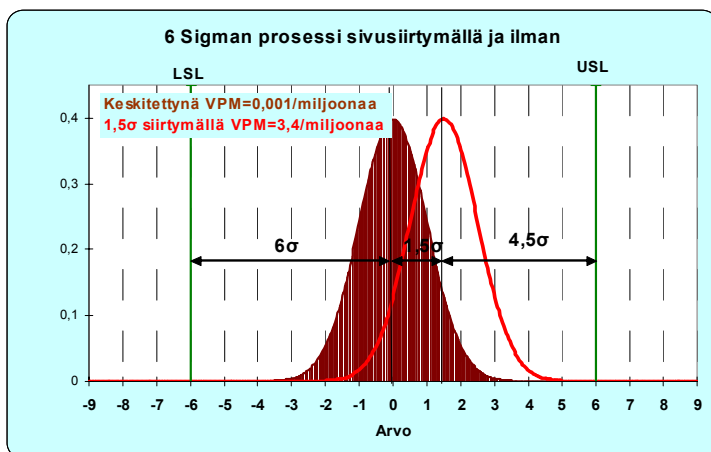
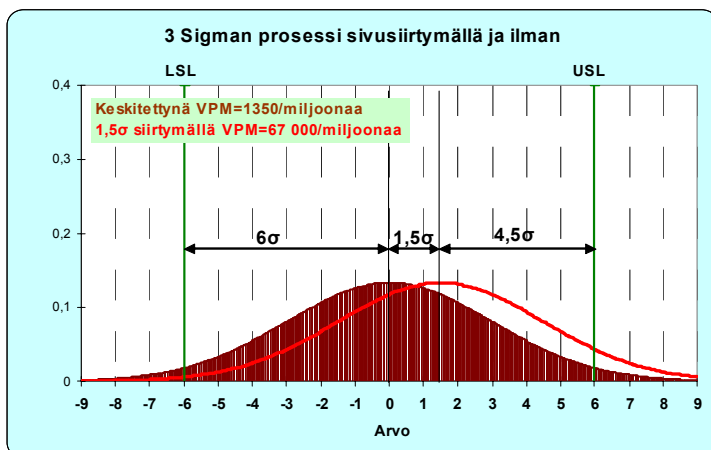


Palvelutasomittausten laadunhallinnan kehittäminen

Six Sigma - laadunhallintamenetelmien soveltaminen

Tiehallinnon selvityksiä 26/2005



Palvelutasomittausten laadunhallinnan kehittäminen

Six Sigma - laadunhallintamenetelmien soveltaminen

Tiehallinnon selvityksiä 27/2005

Verkkajulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-512-1
TIEH 3200938-v

Tiehallinto
Asiantuntijapalvelut
Opastinsilta 12
PL 33
00521 Helsinki
Puhelinvaihde 0204 22 11

TIIVISTELMÄ

Tiehallinnon tiedon hankinta on muuttunut itse tehtävistä mittauksista ja tietovarastojen ylläpidosta kohti pitkäkestoisempia tieto- ja analyysipalvelujen hankintakokonaisuuksia. Tämä asettaa uusia vaatimuksia sekä tilaajan että tuottajan rooleille. Tilaajan täytyy siirtyä mittaamiseen liittyvien yksityiskohtien hallinnasta kohti tilaamisen hallintaa mm. tarkempien määrittelyjen ja laatuvaatimusten sekä palveluprojektien projektinhallinnan alueilla. Vastaavasti palvelun tuottajien on keskityttävä hallitsemaan yhä enemmän mittaamiseen, mittalaitetekniikkaan ja itse mittaustuloksiin liittyvän tietopalvelun tuottamiseen. Tilaaja on kiinnostunut pääasiassa vain tiedon ajan tasalla pysymisestä ja vastuu mittauksen laadusta siirtyy mittauspalvelujen tuottajille. Mittauspalvelujen hankinta tullaan kilpailuttamaan ja sopimuksista tullaan tekemään pitkäkestoisempia, mistä seuraa, että mittaustiedon hankintaan ja tuottamiseen liittyvää laatutietämystä ja laadunhallintaa on kehitettävä.

