopea asentaa. Mittalaitteen piti käyttää olemassa olevaa ohjaustietoa ja lisäanturointi ja johdotus piti olla minimaallista.

Toteutettu mittalaite kytketään koneen ohjausjärjestelmän CanBus-väylään ja kerää siellä olevan ja halutun informaation omaan tiedostoon aina kun kone on käynnissä. Mittalaite käynnistyy automaattisesti ja kerää päivän tai käyttöajan aikana tiedot omaan tiedostoon. Tarvittaessa järjestelmään voidaan liittää ylimääräisiä antureita, joita ei muuten tarvita koneen ohjausjärjestelmässä. Koska mittalaitteessa tieto käsitellään jo mittausvaiheessa, mittalaite voi mitata lähes aikarajoituksetta- jopa kuukausien ajan koneen toimintaa. Tarvittaessa tieto puretaan ulkopuoliseen tietokoneeseen sarjaportin tai modeemin kautta. Modeemilla voi myös lähettää uuden mittausohjelman. Mittausohjelma ja laitteet ovat suunniteltu niin, että soveltaminen on mahdollista myös muissa kuin metsäkoneissa.



## 4. Leimikkomittauksien tuloksia

Toistaiseksi manuaalimittauksella on kerätty tietoa kaikkiaan noin 40 000 tunnin käyttöajalta ja yli 500 työmaalta. Tuloksissa on jo riittävästi tietoa metsäkoneiden käyttöajan jakaumasta. Tulokset ovat huomattavasti odotettua paremmat, koska aikaisemmin tutkittua tietoa metsäkoneiden aikajakaumasta ei ollut.

Tilastolliseen vikaseurantaan ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin tarvitaan huomattavasti enemmän materiaalia. Tähän soveltuu parhaiten takuujärjestelmän tietokannat, joissa löytyy riittävät tiedot takuuajakauteen vikaseurantaan. Nykyisessä seurantajärjestelmässä saadaan kuitenkin arvokasta vikaseurantaa koneyksilöistä ja mahdollisesti suurimmat vikafrekvenssin omaavat komponentit, jotka tulevat myös esille haastattelujen yhteydessä.

# Ennakkohuollon vaikutus vikaantumiseen (matemaattinen malli)

Per-Erik Hagmark, tutkija  
Teknillinen korkeakoulu  
Espoo

## Tiivistelmä

KÄKI-ohjelman M2/15-osaprojektiin kuuluvan tutkimustyön yhteydessä on kehitetty tässä raportissa esitettävä matemaattinen malli huoltotiedon erottamiseksi vikadatasta. Tuloksena on vikaantumisaajan jakauma, jossa on jäljellä vain alkuhuolto. Esitetään myös miten tämän perusjakauman avulla voidaan käsitellä (tuotesuunnittelijan) erilaisia huoltosuunnitelmia systemaattisesti sekä vertailla niitä keskenään. Menetelmän eri vaiheisiin liittyvän tietokoneohjelman listaus on liitteenä.

## 1. Johdanto ja yhteenveto

Vikatietoihin sisältyy melkein aina implisiittistä tietoa määräaikaishuollosta, eli huoltovälistä, huollon laadusta, yms. Asiantuntijan vikataajuusarvion, samoin kuin Plant-Specific-datan taustalla on yleensä jokin perusteltu ajatus huoltosuunnitelmasta. Jotta huollon vaikutusta vikaantumiseen sekä erilaisia huoltovaihtoehtoja voitaisiin hallita perusteellisesti, on välttämätöntä yrittää poistaa huollon vaikutus ja saada käsitys kohteen vikaantumistaipumuksesta *ilman* huoltoa.

Huoltamisen kaikkia pikkupiirteitä tiedostaen on selvää, että tällainen tehtävä on mahdoton. Informaatiota ei koskaan ole tarpeeksi, mutta kuten seuraavassa yritetään osoittaa, kuitenkin melkein tarpeeksi. "Puhdistamiseen" tarvittava lähtötieto on alan käytäntöä huomioon ottaen pyritty määrittelemään niin niukaksi, että sitä olisi myös mahdollista saada. Ehdotus on seuraava: Satunnaisvikoja koskeviin taustatietoihin liittyen olisi tavalla tai toisella arvioitava myös seuraavat kolme seikkaa:

- käytetyn huoltovälin pituus
- huollon aiheuttama hetkellinen vikataipumuksen kohouma
- vikataipumuksen kasvu, jos huolto jää tekemättä

Tämäkin lähtötieto on puhtaan loogisesti ottaen riittämätön, mutta puuttuva informaatio voidaan korvata huolellisesti valitulla, alempana esitettävällä ja sovellettavalla matemaattisella mallilla.

Puhdistamisen jälkeen on siis käytössä vikaantumisajan jakauma, joka sisältää ainoastaan alkuhuollon vaikutuksen. Tämä merkitsee, että nyt on mahdollista saada vikaantumisajan jakauma *millä tahansa* huoltovälillä, ja tämän lisäksi voidaan ottaa huomioon huollon *epäonnistumisen* mahdollisuus. Suunnittelijan lähtötiedot ovat siten seuraavat:

- suunniteltu huoltoväli
- todennäköisyys, että huolto jää tekemättä/epäonnistuu.

Raportin loppuosassa näytetään miten suunnittelijan valintoja vastaava vikaantumisajan jakauma tehdään. Raportin liitteenä on myös tietokoneohjelma, jolla esitettävät esimerkit on laskettu. Tämä ohjelma on suunniteltu aliohjelmaksi rakenteilla olevaan, tuotesuunnittelijan käyttövarmuusohjelmaan.

## 2. Peruskäsitteet, optimaalinen huoltoväli

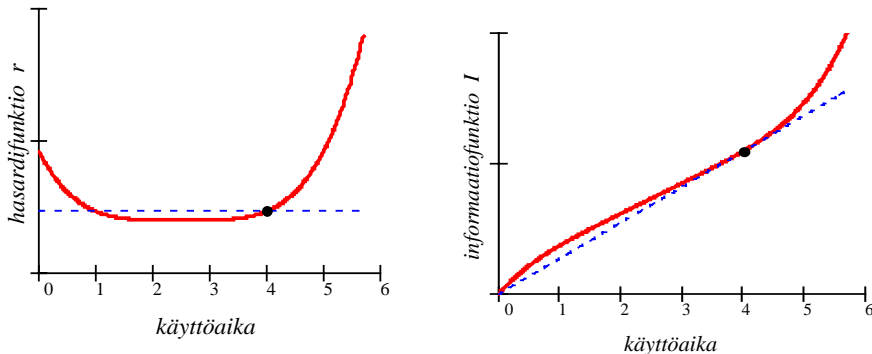
Tarkastellaan ensiksi teoreettisesti tilannetta, jossa huoltoväli on käyttövarmuuden kannalta optimaalinen. Palautetaan mieleen tärkeimmät peruskäsitteet [1]. Informaatio- eli vikainformaatiofunktio  $I(t)$  kuvaa keskimääräistä vikojen lukumäärää käyttöaikavälillä  $0...t$  ja informaatiofunktion derivaattaa  $r(t)$  sanotaan hasardifunktioksi:

$$I(t) = \int_0^t r(\tau) d\tau$$

Ns. vikataajuus/vikataipumus hetkellä  $t$  saadaan hasardifunktion arvosta  $r(t)$ , joten keskimääräinen vikataajuus välillä  $0...t$  on suhde  $I(t)/t$ . Jos siis huolto on tehty

hetkellä  $t = 0$ , niin seuraava käyttövarmuuden kannalta optimaalinen huoltohetki on se  $t = V$ , jolloin siihen asti kerääntynyt keskimääräinen vika-taajuus saavuttaa minimin, eli

$$\min \frac{I(t)}{t} = \frac{I(V)}{V} = \lambda$$

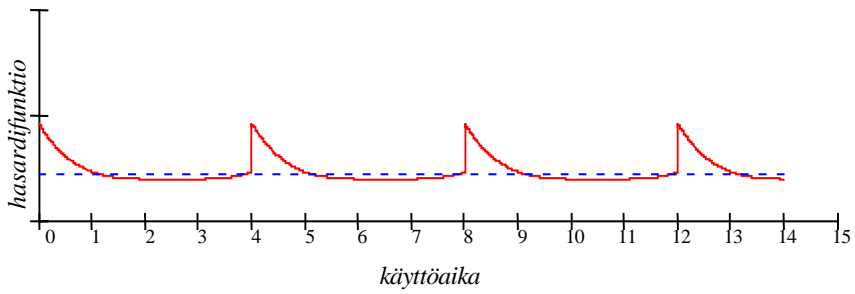


Kuva 1. Vikaantumisaajan hasardi- ja informaatiofunktio.

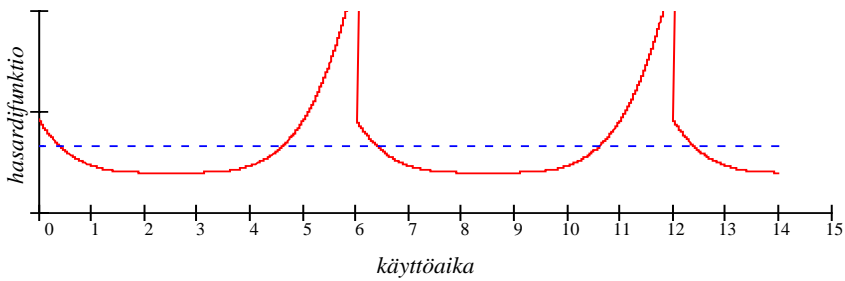
Kuvasta 1 on hyvä huomata joitakin yleisiä piirteitä. Esimerkiksi, että hasardifunktion ja vikataajuuden keskiarvon  $\lambda$  väliset pinta-alat ovat yhtä suuret, ja että toinen leikkaus tapahtuu optimaalisella huoltohetkellä  $V = 4$ . Vastaava löytyy kuvaajien integraalifunktioita esittävästä oikeanpuoleisesta kuvasta. Informaatiofunktion sivuamiskohta tapahtuu huoltohetkellä  $V$  ja kyseessä on se origon kautta kulkeva tangentti, jonka kulmakerroin on pienin mahdollinen ( $= \lambda$ ). Edelleen huomataan, että ei ole mielekästä puhua optimihuoltovälistä esimerkiksi silloin, kun hasardifunktio on vakio (jolloin  $V =$  mikä tahansa), tai silloin kun hasardifunktio on alussa nouseva (jolloin  $V = 0$ ).

### 3. Jatkuva huolto, ei-optimaalinen huoltoväli

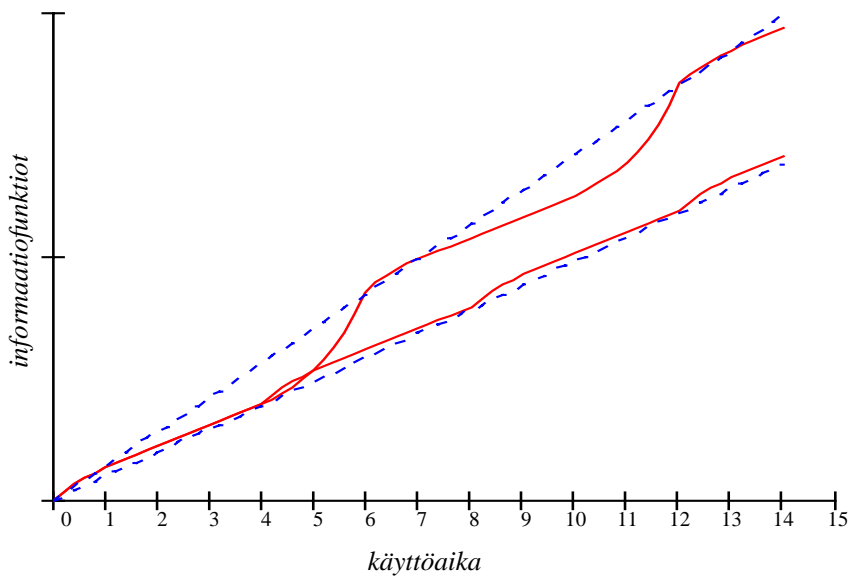
Jatkuvassa tilanteessa, eli kun käytetään vakiohuoltoväliä ja huollot ovat samanlaiset, niin hasardifunktio muodostuu tietenkin jaksolliseksi. Jatkaen edellisen kuvan esimerkkiä oletetaan, että huoltoväli on optimaalinen ja huolto ei jää koskaan tekemättä. Silloin vikataajuuden keskiarvo pysyy joka huoltovälillä minimissään ja tulos näkyy kuvasta 2.



Kuva 2. Optimaalista huoltoväliä vastaava hasardifunktio.



Kuva 3. Ei-optimaalista huoltoväliä vastaava hasardifunktio.



Kuva 4. Optimaalista (kuva 2) ja ei-optimaalista (kuva 3) huoltoa vastaavat informaatiot.

Aiemmin todetusta seuraa myös, että huoltovälin muuttuminen ei-optimaaliseksi kasvattaa aina keskimääräistä vikataipumusta. Esimerkiksi jos edellinen  $V = 4$  kasvatetaan  $V = 6$  :ksi, niin keskimääräinen vikataajuus kasvaa (44 %) kuten myös kuvista 3 ja 4 ilmenee.

## 4. Matemaattinen malli vikataipumukselle

Kuten todettiin, vikatieto ja huoltotieto ovat kietoutuneet toisiinsa. Nyt tarkastellaan vikatiedon puhdistamista huoltotiedosta. Lopputuloksena tulee olemaan kohteen vikaantumisajan jakauma, josta huoltojen vaikutus puuttuu (paitsi alkuhuolto). Määritellään ensin se minimitieto tarkasteltavasta kohteesta, mikä oletetaan olevan käytössä, ja valitaan samalla numeroarvot jatkossa seurattavaa esimerkkiä varten.

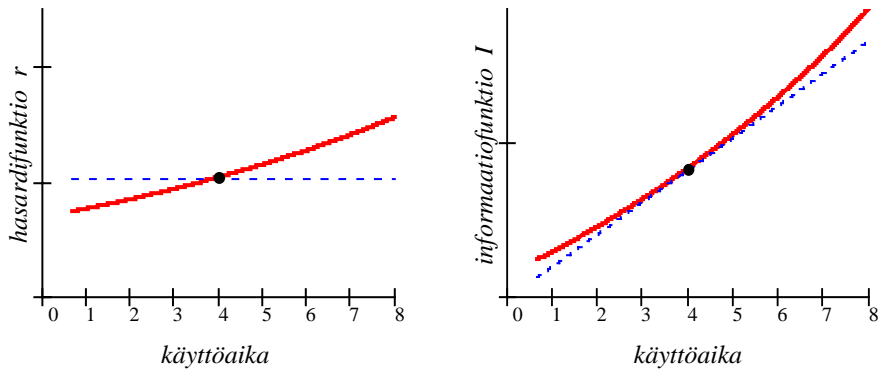
1. Mikä on käyttövarmuuden kannalta optimaalinen huoltoväli?  $V := 4$
2. Mihin keskimääräiseen vikataajuuteen päästään parhaassa tapauksessa eo. huoltovälillä?  $\lambda := 1/48$
3. Jos huolto jää tekemättä, niin kuinka paljon suurempi vikataipumus on seuraavan huoltovälin aikana?  $\alpha := 50\%$
4. Kuinka paljon suurempi vikataipumus on heti huollon jälkeen?  $\beta := 120\%$

Näillä valinnoilla on määritelty esimerkkikohteen vikaantumistaipumus. Ne toimivat nyt rakennettavan jakaumamallin parametreina. Mallin rakentamisessa otetaan ensiksi huomioon lähtötietoja 1, 2, 3, jolloin voidaan muodostaa jakauman jälkimmäinen osa. Tulos on

$$r(t) = \lambda \cdot (1 + \alpha)^{\frac{t}{V} - 1} \quad I(t) = \lambda \cdot V \cdot \frac{(1 + \alpha)^{\frac{t}{V} - 1} - 1 + \ln(1 + \alpha)}{\ln(1 + \alpha)}$$



Mallia voidaan perustellusti väittää ainoaksi luonteavaksi. Välttämätön eksponentiaalisuus seuraa siitä, että tietoa 3 sovelletaan jatkuvasti tekemättä jäävän huollon yhteydessä.

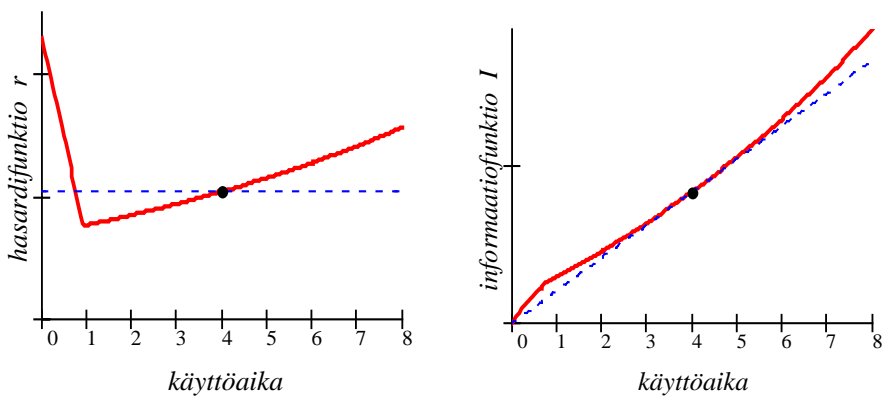


Kuva 5. Jakaumamallin jälkimmäinen osa.

Kun alkuhuolto on tapahtunut ja tieto 4 otetaan huomioon, niin voidaan sovittaa hasardifunktion alkupäähän suora ja informaatiofunktiolle vastaavasti paraabeli siten, että jatkuvuus- ja optimaalisuuskriteerit sekä tiedot 1,2,3 pysyvät voimassa.

$$r(t) = (1 + \beta) \cdot \lambda - a \cdot t \quad I(t) = (1 + \beta) \cdot \lambda \cdot t - \frac{a}{2} \cdot t^2$$

(Parametrin  $a$  ja liitoskohdan selvitys, kuten muitakin mallin rakentelun yksityiskohtia, löytyy liitteenä olevasta ohjelmalistauksesta.) Malli on valmis.



Kuva 6. Valmis jakaumamalli.

Kuvaajat (kuva 6) jatkuvat tietenkin mallin mukaisesti kaarevina, kun huoltoja ei jatkossakaan tapahdu. (Jos taas huollot tapahtuisivat, niin kuvaajat toistuisivat "täplästä" alkaen, kuten edellisen kappaleen esimerkissä, pysytellen katkoviivan ympärillä.)

## 5. Suunnitteluratkaisujen kirjoa

Hyvin niukkojen lähtötietojen perusteella on edellä rakennettu kohteen vikaantumiselle perusmalli, joka vastaa kohteen vikaantumista silloin, kun vain ensimmäinen huolto eli alkuhuolto tapahtuu. On saatu huolloista puhdistettu vikaantumisajan luotettavuusfunktio

$$R(t) = e^{-I(t)} \quad [ \text{edellisen kuvan } I(t) ]$$

Nyt on vapaus tarkastella erilaisia, ei-optimaalisia huoltovälejä ja lisäksi voidaan ottaa huomioon mahdollisuus, että huolto jää syystä tai toisesta tapahtumatta. Suunnittelijan lähtötiedot ovat siten numeroesimerkkeineen:

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 5. Mikä on suunnittelemasi huoltoväli?             | $V := 10$             |
| 6. Mikä on todennäköisyys, että huolto ei tapahdu? | $\varepsilon := 0.25$ |

Tietoja 5, 6 eli suunnitteluratkaisua vastaava luotettavuusfunktio on nyt johdettavissa kohteelle. Muodostetaan ensin apudennäköisyydet  $H_n$ , että kohde toimii vielä  $n$ :nnen huollon (mahd.) alkaessa:

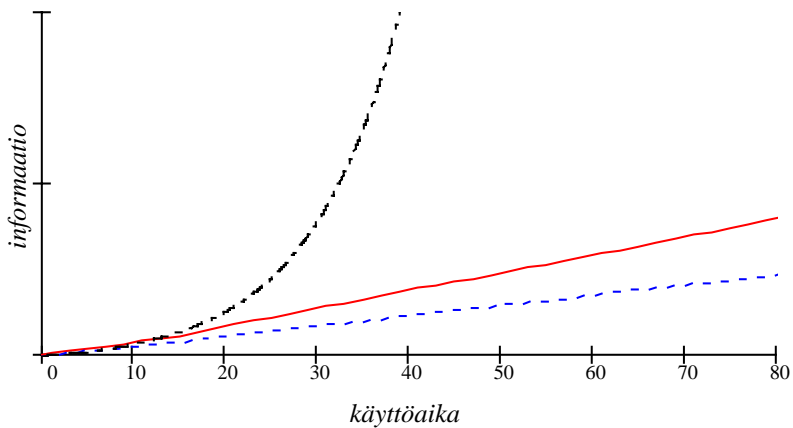
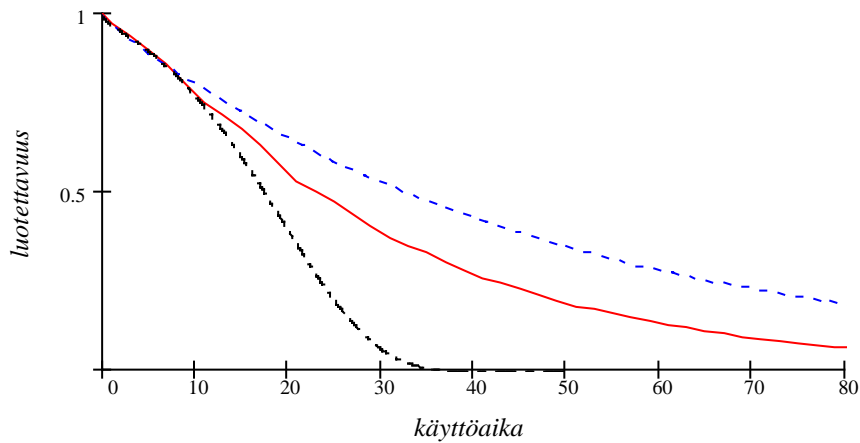
$$H_1 = R(V)$$

$$H_{n+1} = \varepsilon^n \cdot R((n+1) \cdot V) + (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon^{n-i} \cdot H_i \cdot R((n+1-i) \cdot V)$$

Silloin lopullinen luotettavuusfunktio  $RR(t)$  on laskettavissa muodossa:

$$RR(t) = \varepsilon^m \cdot R(t) + (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{i=1}^m \varepsilon^{m-i} \cdot H_i \cdot R(t - i \cdot V) \quad m = \text{floor}\left(\frac{t}{V}\right)$$

missä funktio "floor" tarkoittaa pyöristystä kokonaisluvuksi alaspäin. Vertailua varten on lopuksi kerätty tuloksia graafien muotoon (kuva 7).



Kuva 7. Eri huoltovaihtoehtojen luotettavuus- ja informaatiofunktioiden vertailua.  
 – kiinteä viiva = suunnitteluratkaisu (ei-optimaalinen huoltoväli, epävarmat huollot)  
 – katkoviiva = optimiratkaisu (optimaalinen huoltoväli, varmat huollot,  $\epsilon = 0$ )  
 – pistekatkoviiva = ei huoltoja lainkaan.

Kuvista 7 on poimittavissa useita tuttujakin ilmiöitä. Esimerkiksi, että suunnitteluratkaisuun liittyvä luotettavuus on parempi kuin ilman huoltoja. Kuitenkin aivan alussa voi olla hetkellisesti päinvastoin, riippuen hasardifunktion muodosta. Informaatiofunktioissa näkyy sama ilmiö. Pitkän ajan arvio vika-taajuudesta saadaan informaatiofunktioiden kulmakertoimista:

$$\lambda = 0.021 (= 1/48) \text{ optimiratkaisu (katkoviiva)}$$

$$\lambda = 0.036 \text{ suunnitteluratkaisu (kiinteä viiva)}$$

## 6. Kommentteja ja jatkotoimenpiteitä

Raportissa esitetty menetelmä ja liitteestä löytyvä vastaava ohjelma on syntynyt osana laajemman käyttövarmuusohjelmiston kehitystyöstä KÄKI-teknologia-ohjelman *Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa* -projektin yhteydessä. Olemassa olevien käyttövarmuustietojen (Plant-Specific, Generic, Expert) jalostaminen jakaumiksi [2, BMW-jakauma] ja yhdistäminen tasapainoisella tavalla [2, s. 8–18] on uuden tuotteen suunnittelussa tärkeä osa-alue ja laajojen kokonaisuuksien käyttövarmuuden simuloinnissa on tutkittava myös lähtöarvoriippuvuutta [2, 3]. Kehitetty menetelmä tuo entistä yksityiskohtaisemman ja konkreettisemmän näkökulman lähtöarvojen hyvin ”epävarmojen varmuusrajojen” määrittämiseen.

Saman tavoitteen kimpussa on luonnollisesti syntynyt useita hyviä tilastomatemattisia, perinteisempiä lähestymistapoja, ks. esim. [4].

Kiinnitetään lopuksi huomiota tiettyyn metodiseen seikkaan. Suurin osa vikataipumukseen liittyvistä lukemattomista tekijöistä jäävät tuntemattomiksi, mutta on arvokasta saada ote muutamista oleellisista tekijöistä *konkreettisen* mallin avulla. Mallin parametreihin voidaan ladata vähän ylimääräistäkin sisältöä (”pooling”). Huollosta tulee siis ”huolto”. (Uuden tiedon hankkiminen kulkee ilmeisellä tavalla aina ensin isoiloivan vaiheen kautta. Tämä on ”hajota ja hallitse” -periaatteen valoisa sovellus.)

## Kirjallisuusluettelo

1. Henley, E. & Kumamoto, H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. Second Edition. IEEE Press Piscataway, NJ, USA 1996
2. Virtanen, S. & Hagmark, P-E. Tuotteen käyttövarmuuden arviointi suunnittelukatselmuksessa. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, 1998 (Polttomoottorilaboratorion julkaisuja N:o 71)
3. Virtanen, S. & Hagmark, P-E. Tuotesuunnitteluratkaisujen optimointi. Teoksessa: Holmberg, K. (toim.) Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. S. 77–91. (VTT Symposium 175)
4. Bergman, E. Korjattavien järjestelmien vikatietojen tilastollinen käsittely. Teoksessa: Holmberg, K. (toim.) Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. S. 39–50. (VTT Symposium 175)

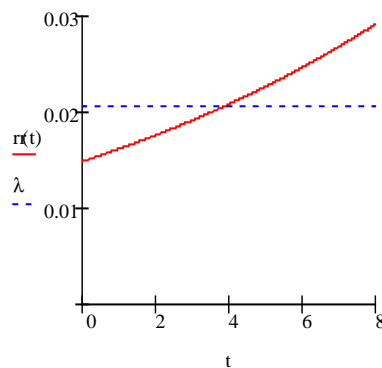
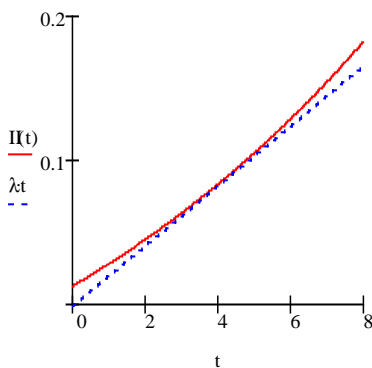
# Ohjelmaliite (MathCad)

1. Mikä on käyttövarmuuden kannalta optimaalinen huoltoväli?  $V := 4$
2. Mihin keskimääräiseen vikataajuuteen/-taipumukseen päästään parhaassa tapauksessa eo. huoltovälillä?  $\lambda := \frac{1}{48}$
3. Kuinka paljon suurempi (%) vikataipumus ( $\lambda$ ) on heti huollon jälkeen?  $\beta := 100\%$
4. Jos huolto jää tekemättä, niin kuinka paljon suurempi (%) vikataipumus ( $\lambda$ ) on seuraavan huoltovälin aikana?  $\alpha := 40\%$

Ilman huoltoja? ( $\varepsilon = 1$ , vain alku)

$$r(t) := \lambda \cdot (1 + \alpha) \left( \frac{t}{V} - 1 \right) \quad \Pi(t) := \lambda \cdot V \cdot \frac{(1 + \alpha)^{\frac{t}{V} - 1} - 1 + \ln(1 + \alpha)}{\ln(1 + \alpha)}$$

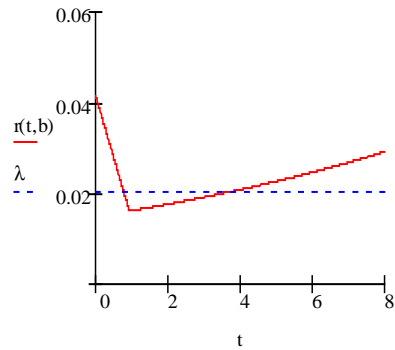
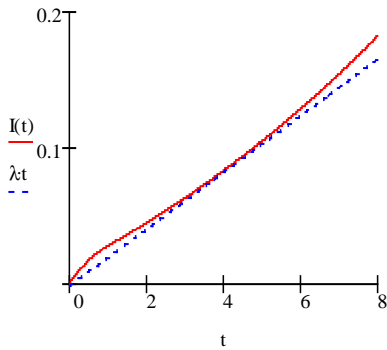
$t := 0, 0.001 \cdot V .. 2 \cdot V$



$$a(b) := \frac{\lambda}{b} \left[ 1 + \beta - (1 + \alpha)^{\frac{b}{V} - 1} \right] \quad r(t, b) := \text{if}(t < b, (1 + \beta) \cdot \lambda - a(b) \cdot t, r(t))$$

$$f(b) := \int_0^V r(t, b) dt \quad b := 0.5 \cdot V \quad \text{TOL} := 10^{-7} \quad b := \text{root}(f(b) - \lambda \cdot V, b)$$

$$I(t) := \text{if}(t < b, (1 + \beta) \cdot \lambda \cdot t - \frac{a(b)}{2} \cdot t^2, \Pi(t)) \quad R(t) := e^{-I(t)}$$



Suunnitteluratkaisu:

5. Mikä on suunnittelemasi huoltoväli?

$V := 10$

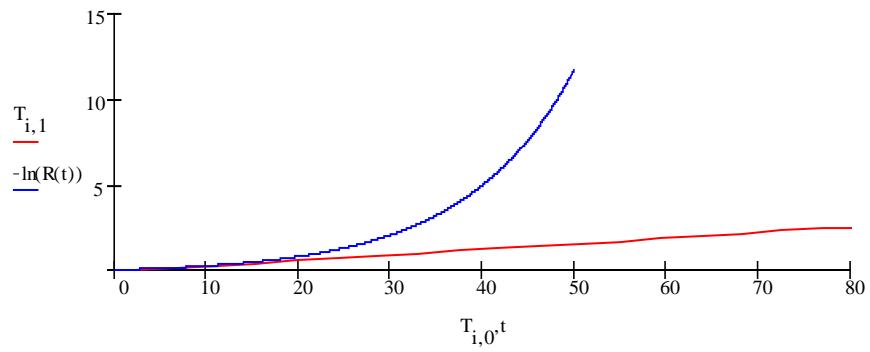
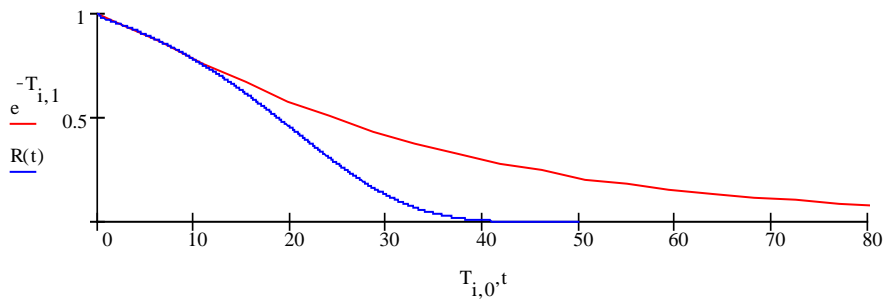
6. Mikä on todennäköisyys, että huolto jää tekemättä/epäonnistuu?

$\epsilon := 0.25$

```

T := | H1 ← R(V)
      | n ← 1
      | while Hn > 0.001
      |   | Hn+1 ← εn · R((n + 1) · V) + (1 - ε) · ∑i=1n εn-i · Hi · R((n + 1 - i) · V)
      |   | n ← n + 1
      |   | for j ∈ 1..50
      |   |   | tj ← (j - 0.5) / 50 · n · V
      |   |   | m ← floor(tj / V)
      |   |   | RRj ← R(tj) if m = 0
      |   |   | RRj ← εm · R(tj) + (1 - ε) · ∑i=1m εm-i · Hi · R(tj - i · V) otherwise
      |   |   | Ij ← -ln(RRj)
      |   |   | augment(t, I)
      | n := rows(T)    i := 0..n - 1    t := 0, 0.01..50

```



$T := \text{submatrix}(T, 10, \text{rows}(T) - 1, 0, \text{cols}(T) - 1)$

Vikataajuus on  $\text{slope}(T^{<0>}, T^{<1>}) = 0.0331945$   
 kun optimi oli  $\lambda = 0.0208333$





# Käyttövarmuus paperikoneen kiinnirullaimen tuotekehityksessä

Petteri Lannes, tuotekehitysinsinööri  
Valmet Oy  
Järvenpää

## Tiivistelmä

Paperikoneen kiinnirullaimen käyttövarmuus on merkittävä tekijä koko paperikonelinjan tuottavuuden kannalta, sillä kiinnirullaus on ensimmäinen sekvenssityyppinen vaihe paperinvalmistusprosessissa. Kiinnirullaimen on kyettävä muodostamaan jatkuvasti kulkevasta paperirainasta suurikokoinen konerulla sekä luotettavasti vaihtamaan valmistunut rulla pois koneesta täydessä ajonopeudessa. Uudenaikaisissa toisen sukupolven kiinnirullaimissa tapahtunut voimakas tekninen kehitys vaatii erityisesti käyttövarmuuden huomioimista uusien laitteiden tuotekehitysvaiheessa.

## 1. Johdanto

Koneiden ja laitteiden käyttövarmuutta tarkastellaan perinteisesti analysoimalla jo olemassa olevaa laitteistoa tai sen osakomponentteja. Käytössä olevan laitteen tekninen suorituskyky voidaan helposti arvioida käyttökokemusten perusteella. Samoin laitteen luotettavuutta on mahdollista laskea kvantitatiivisesti keräämällä häiriötapauksista tunnuslukuja kuten vikaantumishetki, häiriön kestoaika sekä korjausaika. Näistä tunnusluvuista voidaan laskea laitteiston tai sen osakokonaisuuden toimintavarmuus ja huollettavuus.

Teknisesti nopeasti kehittyvien laitteiden valmistajille ei kuitenkaan aina riitä vain toiminnassa olevan konekannan käyttövarmuuden analysointi. Esimerkiksi paperikoneen kiinnirullaimiin kehitetään jatkuvana kehitysprosessina uusia teknisiä sovelluksia. Tällöin uuden keksinnön suunnitteluvaiheessa ei ole aina käytettävissä kerättyä historiatietoa edes suunnilleen vastaavasta sovelluksesta,

vaan tuotekehitysprosessin aikana on pyrittävä arvioimaan uuden laitteen käyttövarmuutta esimerkiksi suunnittelukatselmusten avulla.

## 2. Suunnittelukatselmus

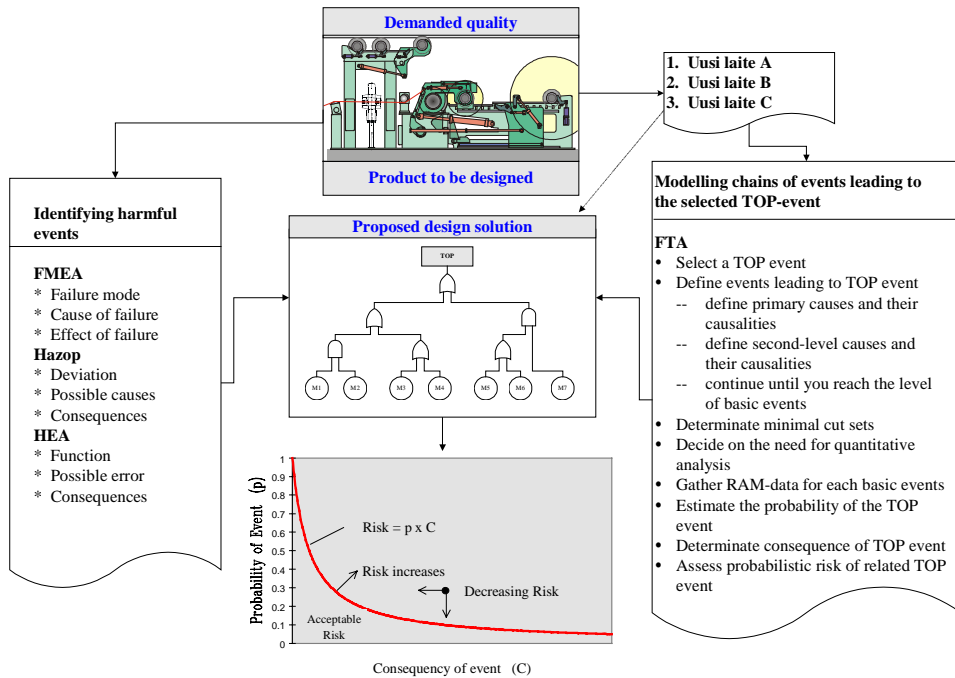
Tuotekehitysvaiheen suunnittelukatselmuksen yksi mahdollinen toteutustapa on esitetty kuvassa 1. Katselmuksen kohteena olevalta laitteelta tai toiminnolta voidaan vaatia teknisen suorituskyvyn lisäksi myös käyttövarmuutta. Kuvan esimerkissä suunnittelukatselmuksen kohteena on paperikoneen kiinnirullain, johon on suunnitteilla kolme uutta teknistä toimintoa (A, B ja C). Näiden uusien keksintöjen vaikutusta koko kiinnirullaimen tekniseen suorituskykyyn ja käyttövarmuuteen voidaan arvioida tuotekehitysasiantuntijoiden välisessä katselmustilaisuudessa.

Suunnittelukatselmus voidaan suunnitella ja ohjeistaa kuvan 1 esittämien vaiheiden mukaan. Ennen katselmustilaisuutta käyttövarmuusasioihin perehtynyt henkilö kerää tarkasteltavista kohteista tarpeelliset tekniset tiedot. Tarkasteltavan uuden laitteen tulisi olla suunnittelukatselmukseen mennessä sellaisessa kehitysvaiheessa, että suunnittelijoiden on mahdollista hahmottaa laitteen laadulliset vaatimukset sekä sen tekninen rakenne pääpiirteittäin. Siten aivan keksintövaiheen alussa olevaa kohdetta ei kannata tarkastella, ennen kuin jotain konkreettista on suunniteltu.

Suunnittelukatselmustilaisuuden päätavoite on muodostaa jokaisesta tarkastelun kohteena olevasta uudesta laitteesta tai toiminnosta **vikapuuanalyysi**. Kuvan 1 mukaisessa esimerkissä katselmukseen kutsutut henkilöt jaetaan kolmeen ryhmään, joista jokainen saa itse valita toimintatapansa. Ryhmien tehtävänä on valita oman kohteensa osalta yksi tai useampi kriittinen TOP-tapahtuma, jolla ryhmä arvioi olevan merkittävä vaikutus kohteen käyttövarmuudelle.

Merkittävän TOP-tapahtuman tunnistamista varten ryhmien käyttöön annetaan tarvittavat työkalut ja menetelmät, mutta ryhmät saavat soveltaa työkaluja vapaasti. Kuvassa 1 vasemmalla olevassa laatikossa on lueteltu menetelmiä, jotka helpottavat TOP-tapahtumien hahmottamista. Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA), poikkeamatarkastelu (Hazop) ja toimintovirheanalyysi (HEA) ovat analysointimenetelmiä, joiden avulla kriittiset tapahtumat voidaan löytää

vikapuutarkastelua varten. Toisaalta ryhmiä ei myöskään vaadita käyttämään em. menetelmiä, vaan tarkasteltavan kohteen vikapuurakenne voidaan hahmotella myös suoraan.



Kuva 1. Suunnittelukatselmus (Design Review).

### 3. Kvalitatiivinen analyysi

Kuvassa 1 esitetyn suunnittelukatselmuksen tavoitteena on siis tehdä tarkasteltavalle kohteelle kvalitatiivinen tapahtumaketjujen mallintaminen, vikapuuanalyysi (Fault tree analysis, FTA). Vikapuun muodostamisessa on mahdollista käyttää hyödyksi häiriöiden tunnistamista varten kehitettyjä analyysimenetelmiä (FMEA, Hazop, HEA). Näistä menetelmistä sekä muista häiriöiden tunnistamiseen ja tapahtumaketjujen mallintamiseen kehitetyistä menetelmistä löytyy lisätietoa lähteestä /1/.

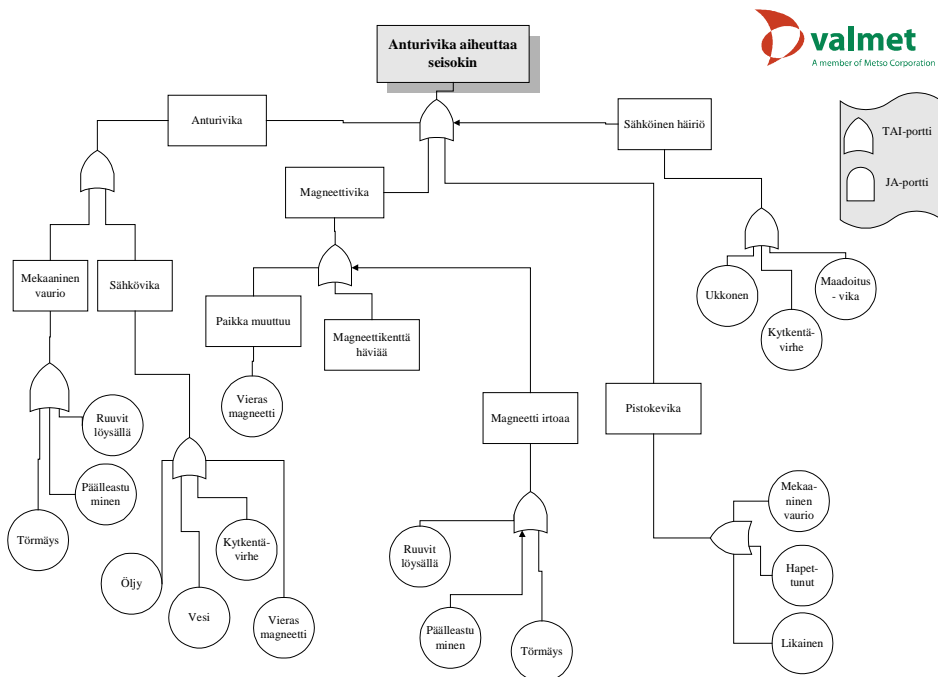
Taulukossa 1 on esimerkki suunnittelukatselmuksessa toteutetusta vika- ja vaikutusanalyysistä. Analyysissä pohdittiin erääseen toimilaitteeseen kuuluvan voima-anturin mahdollisia vikaantumistapoja, vian syytä ja vian vaikutusta paikallisesti sekä koko koneen osalta.

*Taulukko 1. Esimerkki vika- ja vaikutusanalyysistä.*

Voiman mittauksen vika-vaikutusanalyysi				
Kohde	Vikamuoto/Vioittumistapa	Vian syyt/aiheuttajat	Vian vaikutus	
			Paikalliset vaikutukset	Vaikutukset ORP:n toimintaan
VOIMA-ANTURI	Anturilta ei tule signaalia	Anturi rikki	Mittaus ei toimi	Koko kone seis
	Anturilta ei tule signaalia	Kaapeli irti/poikki/liitin irti	Mittaus ei toimi	Koko kone seis
	Virhellinen signaali	Asennusvirhe	Väärä voimatieto	Viivakuorma väärä
	Virhellinen signaali	Asennusvirhe	Anturi löystyy	Viivakuorma väärä
	Virhellinen signaali	Asennusvirhe	Anturi irtoaa	Koko kone seis
	Virhellinen signaali	Kytöntävirhe	Väärä voimatieto	Viivakuorma väärä
	Virhellinen signaali	Ulkopuolinen häiriö	Väärä voimatieto	Viivakuormahäiriöitä
	Virhellinen signaali	Mitotusvirhe	Epätarkka voimatieto	Viivakuorma epätarkka

Tunnistamalla häiriöitä em. analyysimenetelmien avulla voidaan helpommin löytää TOP-tapahtuma vikapuun muodostamista varten. Jos vikapuun hahmottelu aloitetaan ilman häiriöiden tunnistamista, saattaa vikapuuanalyysi kohdistua johonkin merkityksettömään ilmiöön eikä todelliseen kriittiseen TOP-tapahtumaan.

Kuvassa 2 nähdään esimerkki vika- ja vaikutusanalyysin avulla muodostetusta vikapuusta. Vikapuue esittää erään anturin vikaantumiseen johtavat tapahtumaketjut. Ympyrällä merkityt perustapahtumat ovat alin taso, johon tarkastelu on ulotettu. Nämä perustapahtumat kytketään loogisten JA- sekä TAI-porttien kautta ylempään tason tapahtumiin ja lopulta ylhäällä olevaan TOP-tapahtumaan. Tässä vaiheessa vikapuuanalyysiä pysytään vielä puhtaasti kvalitatiivisella tasolla eikä tapahtumaketjuille yritetä määrittää kvantitatiivisia todennäköisyyksiä tai vikataajuuksia.



Kuva 2. Erään anturin vikapuuanalyysi.

## 4. Kvantitatiivinen analyysi

Suunnittelukatselmuksessa hahmotellun vikapuun TOP-tapahtuman todennäköisyyttä voidaan arvioida myös kvantitatiivisesti. Kvantitatiivinen analyysi edellyttää numeerisen vikatiedon keräämistä vikapuun perustapahtumille. Virtanen ja Hagmark /2/ esittävät numeeriseen käyttövarmuusdatan keräämiseen kolme lähdettä: Generic data, Plant-specific data ja Expert judgment data.

Generic-tiedot sisältävät yleisistä tietolähteistä saatavilla olevia käyttövarmuus-tietoja /2/. Valmet Järvenpäässä Generic-tietojen lähteenä on käytetty ydinvoimalakomponenttien käyttövarmuustilastoja (T-book) /3/ sekä öljynporauslauttojen käyttövarmuusdataa (Oreda -97) /4/. Näiden tietopankkien komponenttidatan soveltuvuus on kuitenkin heikkoa paperinvalmistuslaitteisiin, sillä komponentit ovat usein hyvin erilaisia. Eräntyyppisenä "generic" datana on myös kerätty vertailutietoja komponenteista suoraan komponenttivalmistajille esitetyillä kyselyillä (esimerkki taulukossa 2).

*Taulukko 2. Esimerkkejä eri komponenttivalmistajien vastauksista Valmetin esittämiin käyttövarmuustiedusteluihin.*

### **Anturi A**

Vikataajuus	3,4 E-6
MTBF (h)	2,9 E+5

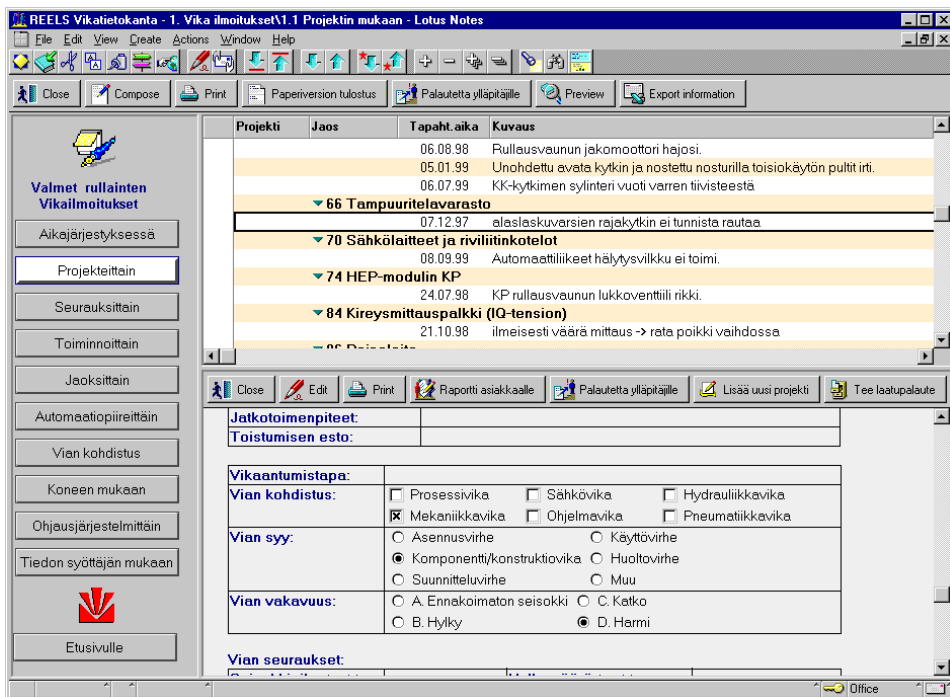
### **Anturi B**

MTBF	25 years
------	----------

### **Venttiili C**

Delivered	1245 pcs/year
Failures	2 pcs/year

Plant-specific tiedot ovat omia käyttökokemuksia samoista tai lähes vastaavista komponenteista vastaavanlaisissa käyttöolosuhteissa. Plant-specific tiedot ovat yleensä selvästi luotettavampia kuin Generic-tiedot. Valmet onkin rakentanut oman tiedonkeruupankin kiinnirullaimien käyttövarmuusdatan keruuseen ja käyttövarmuustunnuslukujen laskentaan (kuva 3).



Kuva 3. Kiinnirullainten vikatietokanta: vikailmoitusnäkymä.

Kolmas kvantitatiivisen tiedon lähde on Expert judgment -data. Asiantuntijakysely liittyy läheisesti suunnittelukatselmukseen, sillä katselmukseen osallistuvilta asiantuntijaryhmältä tiedustellaan arviota tarkasteltavan kohteen käyttövarmuudesta. Tuotekehitysvaiheessa kysely tehdään sen hetkisten suunnitteludokumenttien pohjalta ja käyttäen hyväksi suunnittelukatselmuksessa tehtyä kvalitatiivista vikapuuanalyysiä. Asiantuntijakysely (taulukko 3) suoritetaan vikapuun sen tason tapahtumille, joille vastaajat pystyvät antamaan luotettavan arvion tapahtuman toteutumistodennäköisyydestä. Siten ei ole välttämätöntä kysyä expert-arviota vikapuun alimman tason perustapahtumille, jos asiantuntijat kykenevät antamaan arvion vaikkapa suoraan TOP-tason tapahtumalle.

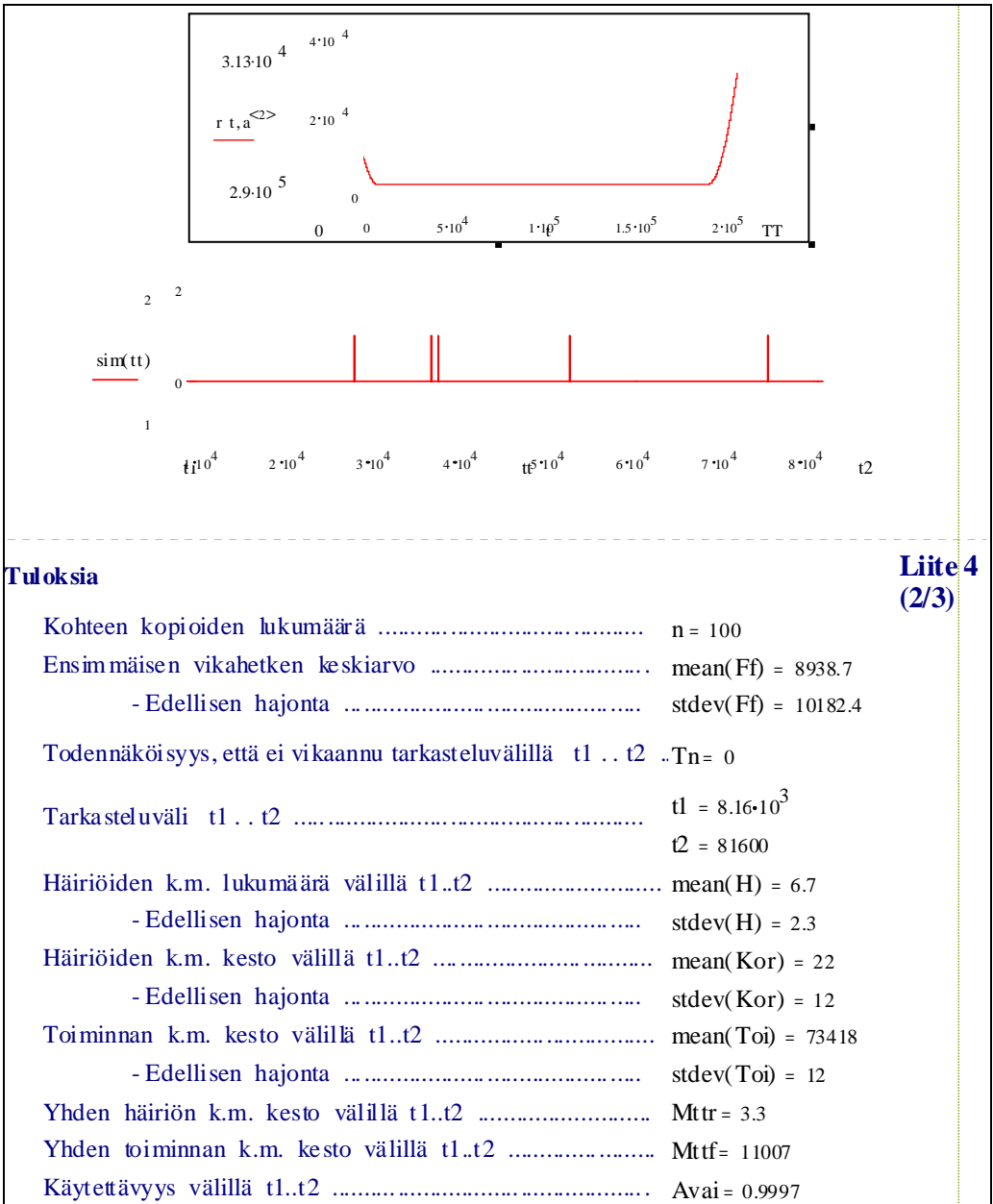


Taulukko 3. Asiantuntijakyselylomake kohteen luotettavuuden arviointia varten. (lähde: Seppo Virtanen, TKK).

**Expert-kysely kohteen vikaantumisesta**

1	Arvioi kohteen sisäänajon pituus $x_0^{1)}$ käyttäjässä. Sisäänajolla (burn-in) tarkoitetaan jaksoa, jonka lopussa vikataajuus asettuu vakiotasolle ja operatiivinen vaihe alkaa.	$x_0 \Rightarrow$	
2	Kuinka moni <sup>2)</sup> $n$ :sta samanlaisesta kohteesta vikaantuu (ainakin kerran) sisäänajon aikana	$n \Rightarrow$	
	- keskiwertotapauksessa	kpl $\Rightarrow$	
3 A	Kuinka moni <sup>2)</sup> $n$ :sta samanlaisesta kohteesta vikaantuu (ainakin kerran) operatiiviseen vaiheeseen kuuluvan $x_1^{1)}$ -pituisen edustavan käyttöajan aikana	$n \Rightarrow$	
	- pahimmassa tapauksessa	$x_1 \Rightarrow$	
	- parhaassa tapauksessa	kpl $\Rightarrow$	
	- keskiwertotapauksessa	kpl $\Rightarrow$	
	kun oletetaan, että kohde on ehjä/toimiva välin alussa?		
3 B	Arvioi operatiivisessa vaiheessa olevan kohteen keskimääräinen vikaväli $x_2^{1)}$ käyttäjässä		
	- pahimmassa tapauksessa	$x_2 \Rightarrow$	
	- parhaassa tapauksessa	$x_2 \Rightarrow$	
	- keskiwertotapauksessa	$x_2 \Rightarrow$	
4	Mikä on mielestäsi keskiwertotapauksessa kohteen se kumuloitunut käyttöaika $x_3^{1)}$ , jolloin vanhenemisesta johtuva vikataipumuksen kasvu alkaa (wear-out)?	$x_3 \Rightarrow$	
	Arvioi myös sellainen kumulatiivinen käyttöaika $x_4^{1)}$ ( $x_4 > x_3$ ), jonka jälkeen kohde ei ole enää käyttökelpoinen.	$x_4 \Rightarrow$	
	Kuinka moni <sup>2)</sup> $n$ :stä kohteesta vikaantuu (ainakin kerran) käyttöaikavälillä $x_3$ ... $x_4$ , kun oletetaan, että kohde on ehjä/toimiva $x_3$ :ssa?	$n \Rightarrow$	
		kpl $\Rightarrow$	

Edellä mainittujen kolmen tietolähteen avulla kerätyt numeeriset tiedot voidaan jalostaa jakaumiksi BMW-sovituksen avulla /2/. Numeerisia arvoja käsitellään satunnaissuureina: 5 % -raja B (Best), keskiarvo M (Mean) sekä 95 % -raja W (worst). BMW-arvoja voidaan käyttää tässä yhteydessä uuden laitteen käyttövarmuuden numeerisessa simuloinnissa (esimerkki kuvassa 4).



Kuva 4. Erään toiminnon käyttövarmuuden simulointituloksia.

## 5. Johtopäätökset

Teknisesti nopeasti kehittyvien laitteiden, kuten paperikoneen kiinnirullain, käyttövarmuutta ei voida arvioida pelkästään ns. "perinteisillä menetelmillä" analysoimalla olemassa olevan konekannan käyttökokemuksia. Kiinnirullaimeen kehitetään joka vuosi korkeampien teknisten suorituskykyvaatimusten myötä uusia laitteita ja toimintoja, joiden luotettavuusanalyysiin ei löydy referenssiä olemassa olevista tuotteista.

Uuden laitteen tai toiminnon tuotekehitysprosessin aikana on kuitenkin mahdollista ennustaa kohteen käyttövarmuutta suunnittelukatselmusten avulla. Suunnittelukatselmuksella ja sen jälkeen toteutettavilla asiantuntijakyselyillä on mahdollista saada kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen käyttövarmuusanalyysi tarkasteltavasta kohteesta.

Valmet Järvenpää on soveltanut suunnittelukatselmuksia kiinnirullaimien tuotekehityksessä. Käyttövarmuustarkastelusta on todettu hyötyä tunnistettaessa jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa uuden laitteen luotettavuusriskejä. Erityisesti kvalitatiivisen analyysin pohjalta on saatu uusia ideoita sekä korjattu tiettyjä puutteita vielä tuotesuunnittelun aikana.

## Kirjallisuusviitteet

1. Virtanen, S. & Hagmark, P.-E. Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa – ratkaisujen etsiminen ja valinta. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, 1997. 60 s. (Koneensuunnittelun laboratorion julkaisu B 21).
2. Virtanen, S. & Hagmark, P.-E. Tuotteen käyttövarmuuden arviointi suunnittelukatselmuksessa. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, 1998. 37 s.
3. T-book - Reliability Data of Components in Nordic Nuclear Power Plants. TUD Office, Vattenfall Energisystem, 1996
4. Oreda97 - Offshore Reliability Data Handbook. Det Norske Veritas, 1997.

# Telan pinnoitteiden ultraäänitarkastus

Tommi Uski, tutkimusapulainen  
Petri Kuosmanen, professori  
TKK Koneensuunnittelu  
Espoo

## Tiivistelmä

Tutkimuksessa kehitettiin ultraäänitarkastusjärjestelmä, jolla kyetään tarkastamaan paperikoneiden telojen pehmeät pinnoitteet kattavasti kohtuullisessa ajassa. Tarkastukset tehtiin spiraalimittauksena telasorvissa.

Laitteistosta rakennettiin prototyyppi ohjelmistoinen. Se koottiin teollisuus-PC-koteloon helposti siirrettäväksi yksiköksi. Ultraäänilaitteena käytettiin PC:n ultraäänikorttia. Tiedonkeruussa tehtävät jaettiin kahdelle PC-tietokoneelle riittävän mittausnopeuden takaamiseksi.

Laitteistoa testattiin käyttäen koeteloja, joiden pinnoitteisiin oli tehty erilaisia vikoja. Pinnoitteina oli usean valmistajan erilaisia pinnoitteita. Laitteiston nopeutta tutkittiin erikseen yhdellä koeteloista käyttämällä eri mittausresoluutioita ja pyörimisnopeuksia.

Kokeet osoittivat, että sopivilla luotaimilla ja oikeilla ultraäänilaitteen asetuksilla laitteisto havaitsee pienetkin viat homogeenisesta rakenteesta. Voimakkaasti vaimentavassa tai akustisesti epähomogeenisessa rakenteessa vikojen havaitseminen on epävarmempaa. Laitteiston tiedonkeruunopeuden todettiin olevan riittävä.

# 1. Johdanto

## 1.1 Taustaa

Paperikoneiden teloissa käytetään monenlaisia pinnoitteita, jotka voidaan jakaa koviin ja pehmeisiin pinnoitteisiin. Pinnoitteissa esiintyy erilaisia kiinnittymis- ja rakennevikoja, jotka voivat merkata paperin tai jopa aiheuttaa pinnoitteen rikkoutumisen käytössä. Näitä vikoja on etsitty joissain paikoissa käsin liikuteltavalla ultraäänilaitteella, mutta useimmiten viat ovat löytyneet vasta käytössä ilmenneiden ongelmien yhteydessä.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, minkälaisilla komponenteilla telapinnoitteen PC-pohjainen ultraäänitarkastusjärjestelmä kytetään toteuttamaan, sekä valmistaa järjestelmän prototyyppi ohjelmistoinen. Järjestelmän haluttiin olevan mahdollisimman helppokäyttöinen. Mittausresoluution ja -tarkkuuden tuli olla tarpeeksi suuri, jotta kaikki merkittävät viat löydettäisiin. Mittausaika ei saisi kuitenkaan suurimmillakaan teloilla ylittää neljää tuntia. Laitteiston oli oltava helposti siirreltävässä esimerkiksi työstökoneelta toiselle.

# 2. Ultraäänitekniikka

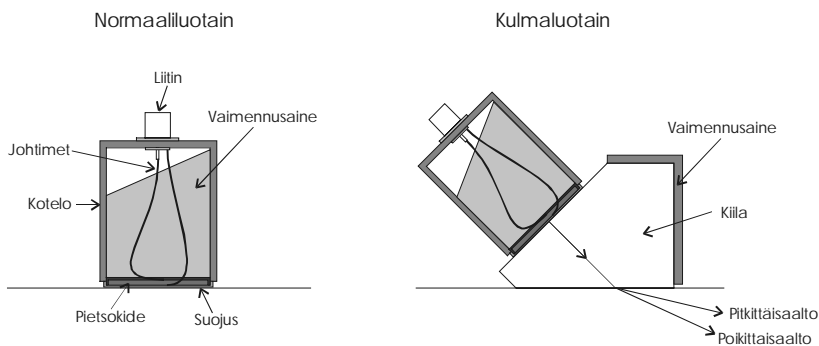
## 2.1 Pietsosähköiset ultraääniluotaimet

Ultraääniluotaimia on tehty hyvin monella eri periaatteella, mutta edullisuutensa ja monikäyttöisyytensä takia pietsosähköiset luotaimet ovat kaikkein yleisimmin käytettyjä. Lähteessä /9/ on kerrottu laajasti erityyppisten pietsosähköisten aineiden ominaisuuksista ja luotaimien suunnittelusta. Muilla periaatteilla toteutettuja antureita on esitelty mm. lähteissä /1, 3 ja 8/.

Pietsokiteet pystyvät muuttamaan energian kumpaankin suuntaan sähköisen ja mekaanisen muodon välillä, joten usein pietsoluotaimet ovat yksikiteisiä.

Joissain luotaimissa lähettämiseen ja vastaanottamiseen käytetään erillisiä kiteitä. Myös erillisiä lähettäviä ja vastaanottavia luotaimia käytetään paljon.

Pietsoluotaimilla kyetään saamaan aikaan sekä pitkittäisaallot että poikittaisaallot käyttäen sopivaa kiilaa värähtelijän edessä. Kulmaluotaimissa käytettävällä kiilalla saadaan äänikeila haluttuun kulmaan tutkittavaan kappaleeseen nähden. Kuvassa 1 on poikkileikkaus yksikiteisestä luotaimesta sekä normaali- että kulmaluotaimena. Pietsoluotaimesta voidaan tehdä fokusoitu tai lähes fokusoimaton. Fokusoidussa luotaimessa ultraäänienergia kohdistetaan tietyllä etäisyydellä luotaimesta hyvin pienelle alalle, jolloin äänienergia on tiheässä ja luotaimen erotuskyky on suuri.



*Kuva 1. Yksikiteinen pietsosähköinen luotain normaaliluotaimena ja kulmaluotaimena.*

## 2.2 Pulssikaikumenetelmä

Erilaisia ultraäänimittausmenetelmiä on kehitetty hyvin paljon. Telapinnoitteiden mittaamiseen käytettiin pulssikaikumenetelmää, joka on normaaliluotausmenetelmä. Se on käyttökelpoisin menetelmä, koska telapinnoitetta pystytään mittaamaan ainoastaan toiselta puolelta ja koska vaimentavien pinnoitemateriaalien takia äänitie pitää saada mahdollisimman lyhyeksi. Muita menetelmiä on esitelty mm. lähteissä /1, 2 ja 7/.

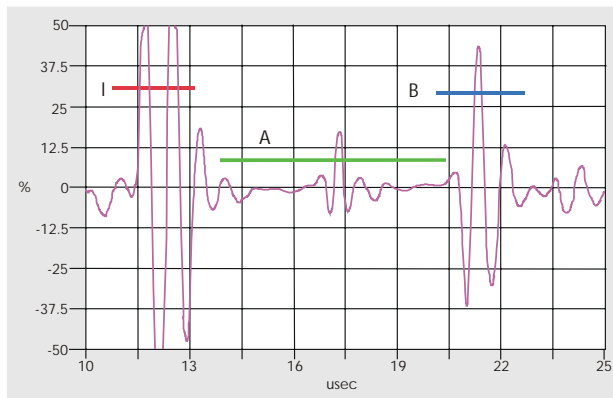
Menetelmässä lähetetään äänipulssi ja tarkastellaan sen kaikuja A-kuvassa (ks. kuva 2). Ensimmäisenä näkyy pääkaiku tarkasteltavan kappaleen etupinnasta ja

sen jälkeen takakaiku, joka on heijastunut kappaleen takapinnasta. Jos ääniäallon tiellä on materiaalivika, osa aallosta heijastuu jo siitä takaisin ja tämä näkyy pääkaiun ja takakaiun välissä. Jos säröjen suunta on sellainen, että kunnan kaikua ei niistä heijastu, voidaan säröjen olemassaolo päätellä takakaiun amplitudin pienenemisestä.