Tiehallinto kilpailutti päällysteiden palvelutasomittaukset vuonna 2002 ja solmi urakasopimuksen Ramboll Finland Oy:n (entinen SCC Viatek Oy) kanssa vuosiksi 2003 - 2007. Sopimuksessa päätettiin aloittaa mittauspalveluihin liittyvän laadunhallinnan kehittäminen. Laadunhallintaa haluttiin kehittää Six Sigma -menettelyn suuntaan.

Selvitystyö lähti liikkeelle esiselvityksenä Six Sigma -menettelyn käyttömahdollisuuksista, mutta muuttui sitten jo soveltamaan siihen liittyviä menetelmiä palvelutasomittausten laadunhallintaan.

Selvityksessä sovelletaan teollisuudessa käytössä olevaa mittausjärjestelmän toimivuusanalyysia suoraan palvelutasomittauksiin. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi on testi, jolla varmistutaan siitä, että mittalaitteet ja mittausyksiköt ovat keväällä ennen uuden mittauskauden alkamista mittauskunnossa. Esitetty toimivuusanalyysi tulisi asettaa tarjousasiakirjoihin yhdeksi vaatimuksista ja toimittajan olisi näytettävä sen tulokset tilaajalle.

Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi paljastaa, että ura- ja tasaisuusmittauksen mittausjärjestelmät toimivat nyt erittäin hyvin. Vanhan mittaustekniikan aikana niissä alkoi olla selvää toimimattomuutta eikä tuotantomittauksia välttämättä ole tehty kunnollisella mittauskalustolla ainakaan vuosina 1999 - 2002. Varsinkin uramittauksissa alkoi olla jo huomattavia vaikeuksia ja mittaustuloksissa siten selittämätöntä vaihtelua. Vaikka mittausjärjestelmän toimivuutta analysoitiin esitetyn kaltaisella menetelmällä myös aikaisempina vuosina, ei sen ajallista trendiä kuitenkaan seurattu. Jos mittauspalvelun tuottaja olisi itse tehnyt toimivuusanalyysin ja seurannut sen tuloksia aikasarjana olisi huomio kaluston uusimistarpeesta herännyt aikaisemmin.

Selvityksessä puututtiin pohtimaan myös mittaustiedolle asetettavia asiakastarpeita. Ts. mittaustiedon käyttäjän näkökulmasta mietittiin ja analysoitiin miten tarkkaa mitatun kuntotiedon tulisi olla. Asiakkaan tarpeet otettiin toisesta tutkimuksesta, jossa niitä selvitettiin (niin ikään Six Sigma-välineistöön kuuluvalla) riskianalyysillä simuloimalla tiedon laadun ja käyttötilanteiden välistä suhdetta ottamalla kustannukset ja riski mukaan tarkasteluun.

Lopuksi kehitettiin tuotantomittausten suorituskykylaskentaa suhteuttamalla toteutuvaa tarkkuutta asiakasvaatimuksiin. Suorituskykyä mitattiin sigmoisissa. IRI-mittausten suorituskyky nousi uuden mittaustekniikan myötä vanhan tekniikan tyydyttävältä tasolta hyvälle tasolle. Uramittausten suorituskyky nousi vanhan tekniikan huonolta tasolta hyväksi. Esitetty tapa olisi hyvä lisä tuotantomittausten toteutuvan laadun osoittamiseen, koska se suhteuttaa toteutuvan laadun suoraan asiakkaan todellisiin tarkkuustarpeisiin. Mittausurakan laatuvaatimuksissa tarvitaan sen lisäksi kuitenkin edelleen vielä teknisiä laatuvaatimuksia (50 % ja 95 % pisteet), joilla on suora yhteys mittaus-tarkkuuteen.