## 2.3 A-kuva

A-kuvassa ultraäänisignaali näytetään koordinaatistossa, jonka vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla signaalin amplitudi. Vaaka-akselin yksikkönä voi olla myös etäisyys, joka on laskettu ajan ja äänennopeuden avulla. Esimerkki A-kuvasta on kuvassa 2. Siinä näkyy signaalin lisäksi rajapintaportti (I) ja kaksi tarkastusporttia (A ja B), joita käytetään hyväksi tarkastuksia tehdessä.

Signaali voidaan näyttää useammalla tavalla. Se voi olla tasasuunnattu niin, että myös negatiiviset piikit näkyvät positiivisella puolella (full wave). Signaalista voidaan näyttää joko positiivinen tai negatiivinen puoli (half wave pos., half wave neg.). Se voidaan näyttää myös kokonaisena ja tasasuuntaamattomana RF-kuvana.



*Kuva 2. A-kuva, jossa signaali näkyy tasasuuntaamattomana RF-signaalina.*

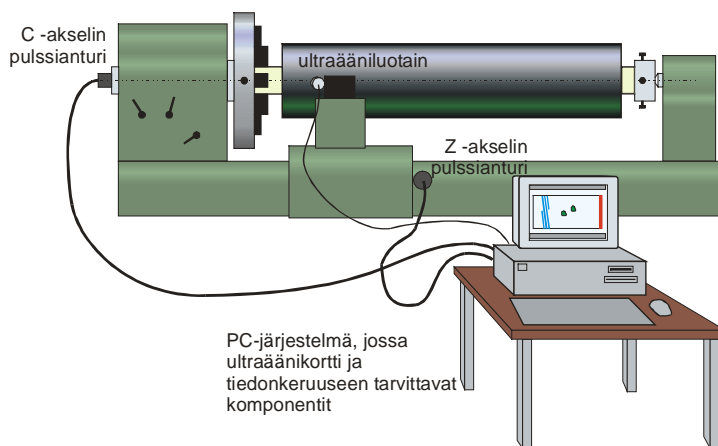
### 3. Menetelmät ja laitteistot

#### 3.1 Mittausjärjestelmä

Mittaukset tehtiin TKK:n Koneensuunnittelun laboratorion telasorvissa. Telaa pyöritettiin sorvissa ja ultraääniluotainta liikutettiin sorvin kelkan avulla telan akselin suunnassa. Kun kelkkaa ajettiin sopivalla nousulla, saatiin telan pinnoitteesta kattava mittaus.

Sorvin karaan (C-akseli) oli kiinnitetty pulssianturi, jolla luettiin telan pyörimiskulma. Sorvin kelkkaan oli kiinnitetty samanlainen pulssianturi, jolla luettiin pituussuuntainen (Z-akseli) sijainti. Z-akselin pulssianturin akselilla oli pyörä, jonka avulla pituussuuntainen liike muutettiin pyörimisliikkeeksi. Pyörä otti kontaktinsa sorvin johteen alapinnasta.

Ultraäänimittaus tehtiin ultraäänikortilla, joka oli liitetty PC-järjestelmään. Kustannusten ja työmäärän kurissa pitämiseksi käytettiin vain yhtä korttia. Kortin antamat tiedot sekä paikkatiedot kerättiin talteen ja näytettiin mittauksen aikana tietokoneen näytössä. Mittaukset talletettiin tietokantaan myöhempiä tarkasteluja varten.



*Kuva 3. Mittausjärjestelmän periaate.*



## 3.2 Ultraäänikortti

Ultraäänilaitteena käytettiin Krautkrämerin USPC2100 PC-korttia. Kortin käyttöliittymänä on Windows95:ssä toimiva ohjelma. Kortin ominaisuudet ovat hyvät, vaikka se ei monessa suhteessa olekaan yhtä hyvä kuin monipuolisimmat erilliset laitteet. USPC2100-järjestelmässä kukin mittaava kanava vaatii erillisen kortin. Kutakin kanavaa kohti on käytettävissä rajapintaportti ja kaksi tarkastusporttia (ks. kuva 2).

USPC2100-kortista saadaan ulos kolme TTL-tasoista signaalia ja kaksi analogista signaalia. TTL1-signaali ilmoittaa A-portin hälytyksen ja TTL2-signaali B-portin hälytyksen. TTL3-signaali ilmoittaa rajapintakaiuon häviämisestä. Analogiset signaalit voidaan valita seuraamaan jotakin useista kortin mittausrvoista, esimerkiksi valitun portin korkeimman piikin korkeutta tai etäisyyttä rajapinnasta.

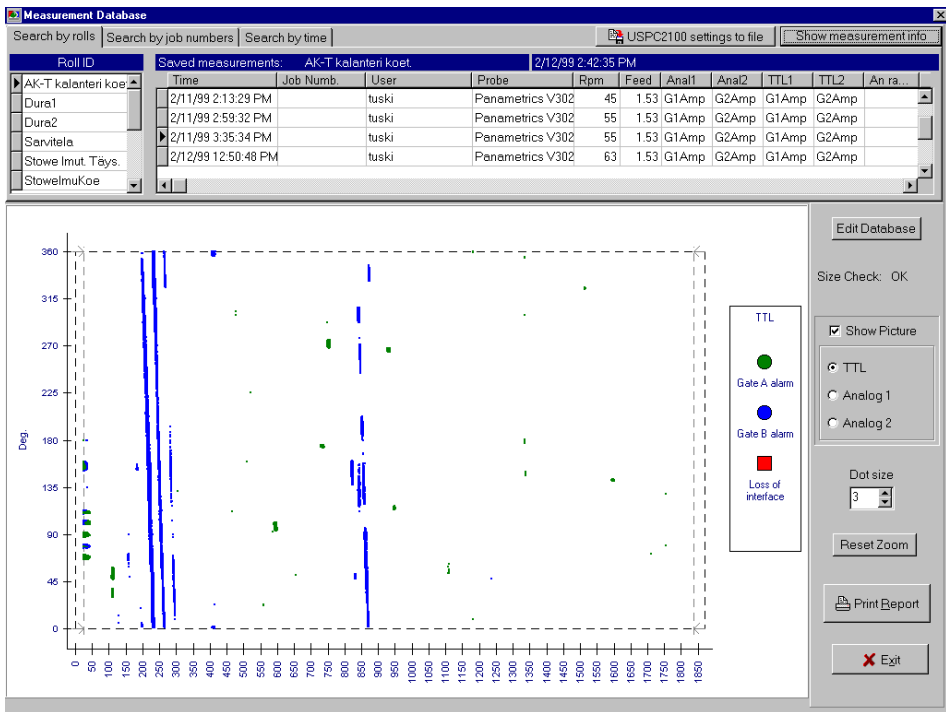
## 3.3 Tiedonkeruujärjestelmä

PC-järjestelmässä käytettiin kahta tietokonetta, joiden kesken mittauksen aikaiset tehtävät oli jaettu. Toinen tietokone tarvittiin järjestelmän nopeuden ja tarkkuuden takaamiseksi. Siinä käytettiin DOS-käyttöjärjestelmää, jonka etuna on stabiilius ja helppo sovellusten optimointi. Tietokoneet välittivät tietoja toisilleen yhteisen muistialueen (DPM) kautta. Samantapaista kahden tietokoneen järjestelmää oli käytetty TKK:n Koneensuunnittelun laboratoriossa aikaisemminkin, joten DPM:n käsittelylle oli olemassa valmis malli. Lisäksi järjestelmässä oli A/D-kortti ultraäänikortin ja mittakortti pulssianturien signaalien lukua varten.

## 3.4 Järjestelmän käyttöliittymä

Koska USPC2100-kortin käyttöliittymä oli valmis ohjelma, ei sitä voitu liittää samaan ohjelmaan tiedonkeruupuolen käyttöliittymän kanssa. Tämä ei kuitenkaan ollut Windows95:ssä ongelma, koska USPC2100-ohjelma voitiin jättää taustalle mittauksen ajaksi.

Tiedonkeruuhjelmassa syötetään ennen mittausta tarpeelliset tiedot telasta, mittauksesta ja ultraäänikortin asetuksista. Mittauksen aikana kortin antamat hälytykset piirretään telapinnoitteen levityskuvaan pisteinä, joiden väri määräytyy hälytyksen antaneen portin mukaan. Mittaustulokset talletetaan mittauksen jälkeen tietokantaan. Koska täysikokoisten telojen kattavassa mittauksessa kertyy miljoonia mittauspisteitä, talletetaan normaalisti vain niiden pisteiden tiedot, joissa on tapahtunut hälytyksiä. Myös kaikkien pisteiden tallennus pienehköltä alueelta on mahdollista. Jälkikäteen mittaus voidaan hakea tietokannasta tarkempaa tarkastelua varten. Tarkasteluikkuna näkyy kuvassa 4.



Kuva 4. Mittausten tarkasteluikkuna.

### 3.5 Koetelat

Tutkimusta varten saatiin pinnoitteiden valmistajilta koeteloja, joiden avulla etsittiin eri pinnoitteille sopivia luotaimia ja testattiin laitteiston toimintaa. Teloihin oli tehty tahallisesti vikoja, joita yritettiin löytää laitteiston avulla.

Lisäksi testattavana oli polyuretaanipinnoitteinen imutela, johon ei oltu tehty vikoja. Telassa oli vyöhykkeittäin erilaisia reikä- ja urakuvioita.

Polymeeripinnoite 1 oli 10 mm paksu kalanteripinnoite. Telan rungon päällä oli lujitemuovikerros ja sen päällä liimakerros sekä varsinainen toimintakerros. Vioista saatiin lista, johon oli merkitty niiden etäisyys toisesta päästä ja suunta kehällä. Vikoja oli seitsemää tyyppiä yhteensä 25 kpl.

Polymeeripinnoite 2 oli 30 mm paksu kalanteripinnoite, jossa oli samantyyppiset mutta paksummat kerrokset kuin polymeeripinnoite 2:ssa. Koeteloja oli kaksi ja vikojen kuvaukset oli merkitty telojen päätyihin niihin kohtiin, joihin viat oli tehty. Vikoja oli kuutta tyyppiä yhteensä 13 kpl.

Kumipinnoite oli 25 mm paksu vastatelapinnoite. Siinä oli pohjalla kiinnityskerroksessa eri kumilaatua kuin pinnan paksussa toimintakerroksessa. Vioista saatiin lista, jossa kerrottiin vian etäisyys toisesta päästä ja suunta kehällä. Vikoja oli yhdeksää tyyppiä yhteensä 26 kpl.

### **3.6 Kumikoetelan referenssimittaus Sumiad-järjestelmällä**

VTT Valmistustekniikkaan on hankittu monipuolinen Sumiad-ultraäänimittausjärjestelmä, jossa on kahdeksan multipleksoitua kanavaa ja monipuolinen analysointiohjelmisto. Sillä voidaan tallentaa koko ultraäänisignaali 4096 pikselin tarkkuudella tai 1–16 korkeinta piikkiä kahdeksasta portista /4, 6/. Käytännössä suurten pintojen mittauksessa joudutaan tyytymään muutaman piikin tallentamiseen kahdessa tai kolmessa portissa. Muuten talletettavan tiedon määrä kasvaa liian suureksi. Kumikoetelasta vertailumittauksia myös tällä järjestelmällä.

## **4. Koetulokset**

### **4.1 Vikakartoitus**

Eri teloille kokeiltiin monenlaisia luotaimia. Kullekin pinnoitteelle valituilla luotaimilla tehtiin useampia mittauksia erilaisilla ultraäänikortin asetuksilla.

#### **4.1.1 Polymeeripinnoite 1**

Mitatut vikojen paikat eivät vastanneet kovin hyvin valmistajan antaman vikalistan paikkoja etenkin kehän suunnassa. Kolmen hieman erilaisilla porttien asetuksilla tehdyn mittauksen perusteella voitiin päätellä, mitkä mittauskartoissa olevista laikuista olivat vikoja ja mitkä aiheutuivat jostakin häiriöstä, kuten ilmakuplasta vedessä. Yksitoista kohtaa oli niin suuria tai muodoltaan selviä, että ne voitiin luokitella varmoiksi vioiksi. Seitsemän muuta kohtaa oli epävarmempia, mutta luokiteltiin vioiksi. Ne näkyivät yhtä lukuunottamatta kaikissa mittauksissa ja niissä oli tullut hälytyksiä useammalla kierroksella.

#### **4.1.2 Polymeeripinnoite 2**

Vikoja oli vain kuutta erilaista tyyppiä. Neljän tyypin kaikki viat löydettiin, mutta kahden tyypin vikoja ei löydetty lainkaan.

#### **4.1.3 Kumipinnoite**

Suurimmaksi osaksi koelaitteiston ja Sumiadin mittauksissa näkyivät samat viat. Koelaitteistolla tehdyissä mittauksissa näkyi kolmetoista vikaa. Kaksi vikaa näkyi ainoastaan kahdessa mittauksessa, joissa luotaimen fokus-piste oli lähellä kumin pintaa. Mittaustuloksissa huomio kiinnittyi siihen, että osa samanlaisista muovisoiroista löytyi ja osa ei. Ne jotka löytyivät, näkyivät kaikissa mittauksissa selvästi. Sumiadin mittauksissa näkyi kaksi vikaa, joita koelaitteistolla ei näkynyt mutta sillä ei löydetty kahta vikaa, jotka näkyi koelaitteiston mittauksissa. Todennäköisesti nekin olisivat löytyneet, jos mittaukset V304-

luotaimella eivät olisi epäonnistuneet. Sitä käyttäen kyseiset viat löydettiin koelaitteistolla.

#### **4.1.4 Polyuretaanipinnoite**

Imutelan mittauksessa kokeiltiin monenlaisia luotaimia, mutta pinnoitteelle sopivaa luotainta ei löytynyt. Ehjän pinnan alueella rungosta saatiin hyvä kaiku, mutta reiät ja uritus heikensivät kaikua huomattavasti. Tiheämmän rei'ityksen alueella rungosta ei saatu lainkaan kaikua.

Vettä kontaktiaineena käytettäessä olivat ongelmana reikiin tunkeutuneen veden ja ilman rajapinnan kaiut. Harvan rei'ityksen alueella ja pelkän urituksen alueella reikien ja urien välissä oli kohtia, joissa veden ja ilman rajapinta ei häirinnyt vesisuihkuluotaimen mittausta. Periaatteessa tällaisilta alueilta olisi mahdollista löytää vikoja, jotka ulottuvat useamman reiän tai uran yli. Käytännössä mittaus vaatisi niin tiheää mittausverkkoa, että suuresta telasta kertyisi aivan liian suuri määrä tietoa. Myös tarpeeksi tehokkaan kapeakeilaisen luotaimen löytäminen voisi olla hankalaa.

Muovikalvon käyttö telan mittauksessa esti väärät kaiut veden ja ilman rajapinnasta. Kuitenkin muovikalvon kääriminen telan pintaan niin, ettei se heikennä ultraäänipulssia, on varsinkin suurilla pinnoilla hyvin vaikeaa.

## **4.2 Laitteiston nopeustestaus**

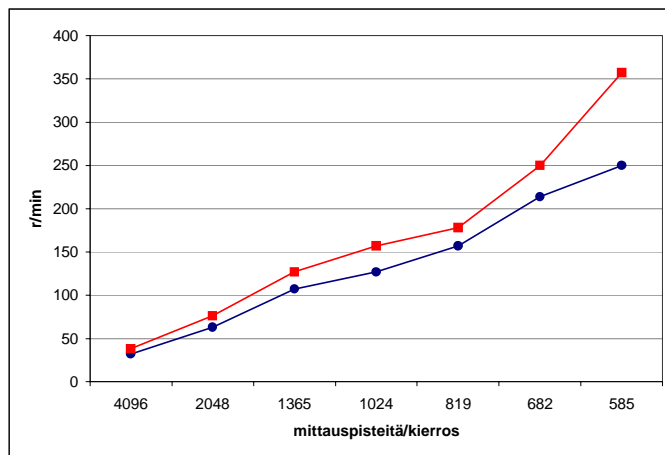
Tietokonelaitteiston nopeutta testattiin telasorvissa eri mittausresoluutioilla ja telan eri pyörimisnopeuksilla. Sorvin pyörimisnopeus säädetään vaihteistolla, joten pyörimisnopeus nousi askeleittain. Laitteiston asetukset tehtiin niin, että tietokoneet kuormittuivat mahdollisimman paljon.

Kuvassa 5 olevat siniset pisteet näyttävät pyörimisnopeudet, joilla mittaus vielä onnistui. Punaisten neliöiden pyörimisnopeuksilla tietokoneiden välinen puskuri pääsi täyttymään. Todellinen laitteiston suorituskyvyn raja on sinisen ja punaisen viivan välissä. Taulukossa 1 näkyvät mittausresoluutiot laskettuna eri

halkaisijaisille teloille. Pulssin jakaja on luku, jolla tiedonkeruuohjelmassa säädetään mittausrésoluutio kehán suunnassa.

*Taulukko 1. Mittausrésoluutiot millimetreiná eri telan halkaisijoilla.*

Pulssin jakaja		1	2	3	4	5	6	7
Mittauspisteitá/kiertos		4096	2048	1365	1024	819	682	585
Telan halkaisija [mm]	300	0,2	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6
	500	0,4	0,8	1,2	1,5	1,9	2,3	2,7
	800	0,6	1,2	1,8	2,5	3,1	3,7	4,3
	1200	0,9	1,8	2,8	3,7	4,6	5,5	6,4
	1500	1,2	2,3	3,5	4,6	5,8	6,9	8,1



*Kuva 5. Käyrät, joiden välissä laitteiston suorituskyvyn raja kulkee.*

Slave-PC:n mittaussilmukan nopeus vaikutti siihen, kuinka tasainen mittaustietokeruu tuli. Koska mittauksessa tallennettiin mittauspisteiden todelliset koordinaatit, nähtiin verkon rakenne suurennettuna mittauskuvassa. Kuvan 5 sinisten pisteiden mukaisilla telan pyörimisnopeuksilla verkko oli useimmiten hieman epätasainen. Se tasoittui selvästi, kun pyörimisnopeutta pienennettiin pykälällä tai kahdella.

Suurilla pintanopeuksilla huomattiin USPC2100-kortin antamassa TTL-signaalissa viive signaalin laskevalla puolella. TTL-signaali ei laskenut yhtä nopeasti kuin analoginen signaali. Käytännössä tämä merkitsi sitä, että TTL-kuvissa suurilla pintanopeuksilla viat näyttivät todellista pidemmiltä kehän suunnassa.

## 5. Johtopäätökset

### 5.1 Mittausmenetelmän luotettavuus ja käyttökelpoisuus

Mittaukseen käytetyllä luotaimella on suuri merkitys tarkastuksen luotettavuuden kannalta. Osittain luotaimelta vaadittavat ominaisuudet ovat ristiriidassa keskenään, joten valinta ei ole aina helppo.

Käyttäjän tekemien ultraäänikortin asetusten merkitys on yhtä tärkeä tarkastuksen onnistumisessa kuin sopivan luotaimen valinta. Tarkastusporttien paikat ratkaisevat täysin mittauksen tuloksen.

Kahdella tarkastusportilla saadaan tarkastettua tasalaatuiset pinnoitteet, esim. kumipinnoite ja poraamaton polyuretaanipinnoite, varsin hyvin. Jos pinnoitteessa on hyvin erilaisia kerroksia, kuten kalanteripinnoitteiden lujitemuovikerros ja pintakerros, olisi kolme tai neljä porttia tarpeen. Vielä parempi olisi, jos järjestelmässä olisi kaksi kanavaa, joissa käytettäisiin erilaisia luotaimia.

Koska koeteloen vioista yhteensä vain noin 60 % löytyi, ei laitteiston ja menetelmän luotettavuutta voi sanoa erinomaiseksi. Kuitenkin parannus yleisimmin käytössä oleviin perinteisiin käsikäyttöisiin ultraäänitarkastuslaitteisiin nähden on huomattava. Sumiadin kaltaisilla monipuolisemmilla laitteistoilla osaava käyttäjä pääsee hieman parempaan luotettavuuteen. Itse pulssikaikumenetelmän ja luotainten rajoitukset tai lujitemuovin kaltainen epähomogeeninen väliaine kuitenkin estävät pienten sekä äänikeilan suuntaisten vikojen löytymisen. Mittausnopeus Sumiadilla jää käytännössä paljon pienemmäksi kuin koelaitteistolla.

Nykyisten imutelojen pinnoitteiden reikä/urakuviot ovat niin tiheitä, että niiden tarkastaminen ultraäänellä tuottaa suuria vaikeuksia. Harvaan rei'itettyjen telojen tarkastus kuitenkin onnistuu, jos pinnoitteen ja rungon rajapinnasta saadaan riittävän voimakas kaiku. Lähteessä /5/ kerrotaan osittain onnistuneesta imutelan tarkastuksesta. Pinnoitteen valmistaja voi tehdä tarkastuksen valmistuksen yhteydessä ennen rei'itystä ja porausta. Tällöin pinnoitteen tarkastus onnistuu yhtä hyvin kuin muillakin pinnoitteilla ja pientenkin vikojen löytyminen on mahdollista. Pinnoitteen pitää olla kuitenkin sorvattu tarpeeksi sileäksi, jotta sorvauksen nousujälki ei vaikuta mittaukseen.

## 5.2 Nopeustarkastelu

Esimerkiksi 1500 mm:n halkaisijainen ja 10 m pitkä tela voitaisiin tiedonkeruun nopeuden puolesta mitata pyörimisnopeudella 60 r/min, kun pulssinjakaja olisi 2. Kehän suuntaiseksi resoluutioksi tulisi tällöin 2,3 mm. Jos nousu olisi 2,5 mm, kestäisi koko pinnoitteen mittaus noin tunnin ja 7 minuuttia.

Pyörimisnopeudella 60 r/min kyseisen telan pintanopeudeksi tulisi yli 4,7 m/s. Jos ultraääniluotaimen ja pinnoitteen välisenä kontaktiaineena käytetään vettä, ei niin suurta pintanopeutta voida käyttää, koska luotaimen kontakti häiriintyy. Käytännössä 3 m/s on lähellä sopivaa pintanopeutta mittauksessa. Pyörimisnopeudeksi tulee noin 38 r/min ja 2,5 mm:n nousulla mittausajaksi tulee noin tunti ja 45 minuuttia. Jos nousua suurennetaan 3,5 mm:iin, putoaa mittausaika tuntiin ja 15 minuuttiin.

Mittausverkko on käytännössä kyseeseen tulevilla pyörimisnopeuksilla niin tasainen, että sen takia ei tärkeitä vikoja jää havaitsematta. Mittauspisteiden rivit telan akselin suunnassa eivät ole suurilla nopeuksilla aivan suorat, mutta niiden väliin ei jää kuitenkaan liian suuria rakoja.

TTL-signaalin viive vääristää hieman pienten vikojen muotoa TTL-kuvassa, mutta vikojen löytymisen kannalta sillä ei ole merkitystä. Normaalikokoisilla teloilla suurentamattomissa TTL-kuvissa eri nopeuksilla tehtyjen mittausten eroa ei edes huomaa. Vasta kun viasta otetaan suurennettu kuva, alkaa ero näkyä.



## Lähdeluettelo

1. Blitz, J. & Simpson, G. Ultrasonic methods of non-destructive testing. London: Chapman & Hall, 1996. 264 s.
2. Bray, D. E. & McBride, D. Nondestructive testing techniques. New York: Wiley, 1992. 765 s.
3. Grandia, W. A. & Fortunko, C. M. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers. Proceedings of the 1995 IEEE Ultrasonics Symposium. Part 1 (of 2), 7 November 1995, Vol. 1. Seattle, USA: IEEE. S. 697–709. ISSN: 1051-0117
4. Krautkrämer GmbH & Co. SUMIAD Picturing Ultrasonics (esite). Germany: Krautkrämer GmbH & Co.
5. Lahdenperä, K. & Lipponen, A. Puunjalostusteollisuuden telojen eheyden testaus. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 1992. 20 s. (VTT Tiedotteita 1346). ISBN 951-38-4159-6
6. Pitkänen, J. Mekanisoidun ultraäänitestauksen mittaustulosten esitystavat. Hitsaustekniikka, 1996. Vol. 46, nro. 3, s. 18–20. ISSN 0437-6056
7. Pitkänen, J., Särkiniemi, P. & Jeskanen, H. Pinnoitteenalaisten vikojen havaittavuus eri ultraäänitekniikoilla. Hitsaustekniikka, 1992. Vol. 42, nro. 3, s. 3–8. ISSN: 0437-6056
8. Scruby, C. B. & Drain, L. E. Laser Ultrasonics: techniques and applications. Bristol: Adam Hilger, 1990. 447 s.
9. Silk, M. G. Ultrasonic transducers for nondestructive testing. Bristol: Adam Hilger, 1984. 162 s.

# Venttiileiden kulumismallien hyödyntäminen

Kai Laitinen, johtava asiantuntija  
Neles Automation Oy  
Helsinki, Finland

## Tiivistelmä

Kulumis- ja vuotomallien avulla voidaan ennakoida venttiileiden käytön aikana tapahtuvat tiiviiden muutokset. Kulumismalleihin perustuvia tietokone-ohjelmistoja voidaan hyödyntää yrityksen toiminnoissa tuotteen koko elinkaaren ajan suunnittelusta käytönaikaiseen kunnonvalvontaan saakka. Tämä parantaa mahdollisuuksia tarjota venttiileiden käyttäjille luotettavia ja tarkoituksenmukaisia tuotteita, joiden huollontarve voidaan määrittää etukäteen. Käyttäjille tämä tuottaa selviä säästöjä tarkasteltaessa venttiileiden koko elinkaarta, mikä lisää venttiileiden arvostusta ja kysyntää. Siten uuden tiedon hyödyntäminen lisää sekä venttiileitä että prosessituotetta valmistavan yrityksen kilpailukykyä.

## 1. Tausta

Venttiilit ovat keskeisiä prosessilaitteita, ja koska prosessiventtiileiden tiiviys on olennainen osa niiden suorituskykyä, tieto saavutettavasta tiivyydestä ja sen muutoksista on tärkeä prosessien hyötysuhteen, laadun ja turvallisuuden kannalta.

Venttiilin tiiviys muuttuu kulumisen myötä, joten haluttaessa arvioida venttiilin tiivyyttä tietyissä olosuhteissa tarvitaan tietoa prosessiolosuhteiden vaikutuksesta kulumiseen. Nopeimmin kulumisen vaikutus näkyy venttiileiden tiivistuspintojen pinnankarheuden muutoksina. Pinnat voivat joko kiillottua, jolloin tiiviys paranee tai pinnankarheus voi kasvaa, jolloin vuoto lisääntyy. Useimmiten venttiileiden tiivistuspintojen kuluminen ei ole tasaista, mistä johtuen pitkäaikaisessa käytössä venttiileiden tiivistuspintoihin syntyy muoto-

virheitä, mikä lisää vuotoa. Hyvin suuren operointimäärän jälkeen vuoto voi lisääntyä myös tiivistyspinnoilla käytettävien pinnoitteiden puhkikuluminen seurauksena. Vuotoja arvioitaessa kulumistiedon lisäksi tarvitaan tietoa kulumisen aiheuttamien muutosten vaikutuksesta vuotoihin ja edelleen vuotojen riippuvuudesta väliaineesta sekä prosessipaineesta ja -lämpötilasta.

Koska sekä venttiileiden kulumisen että vuodot riippuvat monista tekijöistä ja koska riippuvuudet ovat usein varsin monimutkaisia, tämän tiedon käsittelyä helpottaa, kun se kirjoitetaan matemaattiseen muotoon. Tämän jälkeen näitä matemaattisia malleja on helppo hyödyntää sekä PC- että sulautetuissa ohjelmistoissa, mikä tekee mahdolliseksi niiden käytön myös nopearytmisessä päivittäistyöskentelyssä.

## **2. Kulumismallien hyödyntäminen**

Yksi kilpailukyvyyn kannalta tärkeimpiä tekijöitä yrityksen toiminnassa on kyky tarjota asiakkaiden tarvitsemia ja haluamia tuotteita. Siksi on olennaista, että tuotteen tarjoaja tuntee tuotteidensa ominaisuudet ja suorituskyvyn mahdollisimman hyvin. Venttiileiden kulumisen ja vuodon arviointiin käytettävät mallit auttavat venttiileiden suorituskyvyn ennustamisessa tiiviiden osalta.

Tietoa venttiileiden tiiviiden muutoksista voidaan hyödyntää useimmissa venttiilejä valmistavan yrityksen toiminnoissa. Tätä tietoa tarvitaan koko tuotteen elinkaaren ajan tuotekehityksestä ja suunnittelusta käytönaikaiseen kunnossapitoon saakka.

Toiminnosta riippuen kulumis- ja vuotomalleja hyödynnetään joko PC- tai sulautetuissa ohjelmistoissa. Kuvissa 1 ja 2 on näkymät kulumisen ja vuodon arviointiin käytettävän PC-ohjelman käyttöliittymästä. Ohjelman avulla voidaan ennustaa erityyppisten venttiileiden prosessiolosuhteista riippuva vuodon kehittyminen lähtien liikkeelle halutusta standardin määrittelemästä alkutiiviyydestä.

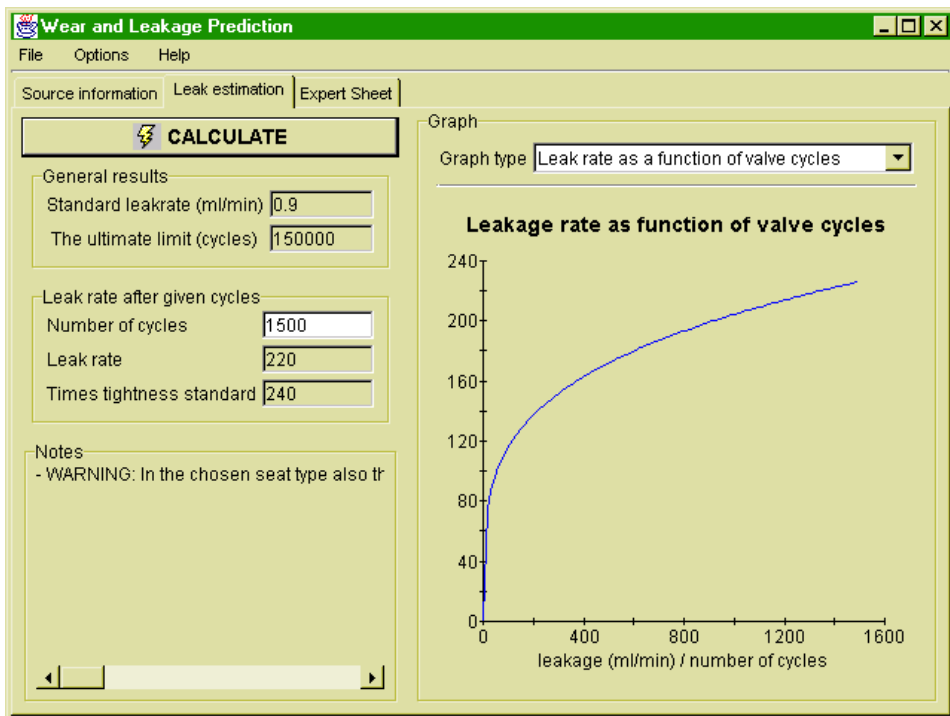
*Kuva 1. Vuodonlaskentaohjelman käyttöliittymän lähtötietojen syöttö.*

## 2.1 Tuotekehitys ja suunnittelu

Tuotekehitys ja suunnittelu on toiminto, jossa kulumis- ja vuotomalleja hyödynnetään PC-ohjelmistoissa.

Venttiileitä kehitettäessä ja suunniteltaessa tieto tiiviyteen vaikuttavista tekijöistä vaikuttaa venttiilimitoitukseen. Suunnittelussa pyritään ensisijaisesti hyvään suorituskyykyyn, mutta mitoituksella voidaan vaikuttaa myös kustannuksiin.

Tapauskohtaisessa asiakaspalvelutuotteiden suunnittelussa venttiilin tiivistyspintojen pintapaine voidaan mitoittaa siten, että saavutetaan tarkoituksenmukaisin kompromissi kulumiskestävyyden ja venttiilin tiivistymisen kannalta. Asiakaskohtaisessa venttiileiden suunnittelussa malleja voidaan käyttää myös venttiilipinnoitteiden suorituskyykyyn ja hinnan optimoinnissa.



Kuva 2. Vuodonlaskentaohjelman käyttöliittymän laskentatulokset.

## 2.2 Markkinointi

Venttiileiden markkinoinnissa tiiviyttä käytetään yleisesti osoittamaan tuotteen teknistä paremmuutta kilpailijoihin verrattuna. Osittain markkinointi tiiviiden avulla on ollut harhaanjohtavaa, koska on kerrottu vain venttiileiden testitiiviys tehtaalla. Kuitenkaan tiiviys ei säily muuttumattomana käytön aikana, vaan asettuu alkukuluminen jälkeen prosessiolosuhteista riippuvalle tasolle ja muuttuu kulumisen myötä koko venttiilin käyttöajan ajan.

Kun kulumismallien ja niihin perustuvien PC-ohjelmistojen myötä kytetään näyttämään asiakkaille, miten tiiviys muuttuu käytön aikana, kestävien ja luotettavien venttiileiden valmistajat alkavat erottua edukseen valmistajista, jotka lupaavat vain hyviä koepenkkitiiviyyksiä. Vuotoarvioiden avulla asiakkaille voidaan osoittaa, miten teknisesti ja hinnaltaan erilaiset ratkaisut vaikuttavat venttiilin suorituskykyyn halutuissa olosuhteissa. Asiakkaille voidaan myös antaa takuu tuotteen toimivuudesta.

Lisäämällä asiakkaiden tietämystä venttiileiden todellisesta suorituskyvystä parannetaan samalla prosessien käyttövarmuutta, kun venttiileiden tiiviystä ei ole epärealistisia käsityksiä. Pitkällä tähtäimellä tieto venttiileiden kulumisesta saattaa asettaa uusia vaatimuksia niiden rakenteille ja materiaaleille, jotta saavutetaan riittävä suorituskyky prosesseissa, joissa tehokkuuden parantaminen vaatii jatkuvasti korkeampia paineita ja lämpötiloja.

## **2.3 Myynti**

Myynnissä kulumisen ja vuodon ennustamiseen käytettävää ohjelmistoa voidaan käyttää yhdessä muiden venttiileiden mitoitus- ja valintaohjelmistojen kanssa. Ensimmäiseksi ohjelmistoa käytettäessä tulee varmistaa, että tarjottava tuote toimii halutuissa prosessiolosuhteissa. Tuttuihin prosesseihin venttiilit voidaan valita kokemukseräisesti, mutta myyjän on mahdotonta arvioida luotettavasti venttiilin toimintaa uusissa tai vaatimuksiltaan muuttuneissa prosesseissa.

Lisäksi ohjelmistoa voidaan käyttää erilaisten rakenne- ja pinnoitevaihtoehtojen vertailuun. Asiakkaalle voidaan tarjota erihintaisia tuotteita, joiden tiiviyyden kehittymisestä annetaan ennuste, jolloin asiakas voi optimoida venttiilin suorituskyvyn ja hinnan omien tarpeidensa mukaan.

## **2.4 Kunnossapito**

Venttiileiden ennakoivassa kunnossapidossa kaikki tieto suorituskyvyn muutoksista on tärkeää. Kun tiedetään, kuinka paljon venttiilin voidaan sallia vuotavan prosessin häiriintymättä, ja miten vuoto tulee kehittymään käytön myötä, voidaan määrittää venttiilin oikea huoltoajankohta. Tällöin venttiili voidaan huoltaa tarkoituksenmukaisin välein eli prosessin käyttövarmuutta ei vaaranneta liian pitkin huoltovälein, mutta ei myöskään häiritä prosessia ja lisätä huoltokustannuksia tarpeettoman usein toistuvien tarkastuksien. Yhä useammin venttiilivalmistaja myös sitoutuu huoltamaan valmistamansa tuotteet. Tällöin huoltoresurssien tarkoituksenmukainen käyttö tekee mahdolliseksi molemminpuolisesti edulliset huoltopalvelusopimukset.

Kun ennakoivaan kunnossapitoon yhdistetään vuodon monitorointi, laskettua vuotoennustetta voidaan verrata anturilla mitattuun toteutuneeseen vuotoon. Jos ennuste poikkeaa mitatusta vuodosta, ennustetta voidaan korjata ja siten määrittää entistä tarkemmin oikea huoltoajankohta.

Kulumismalleja voidaan hyödyntää myös vikadiagnostiikassa etsittäessä syytä havaittuun venttiilivuotoon. Esimerkiksi digitaalisen venttiiliohjaimen avulla voidaan seurata venttiilin liikenopeuksia. Liikenopeus- sekä prosessin paine- ja lämpötilatietojen avulla voidaan päätellä, onko venttiili ollut käyttöalueellaan vai ovatko toimintarajat ylittyneet.

Kun digitaalisen venttiiliohjaimen sulautettuihin ohjelmistoihin lisätään kulumismallit tai sen muistiin tallennetaan mallien avulla lasketut toiminta-alueet, ohjain voi valvoa ajantasaisesti, että toimintarajojen ylittyminen ei aiheuta venttiilin vaurioitumista. Jos venttiili pyrkii pois käyttöalueeltaan, ohjain lähettää varoituksen venttiilin käyttö- tai kunnossapitohenkilöille.

### **3. Johtopäätökset**

Tietokoneohjelmistojen avulla venttiileiden kulumis- ja vuotomalleja voidaan hyödyntää kaikissa venttiilejä valmistavan yrityksen toiminnoissa tuotteen koko elinkaaren ajan suunnittelusta käytönaikaiseen kunnonvalvontaan saakka. Tällöin asiakkaille voidaan tarjota suorituskyvyltään ja hinnaltaan tarkoituksenmukaisia tuotteita, joiden huolto voidaan suunnitella vastaamaan ennakoitua kulumista.

Mahdollisuus tarjota asiakkaille luotettavia ja tarkoituksenmukaisia tuotteita, joiden huollontarve voidaan määrittää etukäteen, tuottaa asiakkaille selviä säästöjä tarkasteltaessa tuotteen koko elinkaarta. Tämä lisää tuotteiden arvostusta. Valmistajan kannalta parantunut arvostus merkitsee menekin ja myyntikatteiden kasvua, mikä lisää kilpailukykyä ja mahdollisuuksia kehittää tuotteita yhä paremmin asiakkaiden tarpeita palveleviksi.

# Venttiilin käyttövarmuus ja ennakoiva kunnossapito

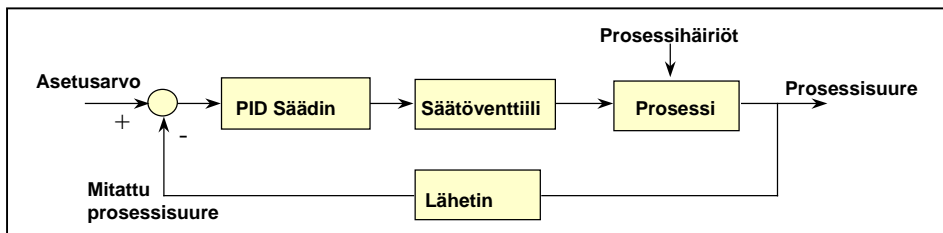
Jari Riihilahti, johtava asiantuntija  
Neles Automation  
Helsinki, Finland

## Tiivistelmä

Venttiilien käyttövarmuustietoa ei ole kovinkaan kattavasti saatavilla. Venttiilien kunnonvalvonnassa kerätään tietoa käyttövarmuudesta ja talletetaan tieto helposti käsiteltävään muotoon. Kenttälaitteiden pitkä elinkaari tekee luotettavan tilastoinnin hankalaksi. Oleellista on saada suorituskyky ja huoltotarve selville ajoissa paljon ennen varsinaista huoltoajankohtaa, jotta kenttälaitetekonaisuuden hallinta olisi helpompaa. Tässä esityksessä perehdytään säätöventtiilien käyttövarmuuteen vaikuttaviin seikkoihin säätöpiirin kannalta sekä venttiilien ennakoivaan kunnossapitoon.

## 1. Venttiili säätöpiirissä

Säätöventtiilit ovat usein kriittisiä komponentteja prosessin ohjauksessa. Niillä on myös merkittävä osuus laitoksen kokonaisturvallisuuteen. Pumput ja venttiilit ovat toimielimiä, joiden kulumista ei voida välttää. Niiden käyttövarmuuteen onkin kiinnitettävä erityistä huomiota.

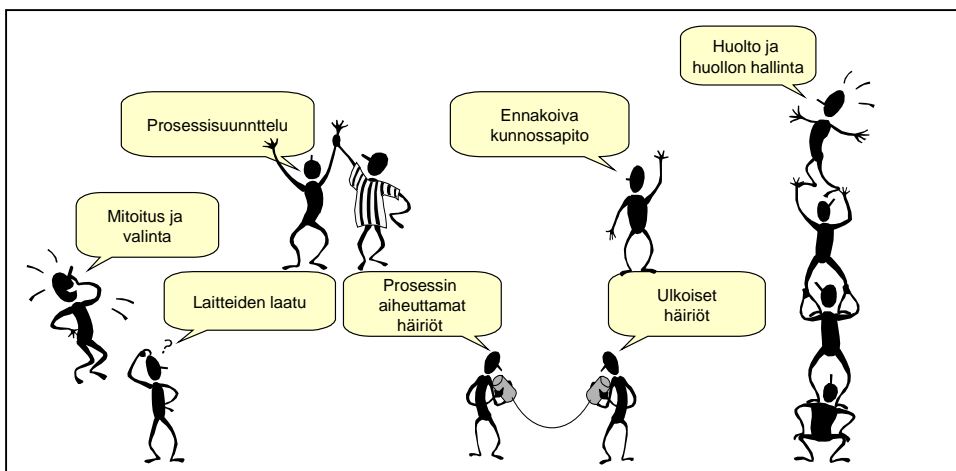


Kuva 1. Säätöventtiili säätöpiirissä.



## 2. Säätöventtiilin käyttövarmuuteen vaikuttavia tekijöitä

Säätöpiirin käyttövarmuuteen vaikuttavia tekijöitä voidaan tarkastella useasta eri näkökulmasta. Näitä ovat mm. säätöpiirin suunnittelu, laitteiden toimintavarmuus ja säädön hallinta vikatilanteissa. Säätöpiirin suunnittelussa otetaan huomioon erilaisten vikatilanteet ja niiden hallinta. Turvallisuuden varmistaminen vaatii usein erillisen turvalogiikan ja lisäinstrumentointia. Itse säätöventtiilin käyttövarmuuteen vaikuttavia tekijöitä on listattu seuraavissa kappaleissa.



Kuva 2. Säätöventtiilin käyttövarmuuteen vaikuttavia tekijöitä.

### 2.1 Laitteiden laatu

Valittujen komponenttien laatu tarkistetaan monissa testeissä ennen varsinaista käyttöönottoa. Lisäksi yhdistelmäkokoontamisen säätösuorituskyky todennetaan lopputestauksen yhteydessä. Testit tehdään ilman todellisia prosessiolosuhteita, jolloin lopullista toimintakykyä ei tarkasti vielä tunneta. Säätöventtiilipaketin yhdistelmäkokoontaminen voidaan tehdä uudestaan huollon yhteydessä, jolloin on kiinnitettävä huomiota paketin toimivuuteen ennen putkistoon asennusta.

## **2.2 Laitteiden mitoitus ja valinta**

Säätöventtiilipaketin valinta on ensimmäinen ja yksi tärkeimmistä vaiheita käyttövarmuuden turvaamisessa. Tällöin määritellään venttiilityyppi, toimilaitetyyppi, venttiiliohjain sekä tarvittava lisäinstrumentointi. Ympäristöolosuhteet ja säätökykyvaatimukset asettavat ehtoja valinnoille. Prosessiolosuhteet, kuten virtaava väliaine, paineolosuhteet ja lämpötila, vaikuttavat oleellisesti laitteiden valintaan. Säätövaatimukset puolestaan vaikuttavat laitetyypin valintaan ja mitoitukseen.

## **2.3 Asennus ja kytkennät**

Asennus on aina tehtävä ohjeiden mukaisesti. Väärät asennusasennot voivat aiheuttaa vakavia toimintahäiriöitä. Väärä asennusasento voi siirtää venttiiliyhdistelmän painopisteen kauas suunnitellusta paikasta, jolloin liitososiin kohdistuu ylimääräistä kuormaa. Myös tuennalla on suuri merkitys esim. tärinän ja iskujensietoon. Väärän asennon vuoksi lika ja kosteus voivat päästä helpommin laitteiden koteloihin. Sähköiset kytkennät ja suojavaadoitus on tehtävä tarkasti ohjeiden mukaan.

## **2.4 Prosessin aiheuttamat häiriöt**

Prosessin aiheuttamia häiriötätilanteita ovat mm. kavitaatio, flashing-virtaus, paineiskut ja virtausvoimat. Kavitaatiossa virtaava neste höyrystyy hetkeksi ja sen jälkeen kaasukuplat romahtavat takaisin nesteeksi. Tämä aiheuttaa melua, tärinää ja eroosiota. Flashing-virtauksessa neste höyrystyy ja jää höyryksi, jolloin säädettävyys on rajallinen. Myös prosessin mittaukset hankaloituvat. Paineiskut aiheuttavat suuria hetkittäisiä kuormitustilanteita venttiilin sulkuelimeen. Virtausvoimat puolestaan pyrkivät joko avaamaan tai sulkemaan venttiilin sulkuelintä ja siten häiritsee säätöä.

## 2.5 Ulkoiset häiriöt

Ulkoiset häiriöt aiheutuvat muista laitteista tai ympäristöstä ja ne voivat jollain tavoin vaikuttaa venttiilin toimintaan. Tyypillisiä ulkoisia häiriöitä ovat värinä, korkeataajuinen värähtely, iskumaiset räsäykset, sähköiset häiriöt, lämpötilamuutokset sekä vieraat aineet. Venttiilin värähtely aiheutuu pääosin muista laitteista, kuten pumpuista ja moottoreista tai virtauksesta. Myös nopeat ohjausliikkeet isoilla venttiileillä rasittavat mekaniikkaa.

Sähköiset häiriöt ovat uudehko asia säätöventtiileille, koska elektroniikka niissä on vielä melko uutta. Säätöventtiili ei saa päästää ympäristöönsä haitallisia määriä sähköisiä häiriöitä. Vastaavasti se ei saa itse häiriintyä ulkoisista sähköisistä häiriöistä. Venttiiliohjaimet testataan sähkömagneettisia häiriöitä vastaan kansainvälisten standardien mukaisesti (esim. IEC 801). Tällöin varmistutaan, että esim. salamat, puhelimet ja sähköjohtimet eivät ole ongelmana.

Vieraat aineet voivat kosketukseen joutuessaan aiheuttaa ongelmia. Tällaisia tilanteita ovat mm. paineilman mukana tulevat vieraat aineet, kuten rikkikaasut ja öljyt, jotka voivat vioittaa ohjainyksikköä. Vastaavasti ulkoiset vuodot venttiilipaketin päälle voivat hapettaa tiivisteitä jne.

## 2.6 Käyttöönotto ja viritys

Varastointi, käyttöönotto ja viritys on tehtävä valmistajan ohjeiden mukaisesti. Mikäli säätö jää värähtelemään, kulumisriski kasvaa merkittävästi. Säätökyky on varmistettava eri toimintapisteissä. Säätöventtiileillä tämä tarkoittaa usein riittävän varovaisia säätöasetuksia, jotta käyttöönotossa ei tapahdu yllätyksiä.

## 3. Venttiilien kunnossapidon malleja

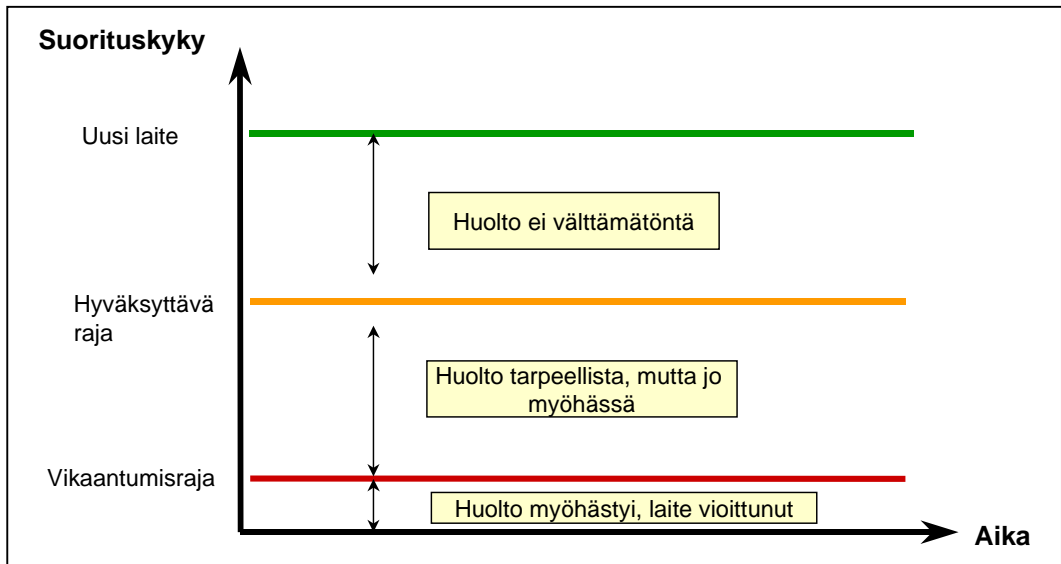
Ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on kartoittaa saada huoltotarve selville ennen varsinaista huoltotilannetta. Mikäli huoltotarve tiedetään, voidaan resurssit ohjata tarkeisiin asioihin ja sillätavoin tehostaa huoltotoimia. Se on usein parempi vaihtoehto kuin korjaava tai ehkäisevä kunnossapito.

Korjaava kunnossapito perustuu siihen, että vika korjataan vasta, kun se havaitaan. Laitteet ajetaan loppuun. Tällöin joudutaan useammin tilanteisiin, jossa rikkiäinen laite aiheuttaa prosessin alasajon. Alentunut suorituskyky voi myös heikentää prosessin ajettavuutta ja laatua.

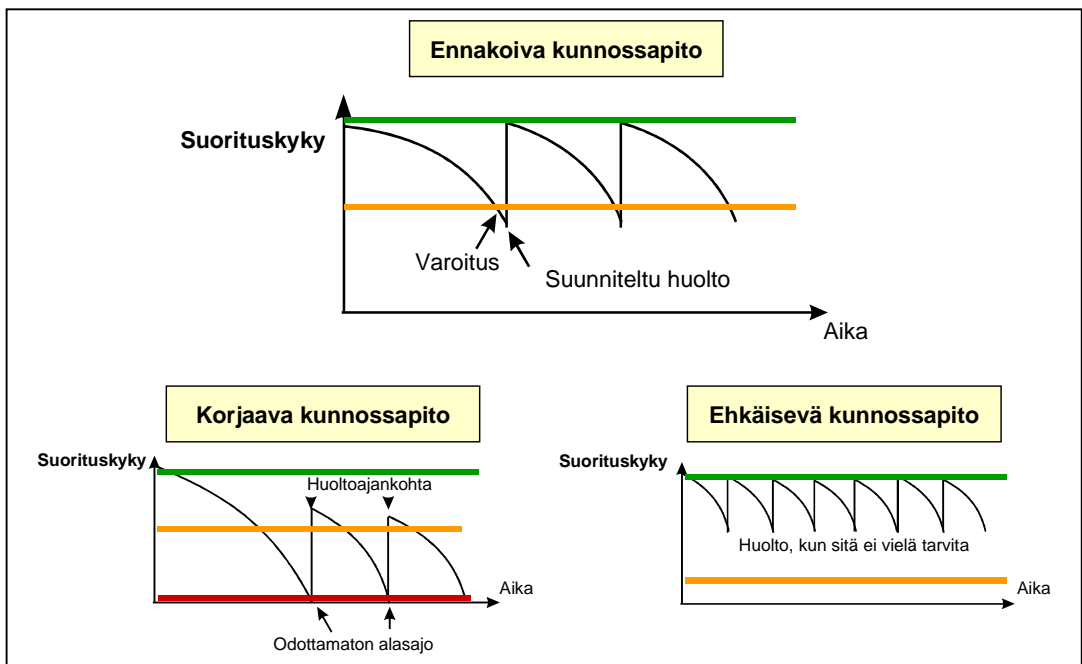
Venttiilien ehkäisevä kunnossapito on osoittautunut kalliiksi tavaksi huoltaa kenttälaitteita. Mikäli prosessia ajetaan useita vuosia ilman laitehuoltoa ja sitten huolletaan kaikki riippumatta siitä, onko se tarpeellista vai ei. Osa laitteista toimii tyydyttävän rajan alapuolella ja osa ei tarvitse erityisiä toimenpiteitä. Tämä malli on erittäin paljon resursseja sitova malli. Huolto ei välttämättä perustu todelliseen tarpeeseen.

Ennakoiva kunnossapito perustuu huoltotarpeen arviointiin. Laitteita huolletaan silloin, kun se on tarpeellista ja silloin, kun siihen on hyvä tilaisuus. Joidenkin laitosten huolto muistuttaa ennakoivaa kunnossapitoa, mutta se perustuu enemmän intuition kuin todelliseen suunnitelmallisuuteen.

Oleellista on saada selville, milloin laitteen suorituskyky on hyväksyttävän rajan alapuolella, jolloin huolto on kannattavaa. Tähän on tarjolla työkaluja ja palveluita. Niillä huoltotarve voidaan määritellä ja huoltotapahtuma suunnitella vastaamaan asiakkaan tarpeita.



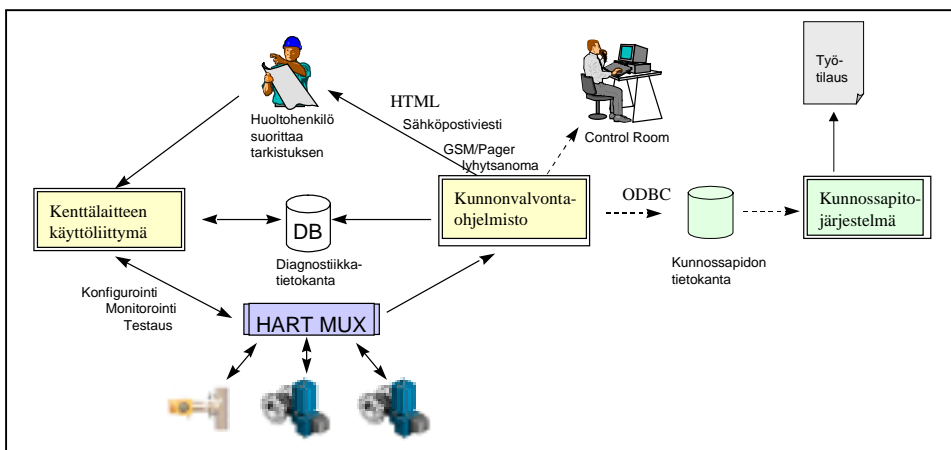
Kuva 3. Säätöventtiilin suorituskykytasoja.



Kuva 4. Ennakoiva kunnossapito verrattuna korjaavaan ja ehkäisevään kunnossapitoon.

## 4. Kenttälaitteiden automaattinen kunnonvalvonta

Kenttälaitteiden kunnonvalvontaohjelmistot antavat tietoa kenttälaitteiden tilasta ja siirtävät tiedon edelleen sitä tarvitseville [1]. Tiedon jalostaminen helposti ymmärrettävään muotoon vaatii vielä lisäkehitystä. Tähänkin on olemassa jo ratkaisuja. Kuvassa 5 on eräs konsepti kenttälaitteen diagnostiikkatiedon siirtämisestä huoltohenkilökunnalle.

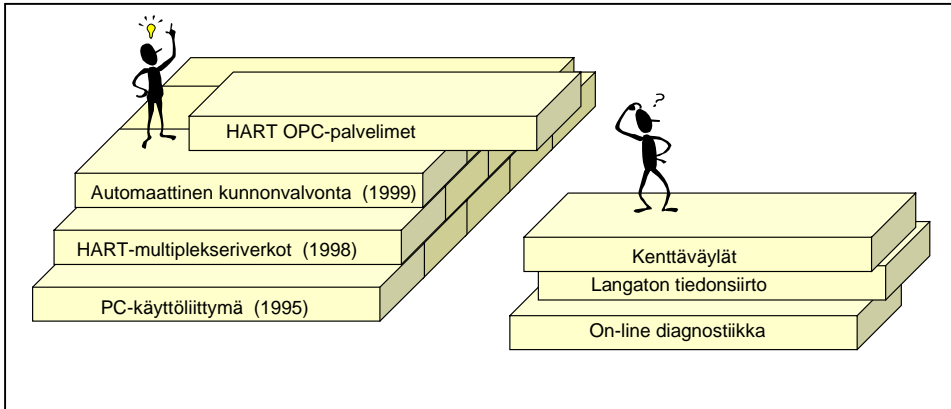


Kuva 5. Tiedon siirto kenttälaitteelta huoltohenkilökunnalle.

Kunnonvalvontaohjelmistot kehittyvät nopeasti. Tiedonsiirron standardointi avaa markkinat useille uusille toimittajille. Prosessiteollisuus on ottamassa käyttöönsä myös uusia tekniikoita, kuten HART OPC-palvelimia (Ole for Process Control), jotka mahdollistaa useamman sovellusohjelmiston käytön samassa HART-verkossa. Kenttäväyläkin tulee tarjoamaan samantyyllisiä avoimia rajapintoja kenttälaitteita loppukäyttäjälle. Niiden valmistuminen ja tuotteistuminen tulee kuitenkin viemään ehkä useita vuosia. Langaton tiedonsiirto tuo uusia mahdollisuuksia myös kunnossapitoon, sillä etäisyydet huollettavan laitteen ja huoltohenkilökunnan välillä voivat olla erittäin pitkiä.

Diagnostiikkatiedon jalostaminen helposti ymmärrettävään muotoon on suuri haaste. Digitaalitekniikka on lisännyt tiedon määrää niin paljon, että kenelläkään ei ole aikaa perehtyä kaikkeen tietoon. Onkin oleellista, että tieto pakataan yksinkertaiseen muotoon. Vain valmiiksi käsitelty oleellinen tieto näytetään lop-

pukäyttäjälle. Kuvassa 6 on esitetty diagnostiikan kehitysvaiheet periaatekaaviona.



*Kuva 6. Venttiilien diagnostiikkatietojen käsittelyn kehitys.*

## 5. Yhteenveto

Kenttälaitteiden käyttövarmuuteen ja huollon optimointiin on olemassa työkaluja, joilla huoltoa voidaan kehittää enemmän ennakoivan kunnossapidon suuntaan. Tavallisten säätöventtiilien käyttövarmuutta voidaan helpommin analysoida uusien työkalujen avulla. Käyttövarmuutta voidaan parantaa kiinnittämällä huomiota laitteen valinnasta käytönaikaiseen valvontaan. Uusien teknologioiden avulla käyttövarmuus tulee helpommin hallittavaksi ja sitä kautta turvallisuus ja tuottavuus kasvavat.

## Lähde

1. Riihilahti, J. Venttiilin ja säätöpiirin hallintajärjestelmä. Teoksessa: Holmberg, K. (toim.). Käyttövarmuuden ja elinjakson hallinta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998. S. 57–63. (VTT Symposium 188).

# **MEMS-mikroantureiden kehitys koneiden kunnonvalvontaan**

Jari Halme, tutkija  
VTT Valmistustekniikka  
Espoo

## **Tiivistelmä**

MEMS-anturit ovat pieniä mikromekaanisia antureita, joiden valmistusmenetelmät on peräisin mikroelektronikasta. Yleisimmin MEMS-antureita käytetään suurivolyymisissa autoteollisuuden sovelluksissa, mutta on odotettavissa, että myös teollisuuden kunnonvalvontasovellusten määrä tulee lähivuosia lisääntymään. Artikkelissa esitetään periaatetasolla tekniset vaiheet MEMS-anturielementin suunnittelusta ja prosessoinnista valmiiksi koteloituun ja testattuun teollisuuden kunnonvalvonta-anturiin. Mittauksista mukana ovat värähtely, akustinen emissio ja hälytysrajatyypinen kaasumittaus. Kaikkien mittausketjussa tarvittavien osien yhteensopivuus ja niiden sovittautuminen mittauskohteen asettamiin vaatimuksiin ratkaisee valmistetun MEMS-anturin toiminnan ja käyttökelpoisuuden.

## **1. Johdanto**

Mikroelektronikan ja -mekaniikan yhdistämistä kutsutaan MEMS-tekniikaksi (Micro Electro Mechanical Systems). MEMS-tekniikalla voidaan valmistaa mikromekaanisia antureita ja toimilaitteita, joissa rakenteiden kriittisten osien kokoluokka on 1–100  $\mu\text{m}$ . MEMS-anturit ovat suurissa sarjoissa valmistettuina halpoja. Kappalehinnaltaan edulliset anturit ja tarve hallita reaaliaikaisesti sekä koneiden ja laitteiden toimintaa että niiden tilaa muuttuvissa olosuhteissa, johtavat antureiden määrän ja käytön lisääntymiseen koneiden kunnonvalvonnassa. On arvioitu, että kymmenessä vuodessa antureiden lukumäärä 10–100-kertaistuu. Kehittämällä teollisuuden kunnonvalvontaratkaisuihin sopivia



MEMS-antureita, voidaan lisäksi hyödyntää piin erinomaiset mekaaniset ominaisuuden teollisuuden anturisovelluksissa.

## **2. MEMS-antureiden mekaaniset ominaisuudet**

MEMS-antureissa perusmateriaalin muodostaa pii. Se on materiaali, jolla on erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Piin murtolujuus on teräksen luokkaa ja tiheys lähellä alumiinin tiheyttä. Piissä ei esiinny plastisia muodonmuutoksia ja se on täysin elastinen murtolujuuteen asti alle 650 °C lämpötilassa [1]. Piistä valmistetun anturin ylittäessä murtolujuutensa se rikkoutuu pieniksi pirstaleiksi eli piianturin mittauselementti on joko täysin ehjä tai rikki, mikä helpottaa anturin toimintakunnon tarkistamista ja anturitietoon pohjautuvan diagnostiikka-järjestelmän hallintaa ja luotettavuutta.

Pii-anturit ovat luonteeltaan stabiileja eikä niissä esiinny juuri lainkaan ryömintää. Piin lämpölaajenemiskerroin on yksi viidesosa teräksen lämpölaajenemiskertoimesta. Näiden ominaisuuksien vuoksi piianturin mekaaninen mittaustarkkuus riippuu sen kalibroinnin tarkkuudesta.

## **3. Mittausten valinta**

Mittausten valinta on aina tapauskohtainen ja riippuu sekä käytössä olevista resursseista, MEMS-anturitekniikan teknisistä mahdollisuuksista että olemassa olevasta tarpeesta. Tarvittaessa on suoritettava selvitys, jossa nämä kartoitetaan. Seuraavassa on käsitelty teknisesti kolme mittausta, joiden toteuttaminen MEMS-tekniikalla on arvioitu aiheesta laaditun esiselvityksen mukaan potentiaalisimmiksi [1]. Valitut mittaukset ovat värähtely, akustinen emissio ja kaasumittaukset.

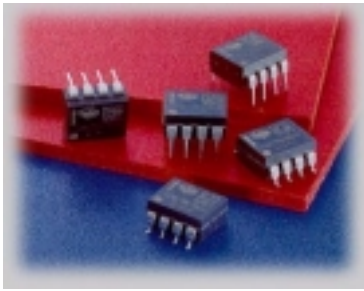
### **3.1 Värähtely**

Värähtelyä mittaavat kiihtyvyysanturit perustuvat anturielementin elastisen muodonmuutoksen mittaamiseen. Kiihtyvyysantureissa mittauselementtinä on usein pieni ulokepalkki, jonka päässä on tunnettu massa. Ulokepalkki toimii

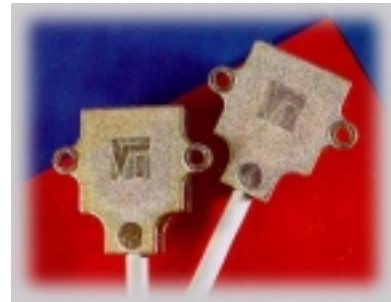
anturin taivutusjousena. Kiihdyttävän voiman vaikuttaessa anturiin, kohdistuu massaan hitausvoima, joka taivuttaa anturin jousta. Mittaamalla massan asemaa anturin jousivakion ja vaimennusvakion ollessa tunnettuja, voidaan kiihtyvyys laskea.

Anturielementin massan asema ja sen muutos voidaan mitata mm. kapasitiivisesti. Kapasitiivinen kiihtyvyysanturi on erittäin stabiili ja kestää suuriakin ylikuormituksia. Lisäksi kapasitiivisen kiihtyvyysantureiden lämpötilariippuvuus on pieni.

Värähtelyä mittaavia, MEMS-tekniikalla valmistettuja kiihtyvyysantureita käytetään suurissa sarjoissa mm. autoteollisuuden tuotteissa (jousitus, ABS, turvatyyny jne.). Kuvassa 1 on esitetty muutama kaupallinen, autoteollisuudelle valmistettu MEMS-kiihtyvyysanturisovellus (VTI Hamlin) [2]. Anturit on suunniteltu pääosin autoteollisuuden tarpeiden pohjalta ja täyttävät sekä hinnaltaan ja toiminnaltaan erinomaisesti näissä kohteissa asetetut vaatimukset. Teollisuuden kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa ja diagnostiikassa (esimerkiksi laakereiden vaurioitumisen valvonta), antureilta vaaditaan usein sekä suurta resoluutiota että laajaa lineaarista taajuuskaistaa. Autoteollisuuden tarpeisiin suunniteltujen antureiden IC-piirejä ei ole suunniteltu suurta resoluutiota vaativiin sovelluksiin. Usein myös mittausalue on autoteollisuuden ratkaisussa riittämätön. Lisäksi antureiden kytkeytyminen värähtelyilmiöön vaatii koteloinnilta erityisratkaisuja, joten autoteollisuudessa käytetyt ratkaisut eivät suoraan sovellu ilman uutta suunnittelua kaikkein vaativimpiin värähtelymittauksiin.