ESIPUHE

Tiehallinto kilpailutti päällysteiden palvelutasomittaukset vuonna 2002 ja sopimuskumppanin kanssa päätettiin kehittää mittausten laadunhallintaa yhteisillä kehittämisprojekteilla. Tämä selvitys on yksi Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelman osaprojekti, VOH 1.1 Palvelutasomittausten kehittäminen, jossa selvitettiin mahdollisuuksia kehittää perinteistä palvelutasomittausten laadunhallintaa.

Selvityksen ovat tehneet Tieinsinööri Pertti Virtala (Tiehallinto/Tienpidon suunnittelupalvelut), Dipl.ins. Kalervo Mattila (Ramboll Finland) ja FM Seppo Järvinen (Ramboll Finland).

Helsinki, toukokuu 2005

Tiehallinto
Asiantuntijapalvelut

Sisältö

I	JOHDANTO	9
1.1	Kuntotieto tieverkon ylläpidon toiminnansuunnittelussa	9
1.2	Palvelutasomittaukset	10
1.3	Laatu ja laadunhallinnan tila	11
1.4	Six Sigma	14
2	SELVITYKSEN TAVOITTEET	19
3	ASIAKASVAATIMUSTEN SUUNNITTELU	21
3.1	Menetelmät	21
3.2	Tuotantolähtöinen tolerointi	22
3.3	Asiakaslähtöinen tolerointi	22
3.3.1	Asiakasvaatimukset ohjelmointitasolta	23
3.3.2	Asiakasvaatimukset tulosohjaustasolta	25
3.3.3	Asiakasvaatimukset hankinnan tarpeista	25
3.3.4	Asiakasvaatimukset kuntoennusteiden mallintamisesta	27
3.4	Yhteenvedo asiakastarpeista	29
4	MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOIMIVUUS	30
4.1	Menetelmät	30
4.2	Aineisto	32
4.2.1	Uramittausten toimivuusanalyysin lähtöaineisto	32
4.2.2	IRI-mittausten toimivuusanalyysin lähtöaineisto	33
4.3	Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi	35
4.3.1	Uramittausten toimivuusanalyysi	35
4.3.2	IRI-mittausten toimivuusanalyysi	37
4.4	Mittausjärjestelmän toimivuus	38
5	MITTAUSPROSESSIN SUORITUSKYKY	40
5.1	Menetelmät	40
5.2	Aineisto	42
5.2.1	Uramittausten suorituskykyanalyysin aineisto	42
5.2.2	IRI-mittausten suorituskykyanalyysin aineisto	44
5.3	Suorituskykyanalyysi	46
5.3.1	Uramittausten suorituskyky	46
5.3.2	IRI-mittausten suorituskyky	48
5.4	Suorituskyvyn esittämisen tavat	50
5.5	Suorituskyky ja prosessin vaihtelu	52
5.6	Suorituskykyvertailua	54
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	55