SCA600



SCA100

*Kuva 1. VTI Hamlinin SCA-sarjan 50 g:n kiihtyvyyssantureita. SCA600- sarjan anturikoko on  $9*5*11 \text{ mm}^3$ , SCA100-sarjan koko  $38*13*41 \text{ mm}^3$ .*

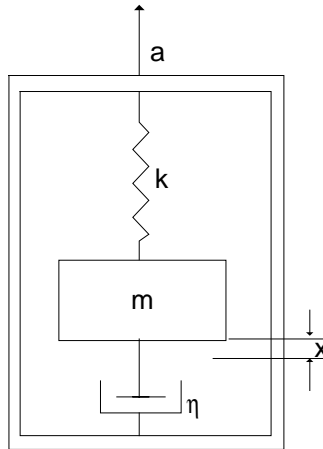
### 3.2 Akustinen emissio

Akustista emissiota (AE) käytävissä menetelmissä mitataan korkeataajuisia, yli 40 kHz taajuudella olevaa värähtelyä. Akustista emissiota syntyy esimerkiksi turbulenttisesta vuotovirtauksesta tai kun rakenteen vaurioituneen kohdan särö kasvaa kuormituksen seurauksena. Menetelmän etu on se, että koneen normaalista käynnistä johtuvat värähtelyt jäävät yleensä kauaksi mittausalueen ulkopuolelle eivätkä vaikuta mittaussignaaliin. [3]

Korkeataajuisia ilmiöitä mitattaessa mittaavan anturin otsapinnan pinta-ala vaikuttaa suoritettaviin mittauksiin. Signaalin aallonpituus riippuu aaltotyypin nopeudesta ja taajuudesta. Jos aallonpituus on yhtä suuri kuin anturin otsapinnan halkaisija anturin havaitseman keskimääräinen liike on nolla. Akustisen emission eri aaltotyyppien nopeus teräksessä on noin 3000 - 5000 m/s. Sovelluksissa, joissa mittaukset ulottuvat MHz-alueelle, otsapinnan halkaisijan täytyy olla pienempi kuin 3 mm.

Koska akustinen emissio on rakenteen värähtelyä, niin anturielementeissä voidaan käyttää samoja ratkaisumalleja kuin kiihtyvyyssantureissa. Kiihtyvyyssanturityyppisen AE-anturin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. Seisminen massa  $m$  on ripustettu jousen varaan, joka on kiinni anturin kotelossa. Kun anturia liikutetaan kiihtyvyydellä  $a$ , havaitaan seismissen massan siirtymä  $x$

hitausvoiman vaikutuksesta. Siirtymä voidaan ilmaista sähköisenä signaalina kapasitiivisessa anturissa.

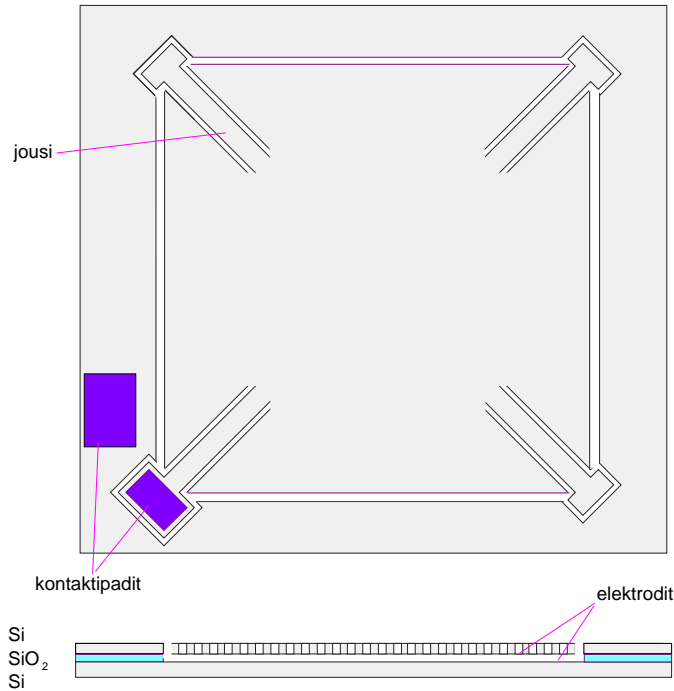


*Kuva 2. AE-anturin toimintaperiaate.*

Akustisen emission anturein on oltava riittävän herkkä havaitsemaan pienetkin AE-lähteistä syntyneet värähtelyilmiöt. Havainnointikyky riippuu sekä anturin resoluutiosta että värähtelyn taajuuskaistasta ja sen yksittäisten taajuuksien signaali/kohina-suhteista. Hyödyntämällä anturin mekaanista resonanssitaajuutta, voidaan suunnitella antureita, jotka kytkeytyvät mahdollisimman hyvin mitattavaan värähtelyyn. [4]

Akustisen emission mittaamiseen sopiva, laajakaistainen resonoiva anturi saadaan aikaan asettamalla monta anturia matriisiksi samalle piirille. Anturit mitoitetaan siten, että niiden resonanssitaajuuksien kolmen dB:n pisteet leikkaavat, jolloin taajuuskaista saadaan tasaiseksi.

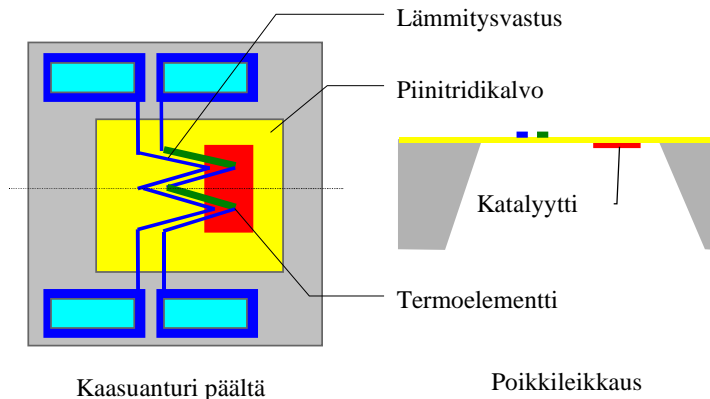
Kuvassa 3 on esitetty yksi anturielementti. Anturien resonanssitaajuutta voidaan säätää muuttamalla sähköstaattista voimaa anturikapasitanssilevyjen välillä, jolloin bias-jännitteen avulla voidaan muuttaa anturimatriisin kaistaa. Riittävän resoluution aikaansaamiseksi tulee anturien ilmarako vetää mahdollisimman pieneksi. [4]



*Kuva 3. 700 kHz:n AE-anturi. Jousen leveys 20  $\mu\text{m}$ , paksuus 8  $\mu\text{m}$ , pituus 50  $\mu\text{m}$ , liikkuvan kondensaattorilevyn pituus 500  $\mu\text{m}$ .*

### 3.3 Kaasuanturi

Prosessiputkistoissa mm. venttiilien vääntöakseleiden tiivisteiden läpi saattaa kulkeutua haitallisia kaasuja, jotka pienistä pienistä määristä huolimatta voivat ylittää kohonneet/kohoavat viranomaismääräykset. Pienten kaasupitoisuuksien mittaaminen on MEMS-tekniikalle potentiaalinen sovelluskohde, sillä mitta-kohteet ovat tyypillisesti ahtaita (mm. venttiilin vääntöakseli), mittavat pitoisuudet ovat pieniä ja tasaisesti jakautunutta kaasua. Eräs potentiaalinen menetelmä hiilivedyksen mittaamiseen on käyttää anturissa mikrokatalyyttipintaa (esim. platina), joka reagoi hiilivedyn ja hapen kanssa (kuva 4) [5].



*Kuva 4. Kaasuanturin periaate.*

Jokaisen kahdesta materiaalista muodostuvan liitoksen yli syntyy potentiaaliero, jota kutsutaan termiseksi jännitteeksi. Ilmiö aiheuttaa lämpötilaeron muutoksen potentiaalieroksi. Johdinparin liitosten lämpötilaerosta seuraa terminen jännite.

Yhden termoliitoksen tuottama jännite on hyvin pieni, joten on tarkoituksenmukaista käyttää useita liitoksia sarjassa. Kaasuanturissa käytetään sadan liitoksen muodostamaa sarjaa, jolloin termoparin tuottama signaali saadaan laskemalla yhteen kaikkien liitosten tuottama termojännite.

Ympäristön lämpötilan muutosten vaikutus detektoriin on estetty pitämällä anturin kalvo vakio­lämpötilassa kuvassa 4 näkyvän lämmitysvastuksen avulla. Anturin antama jännite on nolla tasapainotilassa, mutta katalysaattorin pinnassa palavan kaasun läsnäollessa anturin napoihin syntyy jännite. [5]

## 4. Toiminnan suunnittelu- ja prosessointi

Kunnonvalvontamittauksissa käytetyille mittauksille asetetut vaatimukset riippuvat sovelluskohteesta ja sen prosessiolosuhteista. Mittauksilta vaadittavat ominaisuudet, mittaus- ja taajuusalue sekä mittausväli vaihtelevat huomattavasti erilaisten kohteiden välillä. Usein vaatimukset on sovitettava kohteen kriittisyyden ja sen tunnetun vikaantumismallin mukaisiksi. Tämän hallinta

edellyttää tietämystä sekä monitoritavista ilmiöistä että niiden havainnoinnin asettamista resoluutio- ja stabiilisuusvaatimuksista.

Asettamalla edellä kuvatut reunaehdot mittauksille ja käyttämällä dynaamisia mallinnusohjelmia, voidaan sekä anturin mekaaniset että sähköiset ominaisuudet mallintaa. Simuloimalla laadittuja malleja voidaan anturin periaatteellinen toiminta testata. Varioimalla simuloinnissa eri parametreja saadaan perustieto anturin ominaisuuksista ja toiminnasta. Samalla voidaan varmistaa että anturit täyttävät niille asetetut vaateet ja reunaehdot. Suunnittelun perusteella piirretään antureille maskit, joita tarvitaan anturielementtien prosessoinnissa pii-kiekolle. Samalla kiekolle prosessoitavien antureiden ei tarvitse olla identtisiä. Tämä on tärkeää uusien antureiden suunnittelussa ja valmistuksessa, jolloin voidaan kokeilla erilaisten parametrien ja ratkaisujen toimivuutta.

MEMS-anturit valmistetaan mikroelektronikasta periytyillä menetelmillä. Uusin mikromekaanisten rakenteiden valmistusmenetelmistä on SOI-tekniikka. SOI on lyhenne englantilaisista sanoista *Silicon on insulator*. SOI-tekniikassa oksidoitu ja oksidoimaton piikieppo liitetään toisiinsa fuusiobondauksella. SOI:lla valmistetut mikrorakenteet voivat olla jopa 500 mikrometriä paksuja, jolloin anturielementti saadaan kestämään haluttaessa mm. suuria kiihtyvyyksiä. [6]

Prosessoitavien antureiden koosta riippuen yhdelle pii-kiekolle voidaan prosessoida yhteensä noin 1500 anturielementtiä. Prosessoinnin jälkeen anturielementit sahataan irti toisistaan ja testataan elementtien toiminta. Testauksessa osa anturielementeistä hylätään. Valmistusprosessin saanto on tyypillisesti noin 90 %. Piikiekon valmistusprosessointi on kertasuorituksena melko kallista. Kymmenen pii-kiekon prosessointi voi maksaa noin 100 000 mk. Antureiden määrään suhteutettuna kustannukset ovat kuitenkin edullisia verrattuna perinteiseen anturinvalmistukseen. Saatu anturielementti muodostaa perusosan lopullisen anturin valmistuksessa. Toimiakseen suunnitelluissa kohteissa sille asetettujen vaateiden mukaisesti, elementti vaatii vielä toimiakseen sekä vaatimukseen räätälöidyn mittaussiirin, anturikotelon sekä testauksen kenttä/laboratorio-olosuhteissa.

## 5. Mittauspiiri

MEMS-anturielementti ja sen tarvitsema, IC- ja elektroniikkapiireistä muodostuva mittauspiiri voidaan valmistaa integroidusti. Koska valmistusprosessoinnin optimoinnin kannalta on parempi valmistaa anturielementit ja mittauspiirit erikseen, osat valmistetaan yleensä eri prosessoinnilla. Mittauspiirin toiminta määrää usein anturin sisäisen kohinatason. Kohinatason suuruus vaikuttaa suoraan anturin dynaamiseen ja staattiseen resoluutioon, joten mittauspiiri on sovitettava mittauksille asetettujen vaatimusten mukaiseksi. Esimerkiksi autoteollisuuden sovelluksiin valmistettujen kiihtyvyyssantureiden kohina on pääasiassa antureiden mittauspiiristä peräisin olevaa sähköistä kohinaa, vaikka anturielementit ovat itsessään on hyvin robusteja ja vähäkohinaisia.

Suunnitteleamalla anturielementeille sähköinen takaisinkytkentä, voidaan MEMS-antureiden dynamiikkaa ja resoluutiota parantaa huomattavasti. Takaisinkytkennän sisältävä mittauspiiri voidaan suunnitella sekä uudelle anturielementille että esimerkiksi autoteollisuuden käyttämälle anturielementille jos katsotaan, että muuten antureiden toimintakyky ei ole riittävän kattava tarpeisiin nähden. Usein tarpeisiin sovittautuminen vaatii useita iteraatio-kerroksia ennen kuin anturielementin ja mittauspiirin toiminta nivoutuu luotettavasti yhteen mittaustarpeisiin nähden.

MEMS-anturissa mittauspiirin toimintaa rajoittava tekijä on lämpötila. IC-piirejä sisältävän mittauspiirin käyttölämpötila-alue on noin  $-40 \dots +125$  °C. Alueen ulkopuolella piirin toimintaa ei voida taata. Lisäksi piirien väliset johdotukset ja juotokset ovat kriittisiä eivätkä metallit eivät saa korrosoitua. Kiihtyvyyss- ja AE-anturissa korrosoituminen voidaan eliminoida käyttämällä hermeettistä kotelointia.

## 6. Kotelointi

MEMS-komponenttien koteloinnin valmistusmenetelmät ovat saaneet alkunsa puolijohdeteollisuuden vastaavista menetelmistä. Tavallisesti komponentit on asennettu koteloon, jolloin ne voidaan mm. suojata haitallisilta prosessiolosuhteilta. MEMS-antureiden kotelon tulee tarjota liikkuvia osia sisältäville MEMS-komponenteille mekaaninen tuki, sähköiset liitännämahdollisuudet



ulkopuolisille järjestelmille, suojaus haitallisilta prosessiolosuhteilta sekä varmistaa riittävä lämmönjohtuminen ympäristöön. Kotelolla mahdollistetaan myös tarvittava kiinnitys koneisiin ja laitteisiin. [7]

Koska antureita käytetään mittaamaan ympäristöön liittyviä ilmiöitä, täytyy koteloiden suunnittelussa huomioida se, että mitattava suure pääsee vaikuttamaan anturielementtiin. Kehitettävän kaasuanturilla tämä on toteutettu pakkaamalla anturi päältä avonaiseen koteloon.

Antureita, joiden täytyy olla suorassa vuorovaikutuksessa ympäröivän prosessin kanssa, suunniteltaessa on huolehdittava siitä, että anturielementti sekä kestää ympäröiviä prosessiolosuhteita että on niiden muutoksille mahdollisimman immuuni. Tarvittaessa anturielementtien prosessiolosuhteiden sietoisuutta voidaan kohottaa päällystämällä anturielementit esimerkiksi piinitridi- tai piioksidikalvoilla.

Värähtelyä mittaavien antureiden ei tarvitse olla prosessin kanssa suoraan suorassa vuorovaikutuksessa, sillä ulkoinen kiihtyvyys vaikuttaa suoraan koteloiden sisällä olevaan ulokepalkkiin. Anturielementti ja sen liityntäelektronikka voidaan koteloida täysin hermeettisesti, jolloin kiihtyvyyttä ja värähtelyjä mittaavat anturit saadaan kestävämmän koviakin prosessi- ja ympäristöolosuhteita. Koteloidun anturielementin ulokepalkille jätetään tarvittaviin mittaussuuntiin vapaata tilaa, jossa palkki voi vapaasti liikkua anturin suunnitellun mittaussuunnan puitteissa.

Koteloinnin tulee myös suojata anturi kiinnityskohdan pinnanjännityksiltä ja muodonmuutoksilta. Tähän täytyy kiinnittää erityistä huomiota silloin, kun käytetään kapasitiivisia antureita. Kapasitiivisilla antureilla koteloiden tulee olla riittävän jäykkä, jotta ympäristön muodonmuutokset eivät pääse vaikuttamaan anturielementin asemaan.

Kokonaisuudessaan antureiden oikeaoppisen ja sovelluskohteeseen tarkoituksenmukaisimman suojauksen ja koteloinnin suunnittelu on vaativa ja kompleksinen tehtävä, joka pitää ratkaista aina tapauskohtaisesti.

## 7. Testaus

Koteloidun, anturielementin ja mittauspiirin sisältämän anturin toiminta pitää testata valvotuissa laboratorio ja/tai todellisissa kenttäolosuhteissa suoritettavilla kunnonvalvontamittauksilla ennen kuin kehitetyn anturin anturin toiminta voidaan varmistaa. Mittauksissa on usein syytä käyttää referenssinä jotakin toista anturia, jonka vaste on kalibroitu käytetyllä mittaus- ja taajuusalueella. Keräämällä riittävä määrä mittauksia eri prosessi- vika- ja vauriotilanteista voidaan arvioida kehitetyn anturin toimintakyky testattavissa olosuhteissa. Jotta anturit toimisivat halutulla tavalla resoluutiovaatimukset täyttäen, on antureiden elektroniikkaosa usein viritettävä vastaamaan kohteessa/kohteissa vallitsevia kenttäolosuhteita. Suunnittelemalla anturi, joka itse pystyy sovitautumaan mittausolosuhteissa tapahtuviin muutoksiin, voidaan testausta jouduttaa ja saavuttaa riittävä resoluutio vikojen ja vaurioiden havainnoimiseksi. Esimerkiksi kehitettävällä akustisen emission MEMS-anturilla, joka automaattisesti etsii skannaamalla mitattavan vikaantumisilmion ja taustakohinan kannalta sopivimman taajuusalueen, saavutetaan paras signaali/kohina-suhde ja mittausresoluutio.

## 8. Yhteenveto

MEMS-tekniikka tarjoaa mahdollisuuden valmistaa anturielementit suurissa sarjoissa edullisesti pii-kiteestä, jonka mekaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset. Piistä valmistettu anturielementti ei yksin kuitenkaan riitä vaan sen yhteydessä on suunniteltava ja valmistettava myös muut mittausketjussa tarvittavat osat sekä sovitettava ne mittauskohteen asettamien vaatimusten mukaisiksi. Vasta kokonaisuus, joka koostuu mikromekaanisesta anturielementistä, elektronisesta mittauspiiristä, mekaanisesta kotelosta sekä toiminnan sähköisistä ja mekaanisista laboratorio- ja kenttämittauksista sekä -testauksesta, ratkaisee valmistetun MEMS-anturin toiminnan ja käyttökelpoisuuden. Lisäksi uuden anturin suunnittelussa ja valmistuksessa on aina varauduttava testauksesta ja kentältä tulevaan palautteeseen ja sen aiheuttamiin uusintakierroksiin anturin suunnittelussa ja valmistuksessa.

## Kirjallisuusviitteet

1. Halme, J. Mikromekaaniset MEMS-anturit ja niiden käytettävyys kunnonvalvonnassa. Espoo: VTT Valmistustekniikka, 1997. 40 s. (Raportti VALB 255).
2. VTI Hamlin, Acceleration Sensors. [viitattu 10.9.1999]. Saatavissa: <http://www.vti.fi/Products/Sensors/sensors.htm>.
3. Reuben, B. The role of acoustic emission in industrial condition monitoring. *International Journal of COMADEM*, 1(4), 1998, pp. 35-46.
4. Sillanpää, T. ja Seppä, H. Mikromekaaninen akustisen emission anturi. Espoo: VTT Automaatio, 1999. 6 s. (Väliraportti 99R1047-1)
5. Saarilahti, J. Kaasuanturin prosessointi. Gass 1.0 Espoo: VTT Elektroniikka, 1999. 40 s. (Tilanneraportti).
6. Lehto, A. Mikromekaniikan luennot. Kalvosarja. Espoo: VTT.
7. Ristic, L. ja Shah, M. Älykkäitä antureita MEMS-teknologialla. *ElektroniikkaUutiset* 3/97, s. 12–13.

# Automatisoitujen laitteiden käyttövarmuus – tilannekatsaus

Tony Rosqvist, tutkija  
Olli Ventä, ryhmäpäällikkö  
VTT Automaatio  
Espoo, Suomi

## Tiivistelmä

Raportissa on selvitetty automatisoitujen laitteiden käyttövarmuutta Suomen teollisuudessa. Teollisuudenalat ovat prosessi-, paperi-, metalli-, energia-teollisuus (ei ydinvoima) ja kone- ja laitevalmistajat. Selvitys perustuu kirjallisuushakuihin, teollisuudelle suunnattuun kyselyyn sekä tutkijoiden haastatteluun. Selvityksen tuloksena on hahmotelma tutkimusaiheita, joille näyttäisi olevan tarvetta kohdistaa tutkimusresursseja julkisrahoitteisina tutkimusprojekteina lähitulevaisuudessa.

## 1. Selvityksen tausta

Kansainvälinen kilpailu ja korkeat laatutavoitteet asettavat kiristyviä vaatimuksia teollisuuden tehokkuudelle. Turvallisuus ja ympäristöystävällisyys ovat keskeisiä tekijöitä sekä asiakkaiden että yhteiskunnan silmissä. Tehtaiden on toimittava keskeytyksettä niille asetettujen vaatimusten mukaisesti.

Monimutkaistuvat tuotteet ja tuotantojärjestelmät sekä lisääntyvä tietotekniikan hyödyntäminen ovat tehneet automaatiojärjestelmistä kriittisen menestystekijän, jota ilman tuotantoa ei voida kannattavasti pyörittää. Samalla itse automaatiojärjestelmät ovat monimutkaistuneet. Ne perustuvat ohjelmoitavaan tekniikkaan, jonka luotettavuuden ja käyttövarmuuden varmistaminen ja osoittaminen edellyttävät uudenlaisia lähestymistapoja.

Automaation käyttövarmuuteen liittyykin monia poikke teknisiä tekijöitä. Satunnaisten laitevikojen lisäksi entistä merkittävämpään asemaan ovat nousseet systemaattiset suunnitteluvirheet, kuten ohjelmointivirheet. Usein tärkeimmäksi ongelmien lähteeksi on havaittu puutteet käyttäjien tarpeiden ja toimintojen määrittelyssä. Oma osuutensa kokonaisuudessa on myös järjestelmän ylläpidolla, käyttäjillä sekä käyttöliittymillä. Nämä seikat tekevät automaation luotettavuuden ja käyttövarmuuden arvioimisen varsin vaikeaksi. Erilaisia selvityksiä on toki tehty, mutta esim. automaation todelliset epäkäytettävyyskustannukset eivät ole tarkkaan tiedossa. Jotta automaatiojärjestelmien ja automatisoitujen laitteiden käyttövarmuuden parantamiseen liittyvää tutkimusta osataan Suomessa paremmin kohdistaa, on tärkeää saada tietoa niistä kokemuksista, joita automaatioalalla toimiviin yrityksiin on kertynyt.

## **2. Selvityksen tavoitteet ja rajaus**

Automatisoitujen laitteiden käyttövarmuuden selvitys liittyy Tekesin Käyttövarmuus kilpailutekijänä (lyh. KÄKI) -teknologiaohjelmaan. Selvityksen tavoitteena on tunnistaa tämän päivän automatisoitujen laitteiden käytön ja luotettavuuden ongelmakohdat ja kehittämiskohteet KÄKI-teknologiaohjelmassa edustettuina olevilla teollisuuden aloilla (energia-, prosessi- ja metalliteollisuus). Selvityksen tavoitteena on myös luoda katsaus automaation käyttövarmuudesta tehtyihin aiempiin tutkimuksiin, nykyiseen tutkimustoimintaan sekä ehdottaa aiheeseen liittyviä tutkimuskohteita. Selvitykseen liittyvän kyselyn kautta on haettu tietoa tutkimusrahoituksen suuntaamiseksi aloille, jotka Suomen teollisuudessa nähdään relevanteiksi.

Selvitys kohdistuu automatisoituihin laitteisiin sekä näiden laitteiden ja ympäröivien järjestelmien liityntäpintoihin. Tuotannonohjaukseen, logistiikkaan ja muihin liiketoiminnan päätöksentekoa lähellä oleviin järjestelmätoimintoihin ei oteta kantaa tässä selvityksessä.

## 3. Aiheeseen liittyvät muut selvitykset

### 3.1 Informaatiohaku

VTT Tietopalvelun suorittamassa haussa käytettiin hakusanojen kombinaatioita käsitteillä "käyttövarmuus", "luotettavuus" ja "automaatio". Tietokannat olivat TKKK:n julkaisut/VTT:n ja TKK:n tietokannat: Vintti, News, Kati ja Koti/TT-Tieto. Manuaalisen jatkoseulonnan tulokset ovat liitteessä 1. Suuri osa viitteistä on suhteellisen vanhoja. On huomattava, että julkisten raporttien vähäisyys ei välttämättä korreloi automaation käyttövarmuustutkimuksen volyyymiin. Todennäköisempää on, että yritykset tekevät omia ponnistelujaan projekteissaan, jotka eivät ole julkisia. DI-töitten vähäistä määrää tämä ei kuitenkaan selitä. Syy tähän olisi arvokasta selvittää. Korkeakoulujen ja yritysten yhteistyö on ensiarvoisen tärkeää teorian ja kokemuksen vuorovaikutuksen tehokkaassa hyödyntämisessä. Kaiken kaikkiaan raportteja ja artikkeleita automaation ja käyttövarmuuden vuorovaikutuksesta löytyi yllättävän vähän. Haun laajentaminen Ruotsiin ja Norjaan ei tuonut lisätietoa julkisrahoitteisista hankkeista kyseisen aiheen tiimoilta. Hakua ei laajennettu kattamaan muita Euroopan maita tai USA:ta.

- Jari Kiviö: Käyttövarmuuden huomioiminen tuotannon automatisointiprojekteissa (DI-työ, 1990).
- Jari Järvinen, Matti Mikkanen: Kokemuksia ohjelmoitavan automaation luotettavuudesta (STUK, 1993).
- Evaluation of basic research in Automation Technology in Finland (Suomen Akatemian julkaisuja, 1986).
- Automaattisen tuotannon turvallisuus ja käyttövarmuus (TSR, 1990 ja 1991).

Muita kiinnostavia viitteitä, joihin ei luottamuksellisuus- tai lainasyistä voitu tämän raportin aikarajaan mennessä tutustua, ovat:

- Markus Sjöberg: Reliability engineering methods in the design of Automation; The implementation of a Failure Reporting, Analysis and Corrective Action (DI-työ, 1999).

- Olli Pitkänen: Tuotannonohjausjärjestelmien liittäminen automaatiojärjestelmiin (DI-työ, 1990).

Edellä mainittujen viitteiden lisäksi löytyy erinomainen turvallisuusnäkökohtia painottava opas "Out of Control" (HSE, 1995), jossa esitetään esimerkkejä ohjausjärjestelmän vikaantumiseen johtavista syistä ja liitetään nämä järjestelmän elinkaareen eri vaiheisiin.

### **3.2 Oleelliset kotimaiset sarjajulkaisut**

Automaatioalan sarjajulkaisut Automaatioväylä, Paperi ja Puu sekä Kunnossapito-lehti kirjoittavat säännöllisesti selvityksen aihetta sivuavia lyhyitä artikkeleita. Alla on poimintoja kolmesta 90-luvulla tehdystä kirjoituksesta.

- Timo Nyberg (TTKK), Automaatioväylä 5/1996.
- Eero Silvennoinen ja Bror Salmelin (Tekes), Automaatioväylä 4/1997: "Suomalaisten teollisuusyritysten vahvuuksia ovat olleet ... kyky integroida tuotteita kokonaisuuksiksi".
- Marja Korpivaara (toim.): Paperi ja Puu, 1996: "Valmet Automation panostaa luotettavuuteen".

### **3.3 Päätyneet ja käynnissä olevat julkisrahoitteiset projektit**

Taulukkoon 1 on koottu tuoreimmat ja käynnissä olevat julkisrahoitteiset projektit, joiden tavoite liittyy olennaisesti automaatiojärjestelmien laadun ja käyttövarmuuden hallintaan. Taulukkoon on lyhyesti merkitty projektin päätavoitteet ja yhdyshenkilö.

*Taulukko 1. 1990-luvun julkisrahoitteisia automaatioprojekteja.*

<b>Nimi</b>	<b>Tavoite</b>	<b>Yhdyshenkilö</b>
OHA	Tavoitteena on kehittää, kokeilla ja demonstroida viranomaisten ja voimayhtiöiden tarvitsemia menettelytapoja ja työvälineitä ydinvoimalaitosten ohjelmoitavien automaatiosovellusten turvallisuuden arviointiin.	Pentti Haapanen, VTT Automaatio
PASSI	Tavoitteena on käyttökokemuksen hyödyntäminen ohjelmoitavan automaatiosovelluksen kelpoistamiseen.	Urho Pulkkinen, VTT Automaatio
EKS	Tavoitteena on koordinoida sovelluskohtaisia tutkimus- tai kehitysprojekteja, joissa hankitaan sekä teoreettisia ja käytännön valmiuksia soveltaa RAMS-analysointimenetelmiä sovelluskohtaisesti järjestelmä-, elektroniikkakortti- ja/tai ohjelmistotasoihin tuotteen elinkaaren eri vaiheissa.	Hannu Harju, VTT Automaatio
SACHE	Tavoitteena on kehittää validointi- ja arviointimenettely sulautettujen ohjelmistojen turvallisuuden ja luotettavuuden osoittamiseksi terveydenhuollon tuotteessa sekä tutkia PC-pohjaisten järjestelmien soveltuvuutta lääkintälaitesovelluksissa.	Hannu Harju, VTT Automaatio
ASVA	Tavoitteena on kehittää suunnittelu- ja arviointiohjeisto, joka tukee panosautomaation määrittelyä, dokumentointia, osapuolten välistä tiedonvaihtoa sekä laadun arviointia elinkaaren eri vaiheissa.	Teemu Tommila, VTT Automaatio



## 4. Selvityksen aikana tehdyt kyselyt

### 4.1 "Automatisoitujen laitteiden käyttövarmuus" -kysely

Kyselykaavake lähetettiin 46 henkilölle, joiden edustamassa yrityksessä automaatiolla on merkittävä osuus joko tuotantoprosessin tai lopputuotteen osana. Vastauksia saapui 17 kpl. Vastauksia on analysoitu ensin yhtenä kokonaisuutena, sitten teollisuusaloittain: prosessi, metalli, energia ja kone- ja laitevalmistajat. Kolme ensinmainittua edustavat lähinnä loppukäyttäjää. Kone- ja laitevalmistajat edustavat alihankkijaa. Jakaumakuvat alla liittyvät kyselyn kohtiin 4, 5 ja 6. Kuvien lyhenteet ovat

ohj = ohjelmavika

lai = laitevika

ope = operaattorin virhe

ymp = ympäristöolosuhteista aiheutuneet viat

ys = yhteensopivuusongelmista johtuvat viat

muu = muut viat (lähinnä määrittelemättömät)

ant = anturit

kt = kenttälaitteet

väy = tietoliikenneväylät

tkl = tietojenkäsittelylaitteet

val = valvomolaitteet

mää = määrittelyvaihe

suu = suunnitteluvaihe

val = valmistusvaihe

ase = asennusvaihe

käy = käytön aikaiset virheet

kupi = kunnossapidon virheet

sat = satunnaisviat

var = varusohjelmisto

sov = sovellusohjelma/mittaus-&ohjauslogiikka

mää = määrittelyvaihe

ohj = ohjelmointivaihe

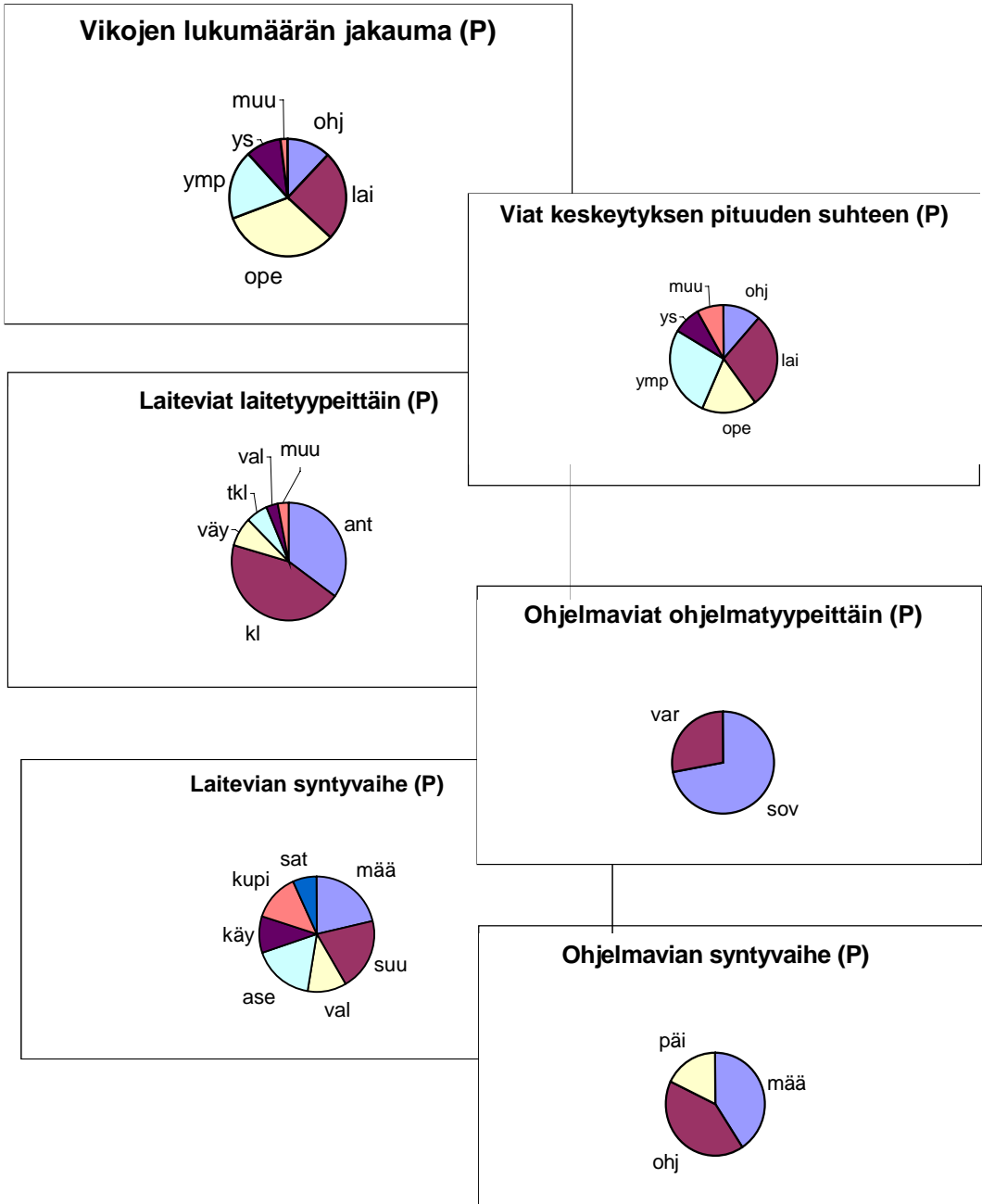
päi = päivitysvaihe

*Automaatioala kokonaisuutena (yleiskuva):*

Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta teollisuuden alat Suomessa katsovat automaationsa edustavansa alansa korkeinta osaamista. Yhtä lailla vallitseva on näkemys automaation asteen lisääntymisestä niin tuotannossa kuin lopputuotteissa.

*Prosessi/paperi (7 kpl):*

Prosessi- ja paperiteollisuudessa viat ja häiriöt ovat peräisin lähinnä laitevioista ja operaattorin virheistä. Laiteviasta syntynyt keskeytys on kuitenkin keskeytyksen pituuteen eniten vaikuttava vikatyyppe (ks. kuvasarja 1). Täysi yksimielisyys vallitsi laitevian laitetypistä: anturit ja kentälaitteet ovat ongelma. Vastauksista ei kuitenkaan pysty varmuudella päättelemään vikojen syntyperän ajankohtaa kohdistettuna laitteen elinkaareen vaiheisiin. Määrittely- ja suunnitteluvaiheessa tehdyt virheet näyttäisivät olevan pääsyyt vian ilmenemiselle. Viat sovellusohjelmien (anturi/ohjauslogiikka) ja varusohjelmien välillä näyttäisivät jakaantuvan tasaisesti. Vrt. kuva: 75 % vioista on sovellusohjelmistoissa ja noin 25 % varusohjelmistoissa! Ohjelmavikojen esiintyminen määrittely- ja ohjelmointivaiheissa näyttäisi jakaantuvan tasan. Vikojen esiintymisen kasvua odotetaan lähinnä ohjelmissa ja operaattorien toiminnassa. Yksittäiset havainnot automaation tuottamista ja poistamista käyttövarmuusongelmista vaihtelivat suuresti. Ongelmia liitettiin järjestelmän monimutkaisuuden hallintaan, mutta samalla todettiin monipuolisten prosessi- ja järjestelmätietojen mahdollistavan vikatilanne-ennakoinnin. Kysymys on järjestelmän käytön edellyttävän asiantuntemuksen takaamisesta käyttäjille. Tutkimustoiveet liittyivät lähinnä kunnossapidon optimoinnin sekä varusohjelmien laadun analyysimenetelmien kehittämiseen. Mutta myös automaatiojärjestelmien määrittelytyökalujen yhtenäistämistä ehdotettiin.



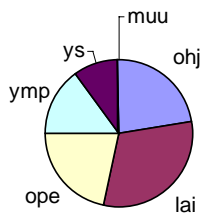
Kuva 1. Prosessiteollisuuden vikatilastoja selvityksen perusteella.

*Metalli (4 kpl):*

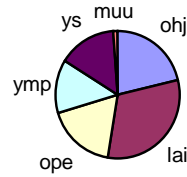
Metallialalla todettiin myös Suomen automaatioasteen olevan kansainvälistä korkeampi. Pääsääntöisesti odotetaan automaatiasteen kasvavan sekä tuotannossa että tuotteissa. Ohjelma- ja laitevikojen osuus vioista on suurin, mutta myös operaattorivirheet ovat merkittäviä (ks. kuvasarja 2). Laitevioista aiheutunut keskeytyksen pituus koettiin merkittävimmäksi. Laiteviat keskittyvät anturi- ja kenttälaitteiden ohella myös tietoliikenneväyliin ja kaapelointeihin. Prosessialasta poiketen näyttäisi laitevikojen syntyvaihe olevan painottunut käytön aikaisiin vikoihin (satunnaisviat) sekä suunnitteluvikoihin. Ero saattaa johtua myös vikaantumissyiden tulkintaeroista: satunnaisviat saatetaan luokitella määrittelyvioiksi ajatuksella, että oikein määriteltä laite ei juuri tuota vikoja normaalissa käyttöympäristössä.

Mittaus- ja ohjelmalogiikka on havaittu yleisimmäksi sovellusohjelman vikatyypiksi. Ohjelmointivaihe näyttäisi olevan ohjelmavikojen syntyvaihe. Tulevaisuudessa ei odoteta tietyn tyyppisten vikojen yleistyvän. Todettiin kuitenkin, että keskeytysten pituus tulee kasvamaan per vika, ellei älykkääseen vikadiagnostiikkaan ja vikatietoihin liittyvää potentiaalia tulla hyödyntämään laitteiden luotettavuuden parantamiseen paremmin. Yleensä kunnossapidolta tullaan edellyttämään tietotaitoa entistä enemmän käyttövarmuuden varmentamiseksi.

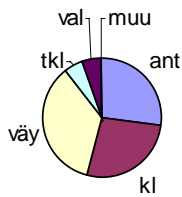
### Vikojen lukumäärän jakauma (M)



### Viat keskeytyksen pituuden suhteen (M)



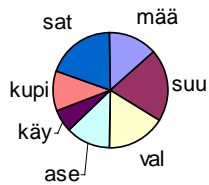
### Laiteviiat laitetyypeittäin (M)



### Ohjelmaviiat ohjelmatyypeittäin (M)



### Laiteviiian syntyyvaihe (M)



### Ohjelmaviiian syntyyvaihe (M)



Kuva 2. Metalliteollisuuden vikatilastoja selvityksen perusteella.

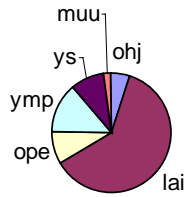
*Energia (2 kpl.):*

Energia-alalla katsottiin oman tuotannon automaatioasteen olevan kansainvälistä korkeammalla tasolla. Automaatioasteen katsotaan nousevan tulevaisuudessa. Kokemukset vikatyypeistä ja vikojen syntyvaiheista vaihtelivat kovasti (johtuen osittain erilaisesta asiakaskunnasta), eikä näin pienen otoksen perusteella voida vetää johtopäätöksiä alan käyttövarmuusongelmien luonteesta yleensä. Arviot automaation tuomista ongelmista tulevaisuudessa ovat kuitenkin yhteneväiset: mikäli operaattoreilla ei ole automaation tuntemusta riittävästi, on odotettavissa, että monimutkaistuvat järjestelmät aiheuttavat häiriötilanteissa epäkäytettävyyttä, mikä olisi muutoin vältettävissä. Kehittämispansostusta toivotaan tietojärjestelmien yhtenäistämisen suhteen: prosessi- ja järjestelmätilojen ja toisaalta kunnossapitotietojen integrointi uusien mediateknologioitten (esim. multimedia, hyperteksti) pohjalta.

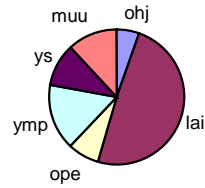
*Kone- ja laitevalmistajat (4 kpl.):*

Tätä luokkaa edustavat lähinnä automatisoitujen laitteiden (älykkäät anturit, toimilaitteet, työkoneet ym.) valmistajat. Kokemukset laitteiden käyttövarmuusongelmista vaihtelevat siksi suuresti. Yritykset pitivät tuotteidensa automaation tasoa korkeana ja odottivat tason entisestään nousevan. Yhteisenä piirteenä oli laitevikojen korostunut asema vikatyypinä niin esiintyvyyden kuin kriittisyydenkin osalta (ks. kuva 3). Kyselyn kohta 5a (kirjoita kysymyksen nimi) ei ole aiheellinen tälle ryhmälle, koska kokemukset kohdistuvat juuri yksittäiselle laitetyypille. Vikojen jakaantuminen elinjakson vaiheisiin on tasaista. Lievä asennusvaiheen korostuminen näkyisi olevan yhteinen piirre vian syntyvaiheelle. Mittaus- ja ohjauslogiikkaan liittyvät ohjelmaviat ovat yleisempiä kuin varusohjelmaviat, mikä vaikuttaa luonnolliselta laitetason näkökulmasta. Sen sijaan ohjelmavian syntyvaiheesta ei löydy yhtäläistä piirrettä. Kokemukset automaation ja käyttövarmuuden vuorovaikutuksista poikkesivat suuresti. Keskeisimpinä mainittakoon laitteiston monimutkaisuuden tuomat kunnossapidon ongelmat: tietotaitoa tarvitaan. Toisaalta diagnostiikalla voidaan edesauttaa vikaantumissyyn selvittämistä. Haasteena käyttövarmuuden hallitsemiseksi koettiin avoimen järjestelmän ja toimistotekniikan (lähinnä PC:t) lisääntynyt käyttö tehdasympäristössä. Myös automatisointiprojektien laadun varmistamisen ongelmaan tartuttiin.

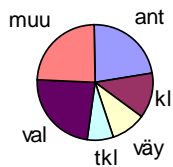
### Vikojen lukumäärän jakauma (K)



### Viat keskeytyksen pituuden suhteen (K)



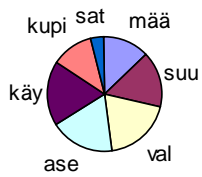
### Laiteviat laitetyypeittäin (K)



### Ohjelmavian syntyvaihe (K)



### Laitevian syntyvaihe (K)



### Ohjelmaviat ohjelmatyypeittäin (K)



Kuva 3. Kone- ja laitevalmistajien vikatilastoja selvityksen perusteella.

## 4.2 Tutkija-haastattelut

Liitteessä 3 on koottu ja ryhmitelty VTT:n ja joidenkin muiden tutkimuslaitosten tutkijoiden näkemyksiä automaatiojärjestelmien käyttövarmuushaasteista lähitulevaisuudessa. Esiintulleet haasteet ja todennäköiset trendit on arvioitu relevanteiksi teollisuudelle 2–3 vuoden sisällä.

## 4.3 Tulokset

Yrityksiltä tulleiden vastausten ja tilastoaineiston perusteella voidaan teollisuusaloille yhteisesti todeta, että

- laiteviat, käyttövirheet ja ohjelmaviat ovat keskeisimmät vikatyypit
- tyypillisin laitevika liittyy anturi- ja kenttälaitteisiin
- mittaus- ja ohjauslogiikkaan liittyvät ohjelmaviat ovat keskeisempiä kuin varusohjelmissa esiintyvät viat
- ohjelman määrittämis- ja ohjelmointivaiheet koetaan suurin piirtein yhtä merkittävänä ohjelmavian syntyvaiheina
- sekä laite- että ohjelmavian syntyvaihe näyttää olevan tasaisesti jakautunut elinkaaren vaiheisiin
- laitteiden yhteensopivuus järjestelmäkokonaisuudessa ei näytä olevan ongelma.

Erityisesti on huomattava, että loppukäyttäjillä ja kone- ja laitevalmistajilla on selvästi erilaiset painotukset laite- ja ohjelmavikojen välillä: kone- ja laitevalmistajat eivät koe ohjelmavikoja ongelmallisina. Toisaalta on havaittu ohjelmoitavien logiikkojen ja erilaisten ohjelmakomponentteja käyttävien laitteistojen määrän kasvua. Ristiriitainen tulos saattaa selittyä aineiston niukkuudella. Muutoin loppukäyttäjien havainnot vastasivat kone- ja laitevalmistajien havaintoja.



Kyselyn kommenttiosiossa esiintulleita käyttövarmuuden hallinnan haasteita ovat:

- monimutkaisen järjestelmän kunnossapidon tietotaito käyttövarmuuden varmistamiseksi
- monimutkaisen järjestelmän käyttöhenkilökunnan tietotaidon varmistaminen
- automaatiojärjestelmän määrittelytyökalujen kehitys
- PC-tekniikan luotettava soveltaminen tehdasympäristöön.

Vikojen syntyvaiheen tasainen jakautuneisuus niin laite- kuin ohjelmavikojen (päivitysvaihetta lukuun ottamatta) kohdalla antaa aiheita epäillä että otos on ollut liian pieni tai että vastaajilla ei ole ollut tarkempaa tietoa. Mikäli tulos on oikea, ehdottaa se suunnittelun ja tuotekehityksen laatu- ja käyttövarmuusajattelun ulottamista kaikkiin laitteen elinkaaren vaiheisiin varsinkin anturi- ja kenttälaitteiden kohdalla käyttövarmuuden parantamiseksi. Etenkin loppukäyttäjien kohdalla ovat myös sovellusohjelmat tällainen kohde.

Haastateltavana oli noin kymmenen vanhempaa tutkijaa, joilla on monivuotinen kokemus yhteisprojekteista (koneautomaatio, prosessiautomaatio, ohjelmistotekniikka, automaatio suunnittelu, luotettavuustekniikka, turvallisuustekniikka). Tutkijoita pyydettiin listaamaan automatisoituihin laitteisiin liittyviä keskeisiä ja ajankohtaisia teknologia- ym. trendejä ja niihin liittyviä luotettavuus- ja käyttövarmuusongelmia sekä keinoja ehkäistä tai vähentää näitä ongelmia.

Tutkijahaastattelujen tulokset voidaan tiivistää seuraavasti:

Tutkijat otaksuvat, että ohjelmiston osuus automatisoitujen laitteiden ominaisuuksista kasvaa voimakkaasti, niin että selkeästi yli puolet tuotekehityskustannuksista alkaa olla ohjelmiston osalla.

Ohjelmistokehitykseen haetaan tehokkuutta uusimmista tekniikoista, mm. komponenttipohjaisesta ohjelmistokehityksestä, vieraiden komponenttien (COTS, commercial of the self) käytöstä, järjestelmien avoimuudesta ym. Koska nämä tekniikat ovat uusia ja suosivat monimuotoisuutta, joustavuutta,

implementoinnin näennäistä helppoutta jne., niihin liittyy myös käyttövarmuus- ym. ongelmia, joita ei osata vielä kunnolla hallita, tosin tutkimus on nk. hyvällä alullaan.

Muussa tieto- ja tietoliikennetekniikassa, elektroniikassa ym. tapahtuu ripeällä vauhdilla teknologialäpimurtoja (PC:n, Windowsin yleistyminen, www, langaton tiedonsiirto, väylien yleistyminen jne.), joita yritetään hyödyntää automaatioon. Automaatiolla on kuitenkin monia erityisvaatimuksia, eivätkä hyödyt ole itsestäänselvyyksiä tai tule ilmaiseksi.

Tutkijoilta välittyy huoli tehdä nk. kirjan mukaan tai minkä ajatellaan olevan kulloinkin parasta suunnittelua, myös kuten standardit tai viranomaiset vaativat jne.

## **5. Aktiviteetit automaation luotettavuuden ja käyttövarmuuden edistämiseksi**

### **5.1 Teollisuuden aktiviteetit**

Teollisuudessa aktiviteetit ovat käytännön automatisointiprojektit (AP). Automatisointiprojektien suunniteluun voidaan liittää elinkaariajattelu, joka tarkoittaa sitä, että suunnitelmat käsittävät automaatiojärjestelmän määrittely-, suunnittelu-, toteutus-, käyttöönotto- ja käyttövaiheen. Käyttövaihe sisältää laitehuollon ja ohjelmien ylläpidon tehtävät. Myös henkilökunnan koulutus kuuluu automatisointiprojektisuunnitelmaan. Turvallisuuskriittisissä kohteissa on viranomaismääräyksiä otettava huomioon. Taulukkoon 1 on koottu automatisointiprojektissa huomioitavia projektin laadun hallintaan liittyviä osatehtäviä elinkaarivaiheiden funktiona. Projektin laajuudesta ja turvallisuuskriittisyydestä riippuu tarvittavien osatehtävien lopullinen määrä. Taulukko 2 on kehitetty "Automaatiosuunnittelun laadun varmistaminen vaativissa panossovelluksissa"-projektissa ja dokumentoitu työraporttiin ASVA-RO1, 27.8.1999 (<http://www.vtt.fi/aut/tau/ext/asva/asvaesit.htm>).

Taulukko 2. ASVA-projektin kehittämät automatisointiprojektin laadunvarmistuksen menettelyt.

Suunnitteluvaihe	Laadunvarmistus-kohde	Laadunvarmistus-tehtävä	Dokumentti
<b>MÄÄRITTELYVAIHE</b>			
Esisuunnittelu		Laadunvarmistuksen suunnittelu, laatuvaatimukset	Laadunvarmistus-suunnitelma (asiakas)
	Käyttjävaatimukset	Käyttjävaatimusten tarkistus	Katselmuspöytäkirja
		Toimittajien arviointi	Auditointiraportit
Perussuunnittelu	Toiminnallinen kuvaus	Kuvauksen tarkistus (asiakas+toimittaja)	Katselmuspöytäkirja
	Sopimus	Sopimuskatselmus (toimittaja)	Katselmuspöytäkirja
<b>SUUNNITTELUVAIHE</b>			
Järjestelmäsuunnittelu	Toteutusarkkitehtuuri	Suunnittelukuvauksen katselmus	Katselmuspöytäkirja
Toteutussuunnittelu	Valmistuspiirustukset	Suunnittelukuvauksen katselmus	Katselmuspöytäkirja
	Testaussuunnitelmat (syntyneet aikaisemmin?)	Testaussuunnitelmien katselmus	Katselmuspöytäkirja
<b>TOTEUTUSVAIHE</b>			
Valmistus	Ohjelmalistaukset, laitteet, kokoonpano	Tarkistukset	Katselmuspöytäkirja
		Toimittajien valvonta	Raportti
Testaus	Testausraportit (penkkitestit, tehdastestit)	Katselmus	Katselmuspöytäkirja
<b>ASENNUSVAIHE</b>			
Kuljetus, asennus	Asennettu järjestelmä	Vastaanottotarkastus, laitteistotestaus	Testausraportit
Käyttöönotto	Toimiva järjestelmä	Kylmä- ja kuumatestaus	Raportit
<b>HYVÄKSYNTÄVAIHE</b>			
	Käytössä oleva järjestelmä	Testausten arviointi Automaation suorituskykytestaus Prosessin hyväksyntätestaus	Arviointiraportit

Jokainen vaihe edellyttää osaamista ja kokemusta niin toimittajalta kuin asiakkaalta. Kaikkien vaiheiden osalta ei asiakkaalta voida kuitenkaan tätä aina odottaa. Insinööritoimistot, konsultit ja VTT pystyvät tukemaan asiakasta vaiheiden edellyttämien tehtävien läpiviemisessä ja mahdollisesti eteen tulevien ongelmien ratkaisemisessa. Inspecta Oy on erikoistunut turvallisuuteen liittyvän ohjausjärjestelmän (TLJ) toiminnallisen turvallisuuden arviointiin.

## **5.2 Standardien, määräysten ja viranomaisten rooli**

Tutkijoiden Timo Malm, Maarit Kivipuro ja Risto Tiusasen julkaisu "Laajojen koneautomaatiojärjestelmien turvallisuus" (VTT Tiedotteita 1938. Espoo 1998.). Luvuissa kuvataan koneautomaatioon liittyviä standardeja.

## **5.3 Automaatioon liittyvä perustutkimus**

Automaatioon liittyvää perustutkimusta selvitettiin WWW-sivujen ja sähköpostikyselyn perusteella sekä VTT Tietopalvelun tekemän haun pohjalta. Kyselyn kohteina olivat Helsingin Teknillinen Korkeakoulu, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu ja Oulun Yliopisto.

TKK:

Automaatiotekniikkaa opetetaan Automaatiotekniikan laboratoriossa, professorina on Aarne Halme.

Verkkosivuissa ei löynyt viittauksia sellaiseen perustutkimukseen jossa automaation käyttövarmuudella olisi ollut selkeä asema tavoitteissa. Sen sijaan laboratorio toimitti kuvauksen Suomen Akatemian rahoittamasta projektista "Agenttiperustaisen verkkoon hajautetun tulevaisuuden automaatiojärjestelmän mallirakenteiden ja teorianperustan kehittäminen". Tarkempi kuvaus on alla.

"Agenttiperustaisen verkkoon hajautetun tulevaisuuden automaatiojärjestelmän mallirakenteiden ja teoriaperustan kehittäminen."

Vastuuhenkilö

Professori Aarne Halme, TKK Automaatiotekniikan laboratorio

Digitaaliset automaatiojärjestelmät muodostavat nykyisin tärkeän ja oleellisen osan tuotantoprosessien, koneiden ja laitteiden teknologiasta. Niiden kehitys alkoi 70-luvun puolessa välissä ja teknologinen läpimurto 80-luvun alussa. Nykyisin on alkamassa jo kolmannen sukupolven kehitystyö, jonka oleellisia ominaisuuksia ovat pitkälle viety hajautettu avoin rakenne ja “älykkyyden” monipuolinen hyödyntäminen. Järjestelmän rakenne perustuu kommunikaatioon verkossa, standardien tietokonekomponenttien, kuten PC:n, käyttöön ja uusiin ohjelmointikieliin, jotka tukevat erityisesti olio-ohjelmoinnin käyttöä. Samalla kun elektroniikan ja ohjelmiston perusrakenteet uusiutuvat on myös herännyt tarpeita muuttaa toiminnallisia perusrakenteita suuntaan, joka tukee paremmin pitkälle vietyä hajautusta ja erityyppisten toimintojen kasvavaa määrää. Agenttipohjainen lähestymistapa tarjoaa tähän uuden ulottuvuuden, jota ei ole toistaiseksi paljonkaan hyödynnetty automaatiojärjestelmissä. Syynä on sitä tukevan tutkimuksen vähäisyys ja tästä johtuva yleisen menetelmä- ja teoriaperustan puuttuminen. Hankkeen perustavoitteena on suorittaa systemaattinen tutkimus mahdollisuuksista kehittää agenttipohjaiseen lähestymistapaan soveltuvia mallirakenteita ja menetelmiä seuraavalla kolmella alueella

- Hajautetun verkkoinformaation hyväksikäyttö ja fuusiomenetelmien kehitys:
- Ohjausrakenteiden mallittaminen
- Ohjausagenttien adaptoituminen prosessiin/ympäristöön.

Agenttipohjaiselle lähestymistavalle on ominaista kokonaistehtävän purkaminen itsenäisiä osatehtäviä suorittaville agenteille, jotka muodostavat yhteisöllisen kulttuurin. Tähän kulttuuriin kuuluu yhteisen päämäärän puolesta työskentely ja kommunikaatiokyky, jonka avulla informaatio agenttien välillä vaihtuu. Rakenne mahdollistaa laajojen monimutkaisten järjestelmien hallinnan, asteettaisen kehittämisen ja toimintojen muuntelun joustavammalla tavalla kuin perinteiset rakenteet. Myös toimintavarmuus kasvaa, koska viallisen tai viottuneen agentin toiminta voidaan usein korvata muiden agenttien toiminnalla.

TTKK

TTKK:n Automaatiotekniikan osastolle lähetettyyn kyselyyn ei tullut vastauksia. Internet-sivuilta ([www.tut.fi](http://www.tut.fi)) löytyy linkkejä lukuisiin automaatioon liittyviin projekteihin, mutta käyttövarmuuteen ei tutkimusasetelmissa oteta suoranaisesti kantaa.

OY

Oulun Ylipiston Teknillisen tiedekunnan Prosessitekniikan osastolle lähetettyyn kyselyyn ei tullut vastauksia. Internet-yhteyksien perusteella ei suoranaista automatisoitujen laitteiden käyttövarmuuteen liittyvää tutkimusta tehdä. Luonnontieteellisen tiedekunnan Internet-sivuilta löytyy tosin mielenkiintoinen linkki ohjelmiston laatuun liittyvien tarkastusmenettelyiden kehittämisprojektiin (<http://rieska.oulu.fi/tutkimus/frames.html>). Kyseinen Tietojenkäsittelyopin laitoksen projekti on siten kiinnostava automatisoitujen laitteiden ohjelmistotason käyttövarmuuden arvioinnin kannalta.

## 6. Ehdotuksia tutkimusaiheiksi

Alla on lueteltu joukko aiheita, joita voidaan pitää toisaalta loppukäyttäjien ja toisaalta kone- ja laitevalmistajien kiinnostuksen kohteena, ja joissa on automaation tuoma erityispiirteensä. Aiheet painottuvat esiin tuotujen ongelmien mukaisesti sekä heijastavat tutkijoiden näkemiä mahdollisuuksia kyseisten ongelmien ratkonnassa. Aiheet ovat toisistaan irrallisia eivätkä muodosta minkäänlaista tutkimuskokonaisuutta. Tällaisen määrittäminen on luonnollisesti oma "projektinsa".

*Loppukäyttäjät (prosessi, metalli, energia):*

- kunnossapidon tiedon organisointi ja hyödyntäminen vikatilanteessa
- yleiskomponenttien (COTS = commercial off the shelf), etenkin PC-alustan, luotettavuuden todentamisen keinot
- käyttäjän virheet huomioon ottavan "robustin" suunnittelun työkalut

- käyttäjän päätöksentekotilanteet huomioon ottava "tiedon suunnittelu" monimutkaisessa käyttöympäristössä

### *Kone- ja laitevalmistajat*

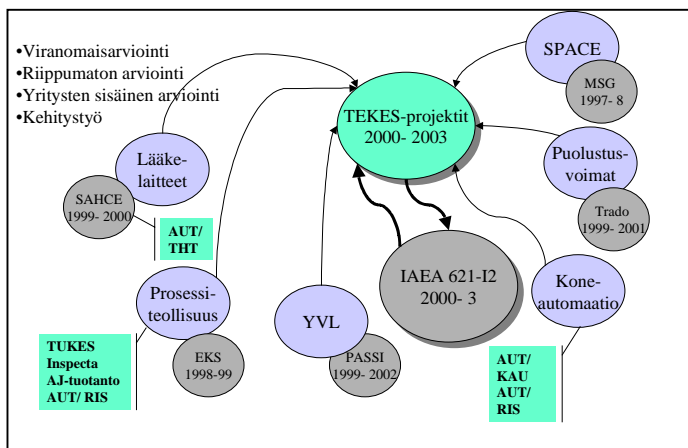
- diagnostiikan kehittäminen
- multimediapohjainen opastava kunnossapito

### *Yleisempiä linjauksia*

- Automaatioon kulminoituvat kaikki osa-alueet:
  - prosessi
  - hardware, software
  - käyttäjä, organisaatio
  - ympäristö
- Tekniikoiden kehittymisen vauhdissa ei saa unohtaa asiantuntevan, kokeneen suunnittelun merkitystä
- Laatu, luotettavuus, käyttövarmuus turvallisuus syntyy tekemällä kaikissa elinkaarivaiheissa, ei testaamalla
- Ohjelmiston merkitys kasvaa
  - tekniikka nopeatempoista
  - luotettavuustekniikoiden siirto ohjelmistotekniikoihin vie aikansa
  - monimutkaiset järjestelmät vaativat kustannustehokasta käyttövarmuuden kehittämistä
  - teoriaa olemassa, soveltaminen käsityötä ja käsitteellisesti hankalaa
  - PC-, www-, COTS-, jne. käyttövarmuuden osoittaminen
  - ohjelmistoluotettavuuden arviointi ja osoittaminen on vaikeaa; sitä tehdään
    - koska viranomainen vaatii
    - koska asiakkaat alkavat vaatia
    - viimeisenä keinona tehostaa ohjelmistokehitysprosesseja

## VTT Automaation lähivuosien näköalat

VTT Automaatio kehittää osaamistaan automaation ja ohjelmiston luotettavuuden ja käyttövarmuuden parantamiseksi teollisuudessa. Osaamiselle on 90-luvulla kertynyt varsin vankka pohja, lähinnä laajojen kansallisten ydinturvallisuustutkimusohjelmien ansiosta. Osaamista on vähitellen laajennettu muuhun turvallisuuskriittiseen teollisuuteen tai prosesseihin, avaruustekniikkaan, sairaalalaitteisiin, ja jonkin verran tietoliikenteeseen. Luotettavuus- ja käyttövarmuustekniikat ovat perinteisesti varsin vakiintuneita elektroniikassa ja mekaniikassa. Automaatiolle – ja ohjelmistolle yleensä – luotettavuustekniikoiden kehittäminen on ollut eri syistä vaikeaa (monimutkaisuus, epäjatkuva käyttäytyminen, ohjelmistovirheet ovat suunnitteluvirheitä – ne eivät aiheudu kulumisesta tms).



Kuten yleensä, luotettavuus- ja käyttövarmuusanalyseja ei voi ainakaan kokonaan automatisoida. Jos järjestelmät ovat tulleet monimutkaisiksi, myös analyysi- ym. ponnistusten määrät ovat kasvaneet, usein nopeammin kuin järjestelmien koko sinänsä. Luotettavuutta ja käyttövarmuutta koskevia kysymyksiä voidaan esittää kymmenistä eri näkökulmista, eikä usein voida ajatellakaan, että ne kaikki voitaisiin käytännössä ottaa huomioon.

Ydinvoimaa varten tehdyssä tutkimustyössä on ehkä joskus ajateltu, että mitkään tutkimusponnistukset eivät ole liian suuria potentiaalsiin riskeihin ja käytettävissä oleviin rahamääriin verrattuna, ja että tavoitteena tulee aina olla



äärimmäinen luotettavuus, esim. epäonnistumisen todennäköisyys alle  $10^{-5}$  per toimintovaade. Automaatiossa ja ohjelmistotekniikassa yleensä nykyään korostuu kustannustehokas, laadukas suunnittelu. VTT Automaatio kehittää ohjelmistoluotettavuutta kaikille em. sektoreille, ja silloin johtavaksi teemaksi nousee kustannustehokkaiden RAMS-arviointitekniikoiden (reliability, availability, maintainability, safety) kehittäminen ohjelmistolle. Eri sovellusalueilla on omat rahoittajansa, mutta tavoitteena on yleisen osaamisohjan kartuttaminen sekä VTT:lle että osallistuviin muihin tahoihin. Osaamisen siirto ja kehittäminen on alkanut jo aiemmissa ja menossa olevissa projekteissa. Tekesistä on tulossa suurin rahoittajataho. Ongelmana on ohjelmistoluotettavuusteeman hajaantuminen esim. nykyisissä teknologiaohjelmissa: EKS-projektit kuuluvat ETX-ohjelmaan, SAHCE-projektit lääketieteen digitaaliseen mediaan, koneautomaatioprojektit esim. SMART-ohjelmaan. KÄKI-ohjelmalla on käyttövarmuusteema, mutta siellä on ollut toistaiseksi vähän ohjelmistotekniikan projekteja. Yhtenäistämistarvetta siis on, vaikka omaa teknologiaohjelmaa ei heti lähdetäisi suunnittelemaan.

# Käynnissäpitohenkilöstön toimintatavat käyttövarmuustekijänä. Tutkimusmenetelmien kehittäminen tapaustutkimuksessa

Maaria Nuutinen, tutkija  
Leena Norros, erikoistutkija  
VTT Automaatio  
Espoo

## Tiivistelmä

Inhimillisten tekijöiden vaikutuksen arviointi monimutkaisten järjestelmien käyttövarmuuteen on haastava tutkimustehtävä, joka vaatii tutkimusmenetelmältä paljon. Tässä esityksessä kuvataan konkreettisen tapaustutkimuksen avulla integroidun tutkimusmenetelmän kehittämistä. Se perustuu toimintatavan tutkimusmenetelmään ja systeemanalyttiseen luotettavuustutkimusmenetelmään. Tutkimuksen ollessa vielä kesken menetelmäkehittelyn arviointi on vaikeaa, joten tämän esityksen painopiste on kehittämisen kuvaamisessa.