7	LÄHDELUETTELO	58
---	---------------	----

8	LIITTEET	60
---	----------	----

Liite 1 Toleroinnin suunnittelun teoria

Liite 2 Mittausprosessin toimivuusanalyysin teoriaa

Liite 3 Mittausten suorituskykylaskennan teoriaa

Liite 4 Kontrollin ja tuotannon sekä kontrollin erotuksen kuvaajat

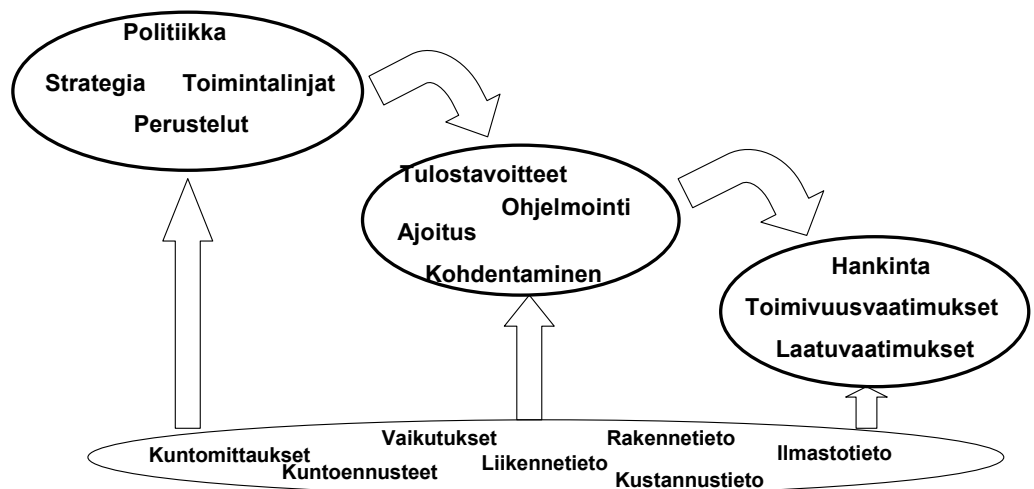
Liite 5 Suorituskykylaskennan jakaumakuvat

I JOHDANTO

1.1 Kuntotieto tieverkon ylläpidon toiminnansuunnittelussa

Tieverkon ylläpidon toiminnansuunnittelussa tehdään monenlaisia päätöksiä, jotka pohjautuvat pääosin verkolta kerättyyn ominaisuus- liikenne- ja kunto-tietoon. Päätöksiä joudutaan tekemään paitsi itse tuotteen rahoituspohjan perustelemiseksi (lukuisilla yhteiskuntatalouden alueelle suuntautuvilla analyysillä ja selvityksillä) myös strategisina valintoina ja päätöksinä päätettäessä ylläpidon strategiasta ja toimintalinjoista sekä tuotelinjan osien painotuksista. Edelleen päätöksiä tehdään tulostavoitteen asettamisessa toiminnan suuntaamiseen liittyvien asioiden painottamisessa sekä erityisesti varsinaisessa ohjelmoinnissa päätettäessä vuosityöohjelmien kohteiden ajoituksesta ja sisällöstä.

Päällystetyn tieverkon ylläpitoon käytetään nykyisin vuositasolla noin 150 M€. Päällystysohjelmien pituudet ovat viime vuosina olleet välillä 2 500 - 4 500 km. Ylläpidon toiminnansuunnittelun eri päätöksentekotasolla tarvitaan tieverkon kuntotietoja (kuva 1.1).



Kuva 1.1 Samaa kuntotietoa käytetään monissa eri päätöksentekotilanteissa.

Päällysteiden ylläpidon toiminnansuunnittelun keskeisenä tietopohjana ovat tieverkon liikenne- ja kuntotiedot. Kuntotietoa käytetään monissa eri analyysissä, mutta ns. perustoiminnan suunnittelussa sitä käytetään mm. seuraavien asioiden selvittämisessä:

- nykytilan selvittäminen ja esittäminen
- ennustemallien tekeminen
- toimenpiteiden vaikutusmallien tekeminen
- ylläpidon rahoitustarpeiden analysointi ja perustelu
- tulostavoitteiden suunnittelu ja raportointi

- tiepiirikohtaisten rahoituskehysten suunnittelu
- Toiminta- ja taloussuunnitelman (TTS) valmistelu
- ylläpitostrategioiden ja toimintalinjojen valmistelu
- päällystysohjelmien laatiminen
- toteutuneen toiminnan tuloksen mittaaminen
- tulospalkkioiden peruste
- erillisanalyysit

Kuntotieto on perustana useille eri tunnusluvuille ja päätöksille, joita toiminnasuunnittelussa käytetään. Keskeisimmät ovat seuraavat:

- kuva tieverkon nykykunnosta
- optimitila, jossa huonojen teiden määrä olisi noin puolet nykyisestä
- liikenteen lisäkustannukset nykytilan ja optimitilan välillä ovat vähintään 50 M€ vuodessa
- päällysteiden kunnan jälkeen jäämä (2000) oli 550 M€ ja sen kiinnikurominen edellyttäisi noin 200 M€:n vuotuista panostusta ylläpitoon noin 10 vuoden ajan
- päällysteiden ylläpitotoimenpiteitä on ohjelmoitu viimeisten kymmenen vuoden aikana jo yli 1 Mrd€:n verran
- tiepääomalaskelman kalibrointi Tiehallinnon väyläomaisuustaseeseen
- ylläpitotoimenpiteiden ajoitus ja mitoitus

Päällystettyjen teiden kuntotiedon mittaamiseen, tallentamiseen ja analysointiin käytetään vuositasona noin 2 - 3 M€.

Kuntotiedon laadunhallinta on nousemassa aiempaa tärkeämmäksi asiaksi, koska tietopalvelua tullaan tulevaisuudessa hankkimaan enemmän ulkoisilta palvelun toimittajilta ja hankittavat palvelukokonaisuudet tulevat olemaan aiempaa suurempia kilpailutettuja kokonaisuuksia.

1.2 Palvelutasomittaukset

Palvelutasomittauksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä päällysteiden pituus- ja poikkiprofiilin mittaamista sekä niistä laskettujen tunnuslukujen tuottamista. Palvelutasomittaukset kehitettiin 1980-luvun lopulla ja ensimmäiset mittauslaitteet otettiin käyttöön vuonna 1989. Tiehallinto suoritti mittaukset omana työnä. Vuonna 1997 mittauslaitteet ja henkilöstö siirrettiin Tielaitoksen tuotannon mittausyksikölle, jolta ne ostettiin. Tiehallinnon ja Tielikelaitoksen eriydyttyä mittaukset tilattiin palvelusopimuksilla (2001 - 2002) ja vuodesta 2003 lähtien mittauspalvelut toimittaa kilpailun perusteella valittu mittausurakoitsija seuraavien 5 vuoden ajan. Tämän jälkeen mittauspalvelu tullaan kilpailuttamaan uudelleen.

Mittaustiedon hankintatavan muututtua omasta toiminnasta neuvoteltujen palvelusopimusten kautta kilpailutetuksi mittausurakaksi on mittaustoiminnan laadunhallinnan kehittäminen noussut tärkeäksi kehityskohteeksi.

Omana työnä suoritetuissa mittauksissa pyrittiin tekemään mittaustyötä huolella vaikka varsinaisia laatuun liittyviä tunnuslukuja ja laatuvaatimuksia ei

ollut olemassa. Esimerkiksi laadun kehittymisestä ei kyetty sanomaan paljoakaan.

Palvelusopimuksilla tilatuissa mittauksissa alettiin kiinnittää huomiota laatuun kehittämällä laadun esittämisen- ja mittaustapoja. Laatuvaatimuksia ei kuitenkaan pystytty vielä asettamaan.

Kilpailutetussa mittausurakassa edellisiin mittauksiin pohjautuvat laatuvaatimukset otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön. Laatuvaatimusten määrittämisessä ei kuitenkaan ole pystytty huomioimaan vielä varsinaisia aitoja asiakastarpeita, joiden perusteella lopulliset laatuvaatimukset olisi pystytty asettamaan.

Tämän takia onkin tarve selvittää, mitkä ovat kuntotietoon ja sen mittaamiseen liittyvät todelliset asiakasvaatimukset ja kuinka hyvin tuotannollinen mittaustoiminta niiden suhteen lopulta suoriutuu. Vasta laadun esittämistavan ja asiakasvaatimusten olemassaolo mahdollistaa mittaustoiminnan suorituskyvyn määrittämisen.