## 1. Johdanto

Tekninen kehitys tuo mukanaan uusia tuotantomuotoja, muuttaa niin tuotantoprosesseja kuin niiden ohjauksen ja valvonnan välineitä. Markkinakentässä tapahtuvat muutokset asettavat tuotantotoiminnalle uusia vaatimuksia ja mahdollisuuksia. Esimerkiksi sähkökaupan vapautuminen vaikutti ja vaikuttaa energiantuotannon reunaehtoihin. Samalla myös ihmisen tekemä työ määrittäyty uudelleen ja hänen ammattitaidolleen asettuvat vaatimukset muuttuvat. Vaikka monissa prosessinohjaustöissä ammattitaidon kehittyminen on tapahtunut ja tapahtuu pääasiassa käytännön työssä oppimalla, tämä mekanismi ei ole riittävä, kun muutosten vaikutukset ovat epäselvät. Tehtävän sisällön muutoksen ja siten myös ammattitaidolle asettuvien vaatimusten havaitseminen ei välttämättä onnistu kuin jälkikäteen ongelmien ilmaannuttua esimerkiksi

käyttövarmuuden huononemisenä tai teknisiin muutoksiin liittyneiden tehokkuusodotusten jäädessä toteutumatta. Nämä ilmentävät myös laajemmin muutoksia vaatimuksissa, joita tehtävän muuttuminen on asettanut henkilöstön ja organisaation toimintatavoille. Tehtävän, sen muutoksen ja mitä se käyttäjien ammattitaidolta eli heidän tiedoiltaan, taidoiltaan ja toimintatavoiltaan vaatii, selvittäminen on käytännön tarpeista lähtevä tutkimustehtävä. Inhimillisten tekijöiden vaikutuksen arviointi monimutkaisten järjestelmien, esimerkiksi energiantuotannon käyttövarmuuteen vaatii tutkimusmenetelmältä paljon. Inhimillisen tekijän vaikutuksen selvittäminen edellyttää, että ymmärretään paitsi kokonaisjärjestelmä ja ihmisen toiminnan osuus siinä myös ihmisen toiminnan luonne.

Kansainvälisessä ihmisen toimintaa monimutkaisten ja dynaamisten prosessien hallinnassa koskevassa tutkimuksessa on viimeaikoina tapahtunut merkittävä muutos, joka näkyy luonnollisen päätöksenteon (Naturalistic Decision Making, NDM) tutkimussuuntauksen muotoutumisena (Orasanu & Conolly 1993 ja Zsombok 1997). NDM-tutkimus on syntynyt pyrkimyksestä ymmärtää, kuinka ihmiset todellisuudessa tekevät päätöksiä monimutkaisessa, luonnollisessa tilanteessa ja kuinka tukea tätä prosessia (Klein ym. 1993). NDM-tutkimus on kuitenkin törmännyt moniin menetelmällisiin ongelmiin (Zsombok 1997, Howell 1997, Hammond 1993), jotka rajoittavat tutkimuksen käytännön sovellettavuutta. Ongelmat liittyvät tutkimuksen taustalla olevaan mekanistis-deterministiseen tutkimusparadigmaan (Norros & Klemola, painossa), käsityksiin ihmisen toiminnasta ja ammattitaidosta sekä siitä, ettei ihmisen toimintaa pystytä liittämään osaksi kokonaisjärjestelmää.

Käynnissäpitohenkilöstön toimintatavat käyttövarmuustekijänä -tutkimus pyrkii integroimalla toimintatavan tutkimusmenetelmän ja systeemanalyttisen lähestymistavan ratkaisemaan edellä mainittuja ongelmia ja vastaamaan käytännön haasteeseen inhimillisten tekijöiden vaikutuksesta energiantuotantolaitoksen käyttövarmuuteen.

VTT Automaation Ihminen-kone -psykologian tiimissä kehitetyssä toimintatavan tutkimusmenetelmässä (Contextual analysis of working practices, CAWP) (Norros 1995, Hukki & Norros 1996, Hukki & Norros 1998 ja Norros & Klemola (painossa)) on paljon yhtymäkohtia edellä kuvatun luonnollisen päätöksenteon tutkimustavan kanssa. Toimintatavan tutkimuksen peruslähtö-

kohtana on kuitenkin niistä poiketen kulttuurihistoriallinen toiminnan tutkimus (Engeström 1987, Vygotsky 1978, Leontjev 1977). Ihmisen toiminta käsitetään intentionaalisen eli tavoitteisiin pyrkivänä sekä kontekstiriippuvaisena eli tietyssä teknisessä ja sosiaalisessa ympäristössä tapahtuvana. Ihmistä tarkastellaan paitsi kognitiivisena (päätöksenteko), sosiaalisena (yhteistoiminta) (Hukki & Norros 1998) myös emotionaalisenä (ammatti-identiteetti, motivaatio, oman toiminnan hallinta) olentona (Nuutinen & Norros 1998). Tutkimustapa on tilannesidonnainen ja subjektilähtöinen. Se sovitetaan tutkittavalle kohdealueelle prosessin erityisominaisuuksien ja niiden ohjaustyölle asettamien vaatimusten mukaan. Se edustaa kvalitatiivista lähestymistapaa ja ekologisen validiteetin varmistamiseksi tutkimusmenetelmät sovitetaan tutkittavan kohteen mukaisiksi, jolloin sekä käsitys kohteesta että itse tutkimusmenetelmät täydentyvät tutkimuksen aikana (ks. myös Harré & Gillet 1994 ja Charmaz 1995).

Toimintatavan tutkimusmenetelmä kohdistaa huomion ihminen-ympäristöjärjestelmään. Tässä mielessä systeemisenä menetelmänä se on yhdistettävissä systeemianalyttisiin luotettavuustutkimusmenetelmiin (Holmberg et al. 1999). Yhdistetyn integroidun psykologisen ja luotettavuusanalyttisen menetelmän avulla pyritään tässä tutkimuksessa selvittämään millaiset tekijät vaikuttavat tuotantoprosessin häiriöiden syntyyn ja niistä toipumiseen, ja toiseksi mitkä näistä tekijöistä ovat tärkeimmät. Tässä esityksessä kuvataan integroidun tutkimusmenetelmän kehittämistä käyttäen esimerkkinä konkreettista tapaus-tutkimusta.

## **1.1. Tapaustutkimuksen tavoitteet ja menetelmälliset haasteet**

Tapaustutkimuksen tavoitteet määrittivät tutkimuksen menetelmälliset vaatimukset. Tapaustutkimuksen kohteena olivat henkilöstön toimintatavat nykyaikaisessa käynnissäpitotoiminnassa, joka perustuu tuotantolaitoksen käytön ja kunnossapidon vuorovaikutukseen ja yhteisvastuullisuuteen käyttövarmuuden ylläpidossa ja kehittämisessä. Tutkimus suoritettiin pilottiluonteisena hankkeena kombivoimalaitoksessa. Tutkimuksen keskeisenä ongelmana oli käynnissäpitotoiminnan luotettavuus, jonka parantamisessa asiakkaan edustajat muotoilivat kaksi pääongelmaa: 1) Mitkä ovat ne käynnissäpidon toimintaprosessit, joilla on merkitystä käyttövarmuuden kannalta ja 2) Mitkä inhimilliset

tekijät liittyvät käyttövarmuuden kannalta kriittisiin käynnissäpitoprosesseihin? Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida ja kehittää integroidun käyttö- ja kunnossapitotoiminnan luotettavuutta edistäviä organisaation toimintastrategioita ja niitä konkretisoivia henkilöstön toimintatapoja. Tutkimuksessa pääpaino oli henkilöstön ammattitaitoon kuuluvien yksilöllisten toimintatapojen ja niiden muodostumisen edellytysten arvioinnissa.

Nämä tavoitteet määrittivät kaksi tehtävää, joihin liittyi kolme menetelmällistä haastetta. Ensinnäkin oli selvitettävä mitä vaatimuksia laitoksen toiminnan tavoitteet, lämmön ja sähkön tuottaminen tuottavasti, ympäristöystävällisesti ja turvallisesti yhdessä tuotantoteknologisten ja organisatoristen ratkaisujen kanssa asettavat käyttäjien toiminnalle. Kyseessä oli voimalaitosprosessin käynnissäpidon *perustehtävän* mallintaminen. Käyttövarmuuden oletetaan olevan yhteydessä henkilöstön kykyyn ja haluun suuntautua perustehtävään, jonka luonne ja toteutumisedellytykset muuttuvat tuotannolle asetettujen vaatimusten kentässä. Perustehtävän mallintaminen muodostaa lähtökohdan toimintatavan analyysille tarjoamalla toimintaympäristön asettamat yleiset vaatimukset toiminnalle eli toimintatapavaatimukset. Toisena tehtävänä oli henkilöstön *toimintatapojen* analyysi ja toimintatapojen *tarkoituksenmukaisuuden* arviointi erityisesti toiminnan *luotettavuuden ja laadun* näkökulmasta. Toinen menetelmällinen haaste oli käyttäjien toimintatapojen selvittäminen toiminnan tutkimisella luonnollisessa käyttötilanteessa. Kolmas haaste oli toimintatapa-analyysin integrointi luotettavuusanalyysiin, jotta voitiin vastata asiakkaan edustajien muotoilemiin kysymyksiin.

## **2. Menetelmät tapaustutkimuksessa**

### **2.1. Perustehtävän mallintaminen**

Ensimmäisessä osatutkimuksessa suoritettiin käynnissäpidon toimintojen kuvaileva kartoitus (2.3.) ja mallinnettiin voimalaitosprosessin käyttäjien

perustehtävää<sup>1</sup>. Perustehtävän mallintamisen avulla tässä osatutkimuksessa valmisteltiin tutkimuksen toista vaihetta.

Esiselvityksenä tutkimuksen aluksi haastateltiin käytön esimiestason asiantuntijoita taustatietojen hankkimiseksi, tutkimusongelman tarkentamiseksi, tuotantotoiminnan yleisten tavoitteiden selvittämiseksi ja tutkimuksen seuraavien vaiheiden suunnittelemiseksi. Tutkimuksessa haastateltiin käytön kaikki viisi vuoroa eli yhteensä 15 käyttäjää (5 valvojaa; 5 hoitajaa; ja 5 kattilanhoitajaa).

Aineiston analyysi aloitettiin perustehtävän ja sen asettamien vaatimusten määrittelemisellä ja selvittämällä haastatteluaineistoon perustuen. Haastatteluaineistosta kerättiin keskeisiä prosessin piirteitä eli ominaisuuksia. Prosessi käsitetään laajasti toiminnan kohteena sisältäen esimerkiksi prosessin ohjaimisen ja valvonnan välineet. Näistä piirteistä johdettiin alustavia toimintatapavaatimuksia. Samalla haastatteluaineistosta kerättiin myös toimintatapavaatimuksia ja ne palautettiin prosessin piirteiden määrittelyyn. Näin muodostettiin alustava prosessin piirre- ja toimintatapavaatimusmalli. Tässä työvaiheessa hyödynnettiin yleistä psykologista ihmisen toimintaa koskevaa tietämystä, aiempia eri tutkimusalueilla tehtyjä vastaavia toimintatapavaatimuksia koskevia määrittelyjä (Norros ym. 1998 ja Norros & Nuutinen 1999) sekä myös esiselvitystä. Tätä alustavaa toimintatapavaatimusmallia täydennettiin ja tarkennettiin jokaisessa analyysivaiheessa.

Ensimmäiseksi kutakin käyttäjäryhmää analysoitiin erikseen koskien heidän käsityksiään työstään, sen vaatimuksista ja perustehtävästään. Toiseksi analysoitiin kunkin vuoron käsityksiä erikseen ja näitä verrattiin edellä mainittuihin toimintatapavaatimuksiin. Käyttäjien nykyisten perustehtävästään huolehtimisedellytysten ja perustehtävän muutosten selvittämiseksi aineistoa analysoitiin vastaavalla tavalla kuin edellä erikseen kutakin käyttäjäryhmää. Kolmanneksi analysoitiin millaisia toimintatavallisia edellytyksiä vuoroilla on huolehtia tehtävästään? Tässä analyysivaiheessa tarkastelu siirtyi vuorotasolle. Käyttäjien toimintatapoja tarkasteltiin alustavasti työn vaatimuksia koskevien

---

<sup>1</sup> Osatutkimuksen tekemiseen osallistui myös Ulla Kinnunen

käyttäjien omien käsitysten perusteella. Näitä käsityksiä (joiden oletetaan ilmentävän toimintatapoja ja myös orientaatiota) verrattiin ensimmäisessä kohdassa haastatteluaineiston pohjalta abstrahoituihin toimintatapavaatimuksiin vuoroittain. Tämä toimi ensinnäkin kehitellyn mallin alustavana testinä. Toiseksi tämän vertailun pohjalta muodostettiin alustavia oletuksia kunkin vuoron toimintatavallisista vahvuuksista ja heikkouksista, joita täsmennettiin ja korjattiin tutkimuksen seuraavassa vaiheessa, varsinaisessa toiminnan tutkimisessa.

## **2.2. Toiminnan tutkimus ja toimintatapojen analyysi**

Toisessa osatutkimuksessa tarkasteltiin käyttäjien toimintatapoja ylösajotilanteessa. Aineistoa kerättiin viiden eri vuoron toiminnasta laitoksen ylösajossa. Käyttäjien toiminta tallennettiin videolle. Ennen ja jälkeen ylösajon suoritettiin tilannekohtaiset haastattelut. Ylösajon jälkeen videoitu toiminta katsottiin läpi ja käyttäjä sai selittää toimintaansa ja sen perusteita. Analyysissa selvitettiin toimijoiden tapaa käyttää hyväksi tarjolla olevia toimintaresursejaan mm. tilannekohtaista informaatiota, suunnitelmia, työmenetelmiä, yhteis-toimintaresursseja jne. Analyysissa eriteltiin operaattoreiden tehtävänsuoritusta, heidän omaa suoritustaan koskevia perusteluja ja verrattiin todellisessa toiminnassa tehtyjä ratkaisujen ja niiden perusteluja toimintatilanteita koskevissa referenssikuvauksissa esiin tuotuihin toiminnan rajoituksiin ja mahdollisuuksiin. Näiden analyysien perusteella voidaan muodostaa käsitys siitä, mitä käyttövarmuuteen vaikuttavia ja muita tekijöitä toimija otti toiminnassaan huomioon ja millä perusteella. Tämän pohjalta voidaan edelleen tehdä johtopäätöksiä käynnissäpidon toiminta- ja yhteistoimintatavoista tietyissä tilanteissa.

Aineiston analyysi suoritettiin VTT Automaation kehittämän tutkimusmenetelmän avulla, jota on sovellettu useissa monimutkaisissa ympäristöissä tapahtuvan työn tutkimiseen.

## **2.3. Käyttövarmuuden integroitu systeeminen tarkastelu**

Luotettavuusanalyttisten tutkimusmenetelmien avulla oli tarkoitus selvittää millaiset tekijät vaikuttavat ensinnäkin häiriöiden syntyyn ja niistä toipumiseen,

ja toiseksi mitkä näistä tekijöistä ovat tärkeimmät. Luotettavuusanalyttisen tutkimusmenetelmän integrointi toimintatavan tutkimusmenetelmään toteutetaan kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin käynnissäpitoa koskien käyttövarmuusmalli, jossa oli mukana käyttövarmuuteen vaikuttavia ihmisen ja eri organisaation osien tehtäviä. Tähän malliin yhdistettiin haastatteluaineistosta nostettuja käyttövarmuuteen mahdollisesti vaikuttavia inhimillisiä tekijöitä. Tämän pohjalta siis kohdennettiin toiminnan tutkimuslaitoksen ylösajotilanteeseen. Toisessa vaiheessa kerättiin käyttövarmuusmallia hyväksikäyttäneen käyttöinsinöörien kokemuksia laitoksen häiriöitymisilmiöistä. Näiden tietojen perusteella määriteltiin laitoksen käyttövarmuuteen ja tuottavuuteen vaikuttavat tuotannolliset tilanteet. Näitä analysoidaan kolmannessa vaiheessa expert judgement -menetelmää käyttäen pyrkien määrittelemään niihin kohdistuva erilaisten inhimillisten tekijöiden vaikutus.

Näin pyritään päätyämään käsitykseen epäkäytettävyyden inhimillisestä osuudesta käyttötoimintojen osalta. Luotettavuusanalyysissä käytettiin hyväksi saatavilla olevia kvantitatiivisia käyttökokemustietoja sekä suoritettiin haastatteluja kuvattujen analyysiaskelten suorittamiseksi. Tehtävässä sovellettiin VTT Automaatiossa kehitettyä dynaamista luotettavuusanalyysimenetelmää (Holmberg et al. 1999).

### **3. Menetelmäkehityksen arviointi**

Menetelmäkehityksen arviointi on vaikeaa tutkimuksen ollessa vielä kesken. Joitakin alustavia huomioita voidaan kuitenkin esittää. Ensinnäkin ihmisen toiminnan tutkiminen normaalissa työtilanteessa on vaikea haaste mutta haaste, johon kannattaa yrittää vastata, kun pyritään ihmisen toiminnan ymmärtämiseen ja etsimään ratkaisuja käytännön ongelmiin. Toimintatavan tutkimusmenetelmän juuret ovat simulaattoritutkimuksessa mutta sitä on myös kehitetty luonnollisissa olosuhteissa tapahtuvissa tutkimuksissa, esimerkiksi laivan komentosilta-työskentelyn (Norros ym. 1998) ja anestesia- ja lääketieteellisen toiminnan tutkimuksissa (Klemola & Norros 1997). Tässä tutkimuksessa päästiin eteenpäin erityisesti perustehtävän määrittelytavassa. Perustehtävänanalyysin perusteella tehtävä tilannekohtaisten, tarkkojen kriteerien määrittely käyttäjien toiminnalle osoittautui vaikeaksi. Tähän vaikuttaa ylösajotilanteiden erilaisuus, vaikka kukin vuoro periaatteessa suoritti saman tehtävän (laitoksen ylösajon) ja myös vaikeus



määrittellä "objektiivisia", erottelevia kriteerejä laitoksen ylösajon onnistuneisuudelle. Nämä ongelmat ovat kuitenkin tyypillisiä tutkittaessa luonnollisia toimintatilanteita varsinkin monimutkaisissa prosessiympäristöissä ja vaativat tutkimusmenetelmältä joustavuutta juuri siinä kuinka yksityiskohtaisesti vs. yleisellä tasolla ilmiötä tarkastellaan. Tälle liikkumiseen eri tarkastelutasoilla toimintatavan tutkimusmenetelmä antaa hyvät mahdollisuudet. Lisäksi tähän ongelmaan apua tulee juuri integroitumisesta luotettavuusanalyysiin. Kaiken kaikkiaan tässä vaiheessa vaikuttaa siltä, että menetelmäkehityksessä päästiin merkittävästi eteenpäin mutta haasteita on edelleen jäljellä.

## Kirjallisuusviitteet

Charmaz, K. Grounded theory. Teoksessa: Smith, J. A., Harre, R. & Van Langenhove, L. Rethinking methods in psychology. London: Sage Publications. S. 27–49.

Engeström, Y. 1987. Learning by expanding. Jyväskylä: Orienta-konsultit.

Hammond, K. R. 1993. Naturalistic decision making from a Brunswikian viewpoint: its past, present, future. Teoksessa: Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R., Zsombok, C. E. (Eds.) Decision making in action: Models and methods. Norwood, NJ: Ablex.

Harrè R. & Gillet, G. 1994. The discursive mind. Thousand Oaks, California: Sage Publication.

Holmberg, J., Hukki, K., Norros, L., Pulkkinen, U. & Pyy, P. 1999. An integrated approach to human reliability analysis – decision analytic dynamic reliability model. Reliability Engineering and System Safety, 65, s. 239–250.

Howell, W. C. 1997. Progress, prospects, and problems in NDM: A global view. Teoksessa: Zsombok, C. E. & Klein, G. (Eds.) Naturalistic decision making. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

Hukki, K. & Norros, L. 1996. Lajinvaihto paperikoneen ohjaajien päätöksenteon kohteena. Työ ja Ihminen, 4/96, s. 307–320.

Hukki, K. & Norros, L. 1998. Subject-centered and systemic conceptualization as a tool of simulator training. *Le Travail Humain*, vol. 61, nro 4, s. 313–331.

Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, B. & Zsombok, C. E. 1993. Preface. Teoksessa: Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R., Zsombok, C. E. (Eds.) *Decision making in action: Models and methods*. Norwood, NJ: Ablex.

Klemola, U-M. & Norros, L. 1997. Analysis of the clinical behaviour of anaesthetists: recognition of uncertainty as basis for practice. *Medical Education*, vol. 31, s. 449–456.

Leontjev, A. N. 1977. *Toiminta, tietoisuus, persoonallisuus*. Helsinki: Kansankulttuuri Oy.

Norros, L. 1995. An orientation-based approach to expertise. In: Hoc, J-M., Cacciabue, P.C. & Hollnagel, E. (Eds.) *Expertise and technology: Cognition and human-computer cooperation*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. S. 141-164.

Norros, L. & Klemola, U-M. (painossa). Methodological considerations in analyzing anaesthetists' habit of action. *Ergonomics*.

Norros, L., Hukki, K., Haapio, A. & Hellevaara, M. 1998. *Päätöksenteko komentosillalla luotsaustilanteessa*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 77 s. + liitt. 7 s. (VTT Julkaisuja 833).

Norros, L. & Nuutinen, M. 1999. Development of an approach to analysis of Air Traffic Controllers' working practices. *Human Error, Safety and System Development*. Liege, Belgium, June 7-8, 1999.

Nuutinen, M. & Norros, L. 1998. Development of personal competence as prerequisite for safety and quality. *WHOLE (Work process knowledge in technological and organizational development) temaattisen verkoston tapaamisessa kesäkuussa 1998*.

Orasanu, J. & Conolly, T. 1993. The reinvention of decision making. Teoksessa: Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R., Zsombok, C.E. (Eds.) Decision making in action: Models and methods. Norwood, NJ: Ablex.

Vygotsky L. S. 1987. Mind in society. The development of higher psychological processes. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Zsombok, C. E. 1997. Naturalistic decision making: Where are we now? Teoksessa: Zsombok, C. E. & Klein, G. (Eds.) Naturalistic decision making. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

# **Human activity in the improvement of process dependability**

## **– The conceptions of the operators and the maintenance personnel**

Anneli Leppänen, PhD, Specialized Researcher  
Ville Nurmi, MA(Ed.), Researcher  
Auli Fredrikson, M.Sc.(Eng.), Research Engineer  
Finnish Institute of Occupational Health, Unit of Ergonomics  
Helsinki, Finland

### **Abstract**

Definitions of dependability and related concepts, and analyses of the effects of one's activity towards system dependability were given by sixty-one process operators or maintenance workers of a paper production line. The data were gathered by semi-structured interview. Dependability was defined rather unanimously, but the conceptions of the consequences of operators' activity varied according to the professional group.

## **1. Introduction**

The concept of dependability is defined in the IEC 50(191) standard as the collective term used to describe the availability performance and its influencing factors: reliability, maintainability and supportability performance. More commonly dependability is described as the ability of a product or process to perform its designed tasks according to given specifications.

Human factors are considered as an important element affecting dependability, usability, reliability and safety of large and complex production systems. What is meant by human factors, however, varies a lot. The term "human factor" has

been used to refer for instance to the biophysiological characters of human beings, attitudes, behaviour etc. Also group dynamics and the characteristics of organisation have sometimes been considered as human factors.

The literature on "human factors" will be reviewed and the various human characteristics will be classified according to the ways to minimise the possible negative effects and to enhance the potential positive effects of them on the system dependability. Another aim was to study the conceptions of the critical actors, the process operators and the maintenance personnel, of the effects of their own activities towards dependability and related phenomena, reliability, usability (availability) and safety of the system. Different actors in the work process usually have different conceptions of the factors affecting the functioning and outcomes of the process. The differences in mental models of e.g. system designers and users have been discussed rather vividly (Norman, 1983, Staggers & Norcio, 1993, Doyle & Ford 1998). And it has been regarded important to understand, describe and study the different models used by people having different roles in the work process. But the reviews have seldom reached the meta-cognitive level, and we do not know, how the actors see and define their own activity in relation to dependability and related phenomena.

The process operators' and maintenance workers' conceptions of the factors affecting dependability are created in interaction with the target systems. As the work processes of the operators and the maintenance personnel differ from each other's, it is probable that also their conceptions of the effects of their own activities and of the activities of the other professional groups differ from each other's.

## **2. Target system of the study**

This study was made in a paper mill. Paper machines are the largest continuous process machines in the world, and paper chemistry as an object of a work process is very complex. The paper-making process is rapid, and the consequences of changes made at the "wet end" of the paper machine, for example, in pulp concentration or in adjustments of the head box, can be seen only in the quality parameters of the paper at the "dry end" of the machine. Therefore papermaking involves not only one single worker but a group of

workers or a crew working on a paper machine. The work requires that all the workers of one paper machine observe the process both through the VDUs of the automatic operation system and beside the paper machine itself, making hypotheses of the condition of the process and the actions required from the personnel, and communicating their observations, decisions or actions to the other members of the group.

Paper machine and the automatic operating system are the objects of the maintenance workers. Paper machine and related equipment include thousands of mechanical parts and electrical equipment, of which the functioning must be followed up, measured and observed to prevent malfunctions and failures. And when a part is broken, it must be prepared as quickly as possible to minimise production losses.

In a complex process, where the object of one's work is the tool of the others, externalisation of these concepts is required to develop activities further.

The development of work related conceptions are a process of learning affected by the actual work activity. The traditional work distribution and organisational structures in paper mills have not supported the formation of joint conceptual models among the process operators and the maintenance workers. Despite the demand for co-operation, work distribution has been strictly based on vacancies (Leppänen 1994) and organisational boundaries. The process operators have controlled and operated the product, and the maintenance workers have observed and measured the functioning of the parts of the machine and repaired them when failures have occurred. It has been very usual that during the breakdown the process operators have not been able to describe the symptoms of the disturbance or the exact equipment broken. On the other hand the maintenance workers have not listened to the process operator's descriptions of their observations on the condition of the machinery. The process operators have also experienced that the maintenance workers do not inform them enough of the failure mechanism or the consequences of the reparations.

### **3. Method**

An empirical study was conducted to reveal the varying conceptions of different personnel groups.

#### **3.1 Participants**

The interviewees were gathered from one production line. The sixty-one subjects included individuals from the following departments: 1) pulping department including debarking, chipping and mechanical pulping processes (n=12); 2) paper machine production line including base paper production, calendering, winder, and packing processes (n=14); 3) maintenance department including mechanical (n=18) and automation/electricity (n=14) sections; 4) purchase and administration departments (n=3). Five of the subjects were females. Forty-one interviewees (67.2%) had over 20 years experience in the same paper mill organisation. And seven (11.5%) interviewees' experience in the same organisation was under 5 years. The work experience of the rest of the subjects varied from 5 to 20 years. Interviewees were selected by the organisation. The selection criterion set by the researchers were that the subjects should represent both operators from pulping and paper production line, and maintenance personnel. And their positions should also vary from department manager to the front line worker.

#### **3.2 Procedure**

The data gathering method was the semi-structured interview. In each interview same themes were covered, but the order of the questions and wording may have been different across the interviews. Additional and further specifying questions were made according to the needs of each interview session. The interviews were tape-recorded, except in two cases; one subject refused the recording, and in the other case the recorder did not work properly.

The data analysis included elements from the phenomenological and grounded theory approaches. Although, the practical application was a unique design for the needs of the present study, rather than an orthodox replication of the two

approaches. The following phases were included in the data analysis: 1) the transcription of the tapes, 2) coding of the subjects into the four main categories mentioned above, 3) reading through the transcribed interviews and making the margin notes, 4) the selection of the essentials of the answers, 5) transferring them to the files ordered in terms of the study themes, 6) the formulation of the conceptual categories, 7) the analysis of the similarities and differences between the categories, and 8) the analysis of the data in terms of the background of the respondents, i.e. the personnel group and position in the organisation.

## **4. Preliminary results**

The results presented in the paper are preliminary. They are concentrated in four questions: 1) How were the main concepts - dependability, usability, and human factor - defined? 2) What factors were considered to affect the dependability of the process? 3) How the dependability of the mill has and should be developed, how the evaluation can be evaluated, and what are the critical process phases in terms of dependability? 4) What kind of relationship there is between dependability and occupational safety, productivity, and the quality of the end product?

### **4.1 Conceptions of dependability, usability, and human factor**

In the conceptions of dependability the interviewees were quite unanimous, i.e. the general definition was that dependability means as few unanticipated incidents in the production process as possible. The preventive maintenance was defined as critical for the dependability of the process. Usability was much more difficult to define than dependability. Obviously, it is not used frequently in the every day language. The most common conception of usability was the easiness of the use of some machine or tool.

Over half of respondents answered that the human factor is related to human error. But there were also a variety of other definitions including elements such as work motivation, attitudes toward occupation, and education. Some



interviewees also pointed out that the upbringing of the individual affects the human factor.

## **4.2 Factors affecting dependability**

The factors impacting dependability were studied in three phases. First, the subjects were asked to identify these factors in general. Second, the subjects were asked to specify the impact of the user and maintenance person. Third, the impact of the organisation of the work process was faced. The maintenance personnel answered more frequently than the process operators that the actions of the human affect dependability. Whereas, the operators felt that dependability is the responsibility of the maintenance department, and that their own actions have only marginal impact on the dependability of the production process. Professional skills/craftsmanship and work experience of the worker was regarded as the crucial factors of dependability. Team building and job rotation were the most frequently discussed factors of the organisation's wide issues.

## **4.3 Development and evaluation of dependability**

In developing dependability the machinery investments and the increase of the preventive maintenance were the most commonly answered actions. The co-operation between the maintenance and process operators was considered one of the key areas in the improvement of dependability - but only in the future. The evaluation of dependability was defined as the duty of the middle management, even though many workers were able to describe concrete measures for the dependability of the production line, e.g. net efficiency. Some subjects answered that the most critical phases in the process are certain small details in their own responsibility area. Whereas, others felt that every part of the production line is equally important and critical. In general, the winding and packing were defined to be two of the most critical process areas in this particular paper mill. Although, the automated packing machine was renewed a couple of years ago, the respondents still kept the critical thinking toward that process phase which had caused problems earlier.

#### **4.4 Dependability's relations to occupational safety, productivity, and quality**

The relationship between dependability and occupational safety was seen as rectilinear, i.e. if there are less needs for repairing and unanticipated disturbance in the process, then there will be fewer occupational hazards, as well. The productivity was closely related to dependability, too. If there exists fewer shutdowns, disturbances and failures in the process, the production quantities will reach the intended amounts. Also the quality of the end product will be easier to control in the dependable production lines, because there are less frequent start-ups confusing the quality control.

### **5. Further development of dependability of the paper production system**

The results will be analysed further and the classifications of various conceptual types of the effects of activities of various actors on system dependability will be made. The results and classifications will be discussed and interpreted further with both the production and the maintenance personnel of the mill in four feedback sessions. In the sessions the means to develop activity and especially the joint activities of the process operators and maintenance personnel will be discussed. Also a thorough training program based on the modelling of the production system will be organised. Systematic analysis of the production process has previously led to the improvement of conceptual mastery of work among the paper makers (Leppänen 1994). The advocates of organisational learning have also stressed the importance of joint analyses of work processes for the improvement of professional qualifications. But the empirical studies on the prerequisites and realisation of systems aimed to enhance continuous learning are few. At the next phase of this study is to build a training program to develop a shared conceptual model of dependability for the system operators and the maintenance workers.

## References

- Doyle, J. K. & Ford, D. N. 1998. Mental models concepts for system dynamics research. *System Dynamics Rev.* 14, 1, pp. 3-29.
- IEC 50(191). International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service. International Electrotechnical Commission, 1990. 100 p.
- Leppänen, A. 1994. Conceptual mastery of work, mastery of disturbance handling, and their development among personnel in paper production. In: Norros, L. (Ed.) XIII European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control. Espoo: Technical Research Centre of Finland. Pp. 166–176. (VTT Symposium 146).
- Norman, D. A. 1983. Some observations on mental models. In: Gentner, D. & Stevens, A. L. (Eds.) *Mental models*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Ass. Pp. 7–11.
- Staggers, N. & Norcio, A. F. 1993. Mental models: concepts for human-computer interaction research. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, pp. 587–605.