1.3 Laatu ja laadunhallinnan tila

Laadunhallintaa ja laatujohtamisen menetelmiä ovat kehittäneet monet "laatu-guruina" tunnetut henkilöt kuten Deming, Juran, Shewart, Ishikawa tai Kano. Puuttumatta tässä yhteydessä sen tarkemmin em. henkilöiden tuotoksiin todetaan ainoastaan, että teollisuuden prosessien hallinnassa laatu on tärkeä asia ja siihen panostaminen maksaa itsensä takaisin. Laatuun panostamisen kannattavuudesta onkin usein sanottu, että laatu on ilmaista. Laadun hallintaan liittyvää kehittämistä on alettu harrastaa yhä enemmän myös julkisen sektorin alueella, koska yhä vähemmillä resursseilla on saatava aikaan yhä enemmän.

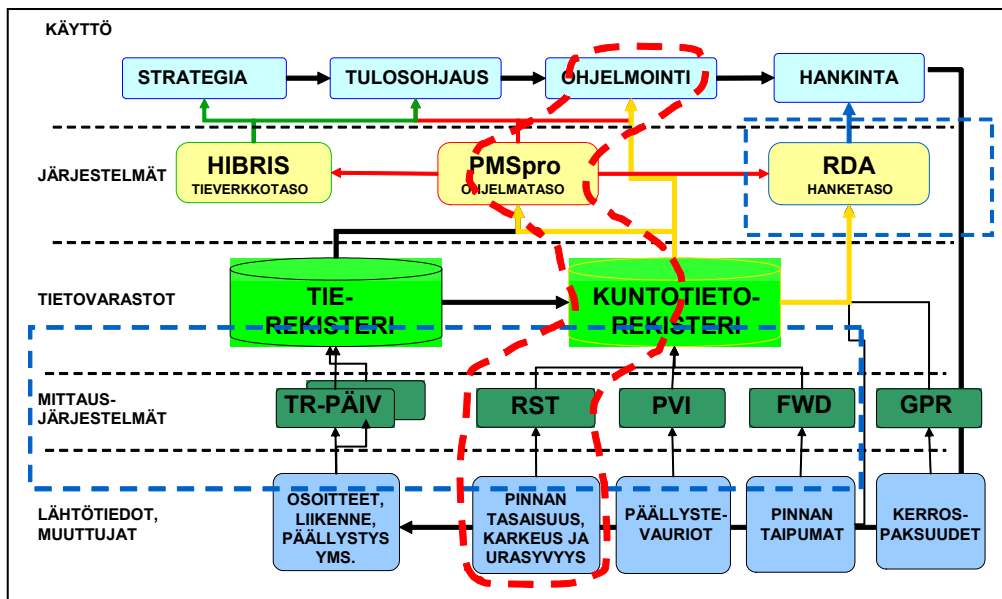
Laadunhallinnassa on keskeinen sija tietojärjestelmillä, koska niihin kerätään kaikki se tietomäärä, jolla toimintaa suunnitellaan ja ohjataan. Tietojärjestelmien koon kasvaessa ote niiden sisällön laatuun heikkenee ilman erityisiä toimenpiteitä ja siitä huolehtiminen edellyttää kehittyneempien menetelmien käyttöä. Tietojärjestelmien ja laadunhallinnan rajapinnassa on "markkinoita" useille menetelmille, joiden käyttö tuo lisää laadunparannusmahdollisuuksia. Tällaisia menetelmiä ovat mm:

Data warehousing (DW), joka pitää sisällään kaiken sen tiedon, jota organisaatio ylipäätään kerää ja varastoi. Tiedonkeruujärjestelmät, tiedon jalostamis- ja "puhdistusjärjestelmät", tietovarasto, metadata, jolla kuvataan mitä on olemassa ja missä se sijaitsee, data marts, joilla kuvataan miten tietoon pääsee käsiksi, palaute- ja korjausjärjestelmät sekä loppukäyttäjä, jota varren tietoa ylipäätään kerätään ja varastoidaan. Tällaiseen kokonaisjärjestelmän hallintaan on olemassa erilaisia ohjelmistoja.