## KÄYTTÖVARMUUS KILPAILUTEKIJÄNÄ (KÄKI) TEKNOLOGIAHANKKEEN JULKAISULUETTELO

**MO** Koordinointi, **K. Holmberg**

*Julkaistu:*

1. **Käyttövarmuus kilpailutekijänä.** 1995. Tutkimus- ja tuotekehityshankkeen yleissuunnitelma:Helsinki, VTT Valmistustekniikka, joulukuu 1995. 18 s.
2. **Competitive Reliability.** 1996. The Finnish National Research and Product Development Program: Helsinki, VTT Manufacturing Technology, toukokuu 1996. 13 s.
3. **Toola, A., Rosqvist, T. ja Sarsama J.** 1996. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Voima ja Käyttö, 3/1996, s. 36.
4. **Holmberg, K., Rouhiainen, V. ja Kleimola, M.** 1996. Käyttövarmuudesta kilpailutekijät Suomen teollisuudelle. Ohutlevy MET, 2/1996, s. 25.
5. **Holmberg, K. ja Aho-Mantila I.** 1996. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. AEL, Käyttövarmuuden kehittäminen, Vantaa 17. - 18.9.1996. s. 4.
6. **Häyrynen, J. ja Holmberg, K.** 1996.Suomen prosessiteollisuus -taustamateriaalia. Espoo, VTT Valmistustekniikka, 1996. s. 27.
7. **Toimintavarmuus tuo tilauksia ja turvallisuutta,** 1997, esite. Helsinki: TEKES, toukokuu 1997. 4 s.
8. **Operational reliability brings orders and safety,** 1997, esite. Helsinki, TEKES, toukokuu 1997. 4s.
9. **Holmberg, K.** 1997. Advanced Solutions for Operational Reliability Improvements. COMADEM'97 Conf., Helsinki, Finland 9. - 11.6.1997. VTT Symposium 171, Vol. 1, s. 11 - 28.
10. **Sohlberg, S.** 1997. Käyttövarmuudesta yritysten tärkeä kilpailutekijä. Kunnossapitolehti, no 6, s. 16 - 18.
11. **Holmberg, K.** 1997. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Tehdaspalvelu 97, Kunnossapitopäivä, kongressi, Lahti 22. - 24.10.1997. 5 s.
12. **Holmberg, K.** 1997. Käyttövarmuutta selvitetään laajassa teknologiaohjelmassa. VTT Kiila, marraskuu 1997. 3 s.

13. **Holmberg, K.** (Ed.) Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo, 18.11.1997. VTT Symposium 175. Espoo, VTT Valmistustekniikka.
14. **Holmberg, K.** (Ed.) Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta. Espoo 19.11.1998, VTT Symposium 188, Espoo VTT Valmistustekniikka, 130 s.
15. **Rouhiainen V., Holmberg, K.** Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Käytön ja kunnossapidon ajankohtaispäivät, Oulu, 6.-7.5.1996, Oulu. POHTO Oy. 18 s
16. **Holmberg, K.** A hollistic approach and new techniques for improved operational reliability. International Symposium on Engineering for Safety, Reliability and Availability ESRA 1997, Takamatsu, Japan, 21-23 Nov 1997, 7 p
17. **Holmberg, K.** 1998. Improving operational reliability by monitoring and dignostics. Int. conf. Energodiagnostica and Condition Monitoring. Moscow, Russia, 12-16.10.1988, 7 s.
18. **Holmberg, K. & Säynätjoki, M.** 1998. Tribology in reliability dsign and operational control. COMADEM'98 Cof. Launceston, Australia, 8.11.12.1998, 7 s.
19. **Holmberg, K.** 1999. Recent technology development for improved operational reliability. 6th International Maintenance Forum 1999. AFIM Conferences, 24-26.11.1999, 7 p

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **M1 Järjestelmätarkastelut, J. Salmikuukka**

1. **Bergman E.** 1997. Korjattavien järjestelmien vikatietojen tilastollinen käsittely. VTT Symposium 175: Käyttövarmuus Kilpailutekijänä. Espoo.
2. **Bergman, E.** 1998. Vikatietojen tilastollinen käsittely -sensuroinnin vaikutus Weibull-mallien estimoinnissa. VTT Tutkimuksia. Espoo.
3. **Kortelainen H.** 1997. LCC - Tuotteen elinjaksokustannukset. VTT Symposium 175: Käyttövarmuus Kilpailutekijänä. Espoo.
4. **Kortelainen, H.** 1997. LCC - Life Cycle Cost Tuotteen elinjaksokustannus. Raportti VALB 231. Tampere.
5. **Rosqvist, T.** 1996. Dependability Analysis Software. VALB 190. Tampere.
6. **Rosqvist, T. ja Sarsama, J.** 1996. Käytettävyyden simulointi. Ohjelmat RAMCommander, AvSim ja SPAR. VALB 210. Tampere.

7. **Rosqvist, T.** 1996. Järjestelmien kunnossapidon suunnittelu. Kunnossapito 6/1996. ss. 38-42.
8. **Rosqvist, T.** 1997. Asiantuntija-arviot käyttövarmuustekniikassa. Raportti VALB 238. Tampere.
9. **Rosqvist T., Kortelainen, H. ja Bergman E.** 1997. Käyttökokemusdatasta informaatioon, VALB 286. Tampere.
10. **Rosqvist, T.** et al.1997. Tuotantojärjestelmän käyttövarmuuden ja kunnossapidon karkea analyysi. Kunnossapito, Vol 2. 1997. ss. 36-39, 42.
11. **Rosqvist T. & Sarsama J.** 1997. Käyttövarmuuden simulointijärjestelmä. VTT Symposium 175: Käyttövarmuus Kilpailutekijänä. Espoo.
12. **Rouhiainen, V.** 1997. Hierarkkinen riskianalyysimalli. Valtakunnallinen tapaturmatutkijoiden ja -asiantuntijoiden seminaari 1997. Työterveyslaitos. 4 s. Vantaa.
13. **Rouhiainen, V.** Käyttövarmuus: Häiriömahdollisuuksien tunnistaminen ja analysointi. Kunnossapidon työnsuunnittelun kehittämisseminaari. Pohto 21.-22.4.1997. 10s + liitteet 4s.
14. **Sarsama, J.** 1997. Luotettavuustekniikan termejä standardiin SFS IEC 50 (191) pohjautuen. VALB 222. Tampere.
15. **Sarsama, J.** 1998. Kattilalaitoksen riskianalyysi. BALTICA IV -Symposium, Energiatuotannon kunnossapitokokemukset. Helsinki-Tukholma 7.-8.9.1998
16. **Toola, A.** 1996. Käyttövarmuustekniikan hyödyntäminen suomalaisissa yrityksissä. VALB 194. Tampere.
17. **Toola, A., Rosqvist, T. ja Sarsama, J.** 1996. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Voima ja Käyttö -lehti 3/1996. s. 36.
18. **Konola J. & Salmikuukka J.** 1998. Käyttövarmuustakuut. VTT Sympostium 175: Käyttövarmuus Kilpailutekijänä-ohjelma-seminaari 1998.
19. **Konola J. & Salmikuukka J.** 1998. Käyttövarmuustakuut ja niiden määrittäminen. Kunnossapito 2/1999.

*Tarjottu/Hyväksytty julkaistavaksi:*

20. **Rosqvist, T.** 1997. An epistemological assessment of dependability management information systems. Hyväksytty 1998 Journal of Quality and Reliability Managment.
21. **Salmikuukka J.** 1999. Käyttövarmuuden hallintamenentelmät, julkaistaan MET raportti-sarjassa 1999

*Käsikirjoitus:*

22. **Rosqvist, T.** 1996. A framework for option generation and decision making in complex organizations. (Manuscript to European Journal of Operations Research, Autumn 96)  
*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:* 4 kpl

## **M2 Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa, S. Virtanen**

*Julkaistu:*

1. **Virtanen S.** Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa - suunnitteluvaatimusten määrittäminen. Teknillinen korkeakoulu, Koneensuunnittelun laboratorion julkaisuja B20. 82 s. 1996. ISBN 951-22-3267-7.
2. **Virtanen S., & Hagmark P-E.** Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa - ratkaisujen etsiminen ja valinta. 1997, Teknillinen korkeakoulu, Koneen-suunnittelun laboratorion julkaisuja B21. ISBN 951-22-3596-X. 60 s.
3. **Hagmark P-E,** 1999. Matriisikokeet Walsh-Hadamard-kannassa. Teknillinen korkeakoulu, Polttomoottorilaboratorion julkaisu No 73. 57 s. Otaniemi 1999.
4. **Virtanen S., Hagmark P-E.** Tuotteen käyttövarmuuden arviointi suunnittelukatselmuksessa. Teknillinen korkeakoulu, Polttomoottori-laboratorion julkaisuja. No. 71. 37 s. 1998. ISBN 951-22-4276-1.
5. **Virtanen S.,** Reliability in Product Design - Specification of Dependability Requirements. Helsinki University Of Technology, Laboratory of Machine Design, Publication No. B23. ISBN 951-22-3906-X. 81 pp.
6. **Virtanen S., & Hagmark P-E.** Reliability in Product Design - Seeking out and selecting solution. 1997, Helsinki University of Technology, Laboratory of Machine Design, Publication No. B22. ISBN 951-22-3901-9. 61 pp.
7. **Virtanen, Seppo & Hagmark, Per-Erik.** Reliability in Product Design - Assurance of Product Dependability. Otaniemi: Helsinki University of Technology, 1998. 37 pp. Internal Combustion Engine Laboratory Publication Nr. 71. ISBN 951-22-4163-3.
8. **Virtanen S.,** Reliability in Product Design - Specification of Dependability Requirements. Proceeding of the 11<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design, ICED 97. Tampere, August 19-21, 1997. Vol 3. pp. 845 - 850.
9. **Virtanen S.,** Reliability in Product Design - Specification of Dependability Requirements. VTT Symposium 172, COMADEM '97. 10<sup>th</sup> International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Espoo 9-11 June, 1997. Vol 2. Pp. 355 - 364.
10. **Virtanen S.,** Reliability in Product Design - Specification of Dependability Requirements. 12<sup>th</sup> International ESReDA Seminar On: Decision Analysis and its application in Safety and Reliability. VTT, Otaniemi, Espoo May 15 - 16. 1997. 9 pp.

11. **Virtanen S.**, Reliability in Product Design - Specification of Dependability Requirements. International Symposium on Product Quality and Integrity - The Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). January 19 - 22, 1998 Anaheim Marriott, CA 92802 USA.
12. **Virtanen S., Hagmark P-E** Reliability in Product Design - Seeking out and selecting solution. COMADEM '98 Proceeding. 11th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Launceston Australia 8.-11 December, 1998 Vol. 2. Pp 861 - 870.
13. **Virtanen S.** Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa - suunnitteluvaatimusten määrittäminen. Licensiaatintyö 1997, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 92 s.
14. **Schuller A.**, Power Plant Reliability Analysis a New Method, In association with Wärtsilä Diesel Oy, Vaasa. Diplomarbeit. 1997 Helsinki Institute of Technology. 110 pp.
15. **Karila A.**, Integrating Reliability into the Diesel Generator Design Process. Mater' Thesis 1997. Teknillinen korkeakoulu, konepajatekniikka. 115 s.
16. **Väänänen M.** Käyttövarmuuden parantaminen paperikoneen kiinnirullaimessa. Diplomityö 1998, Teknillinen korkeakoulu, Koneensuunnittelun laboratorio. 104 s.
17. **Kiviluoma M.** Reliability Engineering in Diesel Generator's Development. Master's Thesis 1998. Teknillinen korkeakoulu, Polttomoottoritekniikan laboratorio. 87 s.
18. **Jalovaara T.** Reliability Engineering in Diesel Engine Development. Master's Thesis 1998. Teknillinen korkeakoulu, Polttomoottoritekniikan laboratorio. 90 s.
19. **Virtanen S. & Hagmark P-E.** Tuotesuunnitteluratkaisujen optimointi: VTT Symposium 175. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo 18.11.19978. s. 77 - 91.
20. **Jalovaara T.** Reliability analysis of gas-diesel engine's fuel injection system. VTT Symposium 188. Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta. Espoo 19.11.1998. s. 95 - 105.
21. **Virtanen S.** Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa. Artikkel. Kunnossapito 3/98
22. **Virtanen, S. ja Hagmark, P-E.** 1997. Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa - ratkaisujen etsiminen ja valinta. Espoo, Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, koneensuunnittelun laboratorio. 60 s. + liitt. 4 (B 21).
23. **Virtanen, S.** 1996. Käyttövarmuus tuotesuunnittelussa - suunnitteluvaatimusten määrittäminen. Espoo, Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, koneensuunnittelun laboratorio. 92 s. + liite 1 (B 20).
24. **Virtanen, S.** 1997. Reliability in product design - specification of dependability requirements. COMADEM '97 Conf., Helsinki, Finland 9. - 11.6.1997. VTT Symposium 172, Vol. 2. s. 355 - 364.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*



*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **M3Komponenttitarkastelut, A. Helle**

*Julkaistu:*

1. **Säynätjoki, M., Andersson, P. and Volkov, T.** 1997. Unstationary tribomechanisms: a survey on material deterioration mechanisms occurring alternatively simultaneously and in parallel. World Tribology Congress, London, GB, 8. - 12.9.1997. Poster.
2. **Säynätjoki, M., Andersson, P. and Volkov, T.** 1997. A survey on material deterioration occurring alternatively simultaneously and in parallel. Machinery Failures and Safety Symposium, Helsinki, Finland, 3.9.1997. 10 s.
3. **Säynätjoki, M., Andersson, P.,** 1997. Comprehensive failure analysis. Teoksessa VTT Symposium 175: Käyttövarmuus kilpailutekijänä -ohjelmaseminaari 18.11.1997, toim. K. Holmberg, ss 93-105. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo 1997
4. **Leinonen H., Säynätjoki M.,** 1997. Komponenttien käyttöhistoriatiedot käyttövarmuus-tarkasteluissa. Teoksessa Teoksessa VTT Symposium 175: Käyttövarmuus kilpailutekijänä ohjelmaseminaari 18.11.1997, toim. K. Holmberg, ss 107-117. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo 1997
5. **Säynätjoki, M., Andersson, P. and Volkov, T.** 1997. A survey on material deterioration occurring alternatively simultaneously and in parallel. Abstract published in: Technology, Law and Insurance, Vol. 3, Nr. 1, march 1998, pp. 81-82.
6. **Andersson, P., Varis P., Volkov T., Mahiout A., Mäkinen S., Säynätjoki M., Auerkari P., Rahka K.,** 1998. Konekomponenttien materiaalien vaurioitumismekanismit. Raportti VTT VAL B-316, 69 s. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo 1998
7. **Mäkelä K., Säynätjoki M.,** 1998. Component failure analysis - methods and means. OST-98 Symposium on Machine Design. Oulanka, Finland, October 1-3, 1998. Acta Universitatis Ouluensis. Ed. By Tatu Leinonen. University of Oulu, Department of Mechanical Engineering. (1998) NO: C130, ss. 73-80.
8. **Parikka R., Säynätjoki M.,** 1998. Komponenttien kriittisyyden määrittäminen. Teoksessa VTT Symposium 188: Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta, Espoo 19.11.1998, toim. K. Holmberg, ss. 107-120. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
9. **Tervo J. Säynätjoki M.,** 1998. Käyttövarmuustietojen hankkiminen ja hyödyntäminen. Teoksessa: VTT Symposium 188: Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta, Espoo 19.11.1998, toim. K. Holmberg, ss.121-130. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
10. **Tervo J. Säynätjoki M., Leinonen H.** 1998. Komponentin vikadiagnostiikkaa tukeva historiadatan keruu. KÄKI Workshop esitelmä 20.11. (ei kirjallista versiota).

11. **Leinonen, H. ja Säynätjoki M.** 1997. Komponenttien käyttöhistoriatiedot käyttövarmuustarkasteluissa. VTT VAL B-340. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
12. **Parikka R., Säynätjoki M.**, 1998. Komponenttien kriittisyyden määrittäminen. VTT VAL B-341, 38 s. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
13. **Holmberg K., Säynätjoki M.**, 1998. Tribology in reliability design and operational control. COMADEM '98. Tasmania, Australia, 8-11 Dec. 1998. Monash University, The Department of Mechanical Engineering. 7 p.
14. **Helle A.S.** , 1999. Experimental Design in Tribological Testing to Support Component Lifetime Estimation. Abstract. 21st IRG OECD wear Group Meeting . Amsterdam, March 25-26 1999. Twente, University of Twente. 2 p.
15. **Helle A. , Säynätjoki M.**, 1999. Tilastollisen koesuunnittelun toimivuus tribologiaan liittyvien kokeiden suunnittelussa. Raportti Nro. VTT VAL B-385. 33 s. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus
16. **Helle A., Mustonen M., Vähä-Pietilä K., Parikka R., Andersson P.** 1999. Komponenttien eliniän ja käyttövarmuuden arvioiminen. Raportti Nro. VTT VAL B-386. 37 s. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
17. **Helle A., Vähä-Pietilä K., Mustonen M.**, 1999 Komponenttitason käyttövarmuustarkastelu osanan laajempaa tuotantojärjestelmien käyttövarmuuden kehittämistä. Raportti Nro. VTT VAL B-387. 15 s. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
18. **Mäkelä K., Säynätjoki M.**, 1999. Component operability evaluation. 10th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Oulu, 20-24 June 1999, University of Oulu, Dept., of Mech. Eng. 8 p

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:* 14 kpl

## **M4 MEMS anturiselvitys, J. Halme**

*Julkaistu:*

1. **Halme, J.** 1997. Mikromekaaniset MEMS-anturit ja niiden käytettävyys kunnonvalvonnassa. Espoo: VTT Valmistustekniikka. 40 s. (VALB 255).
2. **Halme, J.** 1997. Mikroanturit kunnonvalvonnassa. Teoksessa VTT symposium 175: Käyttövarmuus kilpailutekijänä - ohjelmaseminaari 18.11.1997, toim. Holmberg, K. s. 119 - 130. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 1997

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **M5 Paperikoneen säätöjen suorituskykyanalyysi, R. Ritala**

*Julkaistu:*

1. KÄKI-Seminaari 1997
2. KÄKI-Seminaari 1998
3. **Moisio M., Piipponen J.** Control loop performance evaluation, Control Systems '98: information tools to match the evolving operator role, Sept. 1.-3.1998. Porvoo, Finland, Ed. R Ritala, s. 251-258

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 2*

## **M6 Korroosion monitorointi, I. Aho-Mantila**

*Julkaistu:*

1. **Aho-Mantila, I., Pohjanne, P., Hyökyvirta, O. & Saarinen, K.** Operational limits for stainless steels in bleaching applications. Teoksessa : Stainless Steel '99 Science and Market. Chia Laguna, Italy, 7-9 June 1999. Proceedings - Vol.1. S. 271 -279.
2. **Aho-Mantila, I., Pohjanne, P., Hyökyvirta, O. & Saarinen, K.** Process changes and corrosion in the bleaching plant. Paperi ja Puu , 1999. Vol. 81, No 4, s. 291 - 294.
3. **Vilpas, M. & Aho-Mantila, I.** Stainless Steel '99, Ruostumaton teräskonferenssi Sardiassa 6. - 9.6.1999. Hitsaustekniikka, 1999. Vol 49, No 5, s. 7 - 10.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

1. **Pohjanne, P. & Aho-Mantila, I.** High alloy stainless steel (6% Mo) in bleaching applications. Pulp & Paper Canada
2. **Aho-Mantila, I., Saarinen, K. & Hämäläinen, J.** Korroosion monitorointi selluteollisuudessa. Käyttövarmuus kilpailutekijänä ohjelmaseminaari 18.11.1999.

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **M7 MEMS anturit, J. Halme**

*Julkaistu:*

1. **Sillanpää, T ja Seppä, H.** 1999. Mikromekaaninen akustisen emission anturi. Espoo: VTT Automaatio. 6 s. (Väliraportti 99R1047-1)
2. **Saarilahti, J.** 1999. Kaasuanturin prosessointi. Gass 1.0 Espoo: VTT Elektroniikka. 40 s. (Tilanneraportti)

*Tarjottu julkaistavaksi:*

1. **Halme, J.** MEMS mikroantureiden kehitys koneiden kunnonvalvontaan. Tarjottu julkaistavaksi VTT Symposium sarjassa.

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 3 kpl*

## **M8 Inhimilliset tekijät, L. Norros**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 1*

## **M9 Koneiden diagnostiikka, E. Jantunen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **M10 Käyttökokemustiedonhallinta, P. Heino**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **M11 Käyttäjien vaikutukset, V. Rouhiainen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsi kirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **M13 Pinnoitteen ultraäänitarkastus, P. Kuosmanen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsi kirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **M14 Inhimillinen tekijä prosessien käyttövarmuuden kehittämisessä, A. Leppänen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

1. **Leppänen, A., Nurmi, V., Fredriksson, A.** Human activity in the improvement of process dependability. The conceptions of the operators and the maintenance personnel. Tarjottu julkaistavaksi Käki-projektin vuosikirjassa.

*Käsi kirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **M15 Tuotesuunnittelu 2, S. Virtanen**

*Julkaistu:*

1. **Hagmark P-E**, 1999. Matriisikokeet Walsh-Hadamard-kannassa. Teknillinen korkeakoulu, Polttomoottorilaboratorion julkaisu No 73. 57 s. Otaniemi 1999.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **E1 Höyrykattilat, A. Hotta**

*Julkaistu:*

1. **Tuominen J.** 1997. Boiler Reliability (höyrykattiloiden käyttövarmuus). VTT Symposium 175, Käyttövarmuus kilpailutekijänä, Espoo 18.11.1997.
2. **Räsänen K.** 1998. Using the Reliability Data. Case: Analysis of Power Plant. VTT Symposium 188, Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta, Espoo, 19.11.1998.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:* 3 kpl

## **E2 Kaasuturbiinivoimalaitokset, P. Kangas ja J. Uronen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:* 8 kpl

## **E3 Venttiilit, K. Laitinen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:* 1 kpl

## **E4 Dieselvoimalat, A. Skåtar**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 2 kpl*

## **P1 Tuotantolinjan käyttövarmuuden kokonaismalli, M. Kuusio ja H Kortelainen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **P2 Tuotantojärjestelmän käyttökokemustiedon hallintajärjestelmä, K. M. Mäki ja J. Konola**

*Julkaistu:*

1. **Kaski, M. P., Rouhiainen, V., Mäki, K. M.** Demands for availability data in the pulp and paper industry. Proceedings of the European Conference on safety and reliability - ESREL '98. Trondheim, June 16-19, 1998. Vol 1. pp. 225-228.
2. **Konola, J., Mäki, K. M.** 1999. Käyttövarmuustiedon keruun tarpeet ja mahdollisuudet. Raportti RIS B001. Tampere. 12s.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

1. **Konola, J., Mäki, K. M.** Tuotantojärjestelmän käyttökokemustiedon hallintajärjestelmä., 9 s. Esitelmä KÄKI syysseminaarissa 1999.

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 4 kpl*

## **P3 Venttiili ja säätöpiirin hallintajärjestelmä, J. Riihilahti**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 1 kpl*

## **P4 Prosessiolosuhteiden hallinta laitoksen käyntiinajovaiheessa, E. Pulkkinen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **P5 Prosessijärjestelmän elinjaksotuotto, R. Kuukkanen**

*Julkaistu:*

1. **Taipale, V.** 1998. Osajärjestelmän vaikutus prosessijärjestelmän elinjaksotuottoon, LCP-laskentamalli, 54 s . VTT Tiedotteita-sarjan raportti
2. **Taipale V., Peltonen M., Rouhiainen V.** Kunnossapito 8/98. Elinjaksokustannusten ja -tuottojen tarkastelu investointipäätösten tukena. Tarkastelukohteena Safematic Oy:n voitelu- ja tiivistämisjärjestelmät. s. 40 - 42.

*Tarjottu julkaistavaksi:*

3. **Ville Taipale, Esa Salovaara** Voitelujärjestelmän elinjaksotuoton tarkastelu , 8 s. Esitelmä KÄKI syysseminaarissa 1998.
4. Esa Salovaara , Ville Taipale Safematic Oy mukana käyttövarmuustutkimuksessa. Artikkelinä Safematic Way Safematic Oy:n henkilöstö- ja asiakastiedotus julkaisu.

*Käsikirjoitus:*

5. Lyhennelmä englanniksi VTT Tiedotteita - sarjan raportista: Ville Taipale. Osajärjestelmän vaikutus prosessijärjestelmän elinjaksotuottoon. LIFE CYCLE COST - PROFIT ANALYSIS TO SUPPORT INVESTMENT DECISIONS IN PULP AND PAPER INDUSTRY, Ville Taipale, Esa Salovaara , 7 s.

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä: 4*

## **K1 Paperikoneen kinnirullaimen käyttövarmuus, S. Luomi**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

## **K2 Levytyökoneiden suunnittelun laskentaperusteet, J. Mäkitalo**



*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **K3 Käyttövarmuussuunnittelu, Case Nokia Mobile Phones, T. Jalovaara**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **K6 Rautaruukki case, R. Korhonen**

*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä:*

### **K7 Liikkuvat työkoneet, Tamrock, Nordberg, Plustech, J. Eschner**

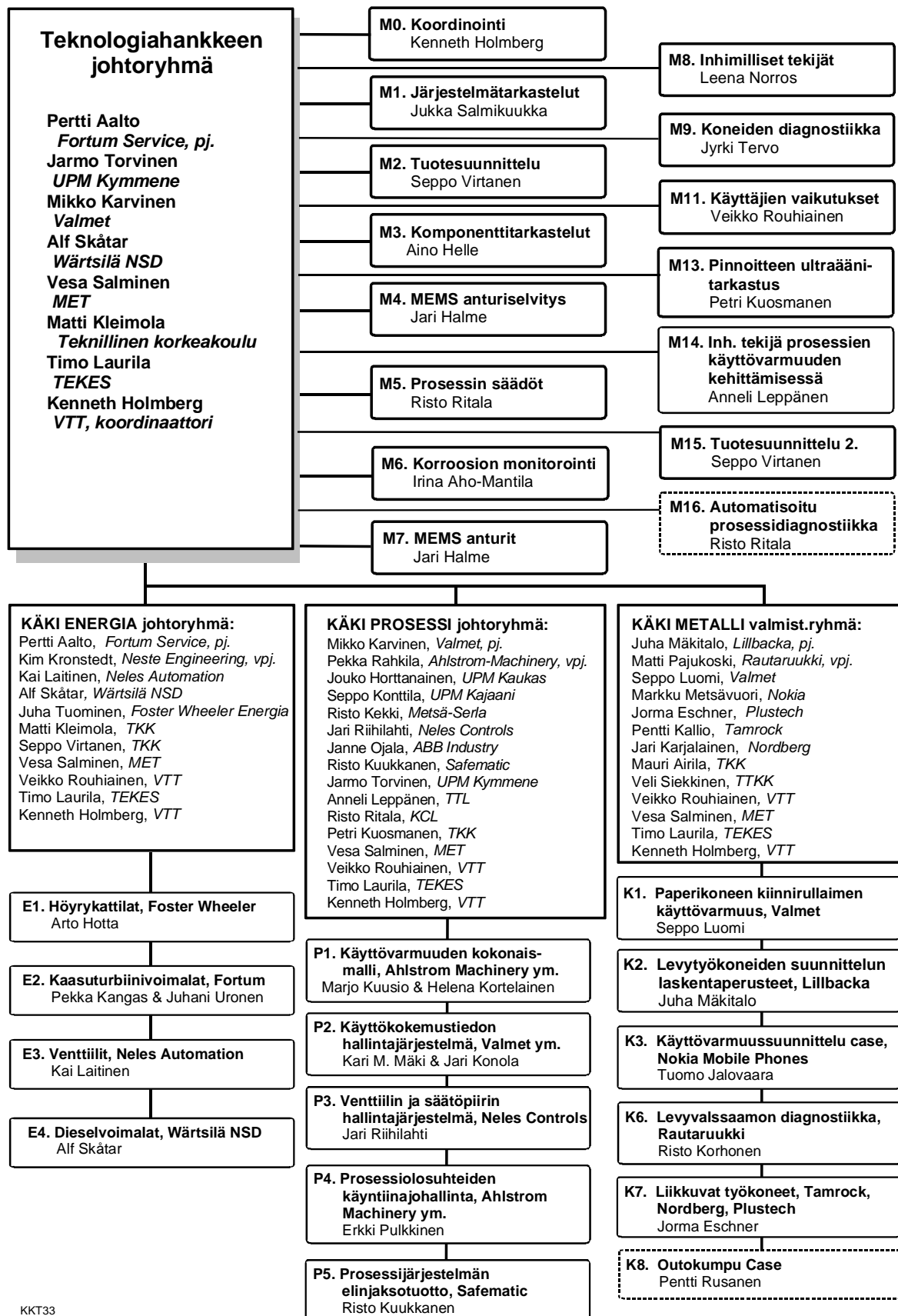
*Julkaistu:*

*Tarjottu julkaistavaksi:*

*Käsikirjoitus:*

*Luottamuksellisten raporttien lukumäärä*

## KÄYTTÖVARMUUS KILPAILUTEKIJÄNÄ - TEKNOLOGIAHANKKEEN ORGANISAATIO



Julkaisija



Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
Puh. (09) 4561  
Faksi (09) 456 4374

Julkaisun sarja, numero ja  
raporttikoodi

VTT Symposium 196  
VTT-SYMP-196

Tekijä(t)

Kenneth Holmberg (toim.)

Nimeke

## Käyttövarmuus ja käyttökunnon hallinta

Tiivistelmä

Nykyään asetetaan yhä suurempia vaatimuksia teollisuuden laitteiden ja järjestelmien käyttövarmuuteen ja niiden käyttökunnon hallintaan. Tähän vaikuttavat monet seikat, kuten ihmisten turvallisuus, ympäristön suojeleminen, energian säästö, seisokkikustannukset ja tuotannon kannattavuus. Enää ei kilpailla pelkästään laitteiden ja järjestelmien suoritusarvoilla, vaan käyttäjä tahtoo saada vakuuttavia takeita toimintavarmuudesta koko tuotteen tai laitoksen eliniän ajan. Mikä on todennäköinen vikaantumistaajuus, käytettävyyden ja elinikä? Nämä ovat keskeisiä kysymyksiä tulevaisuudessa, kun käydään kauppaneuvotteluja. Käyttövarmuus on nousemassa yritysten tärkeäksi kilpailutekijäksi ja myyntiargumentiksi.

Tuotteen ja tuotantolaitoksen käyttövarmuutta voidaan arvioida, mitata ja parantaa monella eri tekniikalla. Julkaisun esittämässä tutkimuksessa näytetään miten sellutehtaan kvantitatiivisella käyttövarmuusmallilla voidaan paikantaa käyttövarmuutta heikentävät alueet ja vertailla erilaisten muutosten vaikutuksia tehtaan käytettävyyteen. Aikaisemman käyttökokemustiedon hyödyntämiseksi on mahdollisimman tehokkaasti kehitetty paperi- ja sellutehtaiden muuttuvaan tehdasympäristöön soveltuva pysyvä käyttökokemustiedon keruujärjestelmä. Erityistä huomiota on kiinnitetty käyttöliittymien kehittämiseen, tiedon syöttämisen helppouteen, tiedon luokitteluun syöttövaiheessa sekä kirjauksia tekevän henkilökunnan koulutukseen ja motivointiin. Tutkimuksessa on selvitetty inhimillisten tekijöiden vaikutuksia käyttövarmuuteen, turvallisuuteen, tuottavuuteen ja tuotteen laatuun paperitehtaassa. Kombivoimalaitoksessa suoritettussa pilottiluonteisessa tutkimuksessa selvitettiin, mitkä ovat ne käynnissäpidon prosessit, joilla on merkitystä käyttövarmuuden kannalta, sekä mitkä inhimilliset tekijät liittyvät käyttövarmuuden kannalta kriittisiin käynnissäpidon prosesseihin.

Käyttövarmuuden huomioon ottamiseen jo tuotteen suunnitteluvaiheessa on kehitetty menetelmiä ja ohjelmia. Paperikoneen kiinnirullaimeen kohdistuneella tarkastelulla on näytetty, miten suunnittelukatselmuksella ja sen jälkeen toteutettavilla asiantuntijakyselyillä on mahdollista tehdä kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen käyttövarmuusanalyysi tarkasteltavasta kohteesta. Käyttövarmuutta parantavia tekniikkoja, kuten telan pinnoitteen ultraäänitarkastusta ja venttiilien kulumisen hallintamethodiikkaa, on kehitetty. On näytetty, miten säätöventtiilien käyttövarmuutta voidaan analysoida uusilla työkaluilla ja parantaa käynnin aikaisella valvonnalla. Metsätyökoneisiin on kehitetty laitteisto, joka systemaattisesti kerää tietoa koneen käyttäytymisestä ja siten mahdollistaa paremman luotettavuusanalyysin suorittamisen.

Automaation osuus tuotteissa ja laitoksissa lisääntyy jatkuvasti, ja siten myös automaation merkitys käyttövarmuuteen. Automatisoitujen laitteiden käyttövarmuutta prosessi-, paperi-, metalli- ja energiateollisuudessa on selvitetty. Automaattisen prosessidiagnostiikan kehittämismahdollisuuksia on tarkasteltu ja uusia MEMS-mikroanturitekniikkaan perustuvia kunnonvalvontatekniikkoja kehitetty.

Avainsanat

reliability, operational control, condition monitoring, human factors, design, data acquisition, operational reliability, pulp and paper, process diagnostics

Toimintayksikö

VTT Valmistustekniikka, Käyttötekniikka, Kemistintie 3, PL 1704, 02044 VTT

ISBN

951-38-5272-5

Projektinumero

V6SU00207

Julkaisu-aika

Marraskuu 1999

Kieli

suomi

Sivuja

154 s. + liitt. 15 s.

Hinta

D

Projektin nimi

Käyttövarmuus kilpailutekijänä (KÄKIKORD)

Toimeksiantaja(t)

Avainnimeke ja ISSN

VTT Symposium  
0357-9387

Myynti

VTT Tietopalvelu  
PL 2000, 02044 VTT  
Puh. (09) 456 4404  
Faksi (09) 456 4374