On Line Analytic Processing (OLAP), joka mahdollistaa suurten tietokantojen sisällön analysoinnin tuotteistetuilla laadunhallinnan välineillä. Tällaisia ovat mm. tiedon hyväksikäyttöjärjestelmät, joilla tietovarastojen tietoa yhdistellään ja käytetään. Perinteisimmät näistä ovat raportointi- ja GIS-työkalut.

Data Mining (DM), joka sisältää kehittyneitä välineitä ja tekniikoita tietovaraston laadunhallintaan. Data Mining sisältää menettelytavat tietovaraston tiedon sisällön ja olemuksen tarkempaan tietämiseen ja hallintaan. Sillä kuvataan tietueisiin liittyviä tunnuslukuja sekä seulotaan mahdollisia epäloogisuuksia tai virheitä tietosisällössä. DM on tietovaraston jatkuvaa seulontaa ja virheettömyyden varmistusta. Tietojen "louhintaan" on olemassa erilaisia ohjelmistoja. Joihinkin ohjelmistoista kuuluvat myös neuroverkkomallit uutena hyödyntämismahdollisuutena. Näin valtavat tietovarastot pysyvät hallinnassa ja virheellinen tietosisältö pystytään suodattamaan entistä tehokkaammin. Ainoana haittapuolena on valmiiksi räätälöityjen DATA Mining -ohjelmistojen kalleus. Tosin tällaisia töitä pystytään tekemään manuaalisestikin, jos ohjelmointiosaamista on riittävä määrä.

Päällysteiden ylläpidon hallinnan tärkeimmät tietojärjestelmät ovat tiedonkeruujärjestelmät, tierekisteri, kuntotietorekisteri, HIBRIS ja PMSpro. Tämän työn kannalta oleelliset edellä mainituista ovat ketjun PTM-mittausjärjestelmä-KURRE-tietovarasto-PMSpro-suunnittelujärjestelmä osat, joiden laadunhallintaan tämä selvitys pääasiassa liittyy.



Kuva 1.2. Päällysteiden ylläpidon hallinnan tietojärjestelmät ja eräs laadunparannusputki.

Mittausten laadunhallinnan tilaa voidaan luonnehtia karkeasti seuraavilla kommentteilla:

- mittausten tietosisältöön on vaikuttanut paljon se polku, jolla itse mittausinstrumentit on suunniteltu. Tietosisällön on enimmäkseen määritellyt laitevalmistaja tai laitekehittäjä niissä puitteissa, mihin tekniset ominaisuudet ovat riittäneet (ultra-äänianturit, laserit, GPS).
- mittauksia on tehty alueellisista tarpeista lähtien, eikä niiden valtakunnalliseen edustavuuteen ole ensisijaisesti kiinnitetty kovin paljon huomiota (mittausohjelmat suunnitellaan tiepiireissä)
- mittausten laatua on seurattu pääasiassa keväällä tehtävillä vertailumittauksilla, joilla on pyritty varmistumaan siitä, että laitekanta on mit-

tauskunnossa sekä henkilöstön osaamisen taso varmennettu ennen tuotantomittausten aloittamista

- tuotantolaatua on alettu seurata vasta vuodesta 2001 lähtien
- laatutietoisuus on alkanut kehittyä laajemmin vasta vuoden 2001 jälkeen, mutta ei ole saanut kovin merkittävää sijaa itse järjestelmäkehittämisen kokonaisuudessa
- siirtyminen mittausten tilaamisessa keskitettyihin palvelusopimuksiin (2001) mahdollisti mitattavien asioiden speksaamisen. Palvelulle ei voitu kuitenkaan vielä asettaa laatuvaatimuksia.
- PTM-mittausten toimivuudessa oli vanhan mittaustekniikan aikana selittämätöntä vaihtelua, mikä häiritsi laatuun liittyvien tunnuslukujen ja analyysien tekemistä ja siten laatutietoisuuden kehittymistä.
- siirtyminen kilpailutettuun mittausurakkaan vuonna 2003 mahdollisti edellistä tarkemman speksaamisen sekä laatuvaatimusten asettamisen
- laatuvaatimusten asettaminen tapahtui kuitenkin mittausten tuotantoteknisistä mahdollisuuksista lähtien, eikä varsinaisia asiakasvaatimuksia siten ole pystytty huomioimaan
- mittausten laadunhallintaan liittyvinä pääasiallisina puutteina voidaan edelleen todeta, että
 - mittaustekniikka oli aiemmin vanhentunutta ja tuotti siten selittämätöntä vaihtelua tuloksiin
 - mittauskelpoisuuden kunnossa olemisen varmistamiseksi ja osoittamiseksi ei aiemmin käytetty riittäviä menetelmiä
 - laatutietämys sekä tilaajan että toimittajan taholta on puutteellista, mistä syystä laadun tunnuslukuja ja esittämistapoja ei ole pystytty yhteisesti sopimaan
 - ja että asiakkaan todellisia tarpeita mittausten laadulle ei ole toistaiseksi analysoitu eikä selvitetty

Tietovarastojen laadunhallintaa ei käsitellä tässä selvityksessä tarkemmin, ainoastaan todetaan, että:

- tietovarastoihin pääsee laadultaan puutteellista tietoa (esimerkiksi formaatit, tiedonsiirtotavat)
- tietovarastojen laadunhallintaa (Data Mining) ei toistaiseksi kovin merkittävästi tehdä
- tietovarastoissa olevien laatupuutteiden määrää, laatua ja vaikutusta hyväksikäyttötilanteisiin ei toistaiseksi kovin tarkkaan tiedetä, eikä analysoida
- laatupuutteita tulee ilmi enimmäkseen hyväksikäyttötilanteissa (esimerkkinä tulosohjaus)
- tietovarastojen tietojen laatu rajoittaa esim. mallintamisen tai analyysien laatua
- mittaustaloutta ei ole voitu optimoida
- tietovarastojen laatuun liittyvät merkittävimmät kehittämistarpeet ovat:
 - uusien mittaustietojen laadun tason tunteminen
 - historiatiedon laadun tason tunteminen
 - virheellisyyksien määrän ja laadun selvittäminen
 - jatkuvien laadunhallintasyklien kehittäminen

Laadunparannustyön tulee lähteä siitä, että analysoidaan koko prosessia ja sen toimivuutta ja etsitään ns. laatupuutekohtia. Laadunparannushankkeet

tulee asettaa sellaiseen järjestykseen, että parannustyön tulokset saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti.

PTM-tiedon hyväksikäytössä ei ole vielä systemaattista koko prosessin laatu-putteiden kartoituskäytäntöä. Kun tiedetään tiedon laadun heikkenevän prosessin edetessä siten, että tiedon synnyn alkupää määrää mihin laatu-tasoon loppupäässä enintään on mahdollista päästä, on turvallista panostaa laatuun prosessin alkupäässä. Tästä syystä on tärkeätä panostaa mittaus-tiedon laatuun ja siihen, että mittausjärjestelmät ovat kunnossa.

Tiedon hankinnan ja tietojärjestelmien ylläpidon ulkoistamisessa ollaan me-nossa hankintastrategian linjaamana yhä suurempiin kokonaisuuksiin, jolloin palvelun tuottaja on vastuussa mittaustoiminnan lisäksi myös mitattujen tie-tojen perusteella tehtävistä analyyseistä ja itse tietopalvelusta. Tietopalve-lun "karkea" pää sisältää paljon enemmän epävarmuustekijöitä kuin pelkkä mittaustoiminta ja sen takia mittaustoiminta tulisi olla laatumielessä viritetty huippuun.

Laadunhallinnassa on usein tarjottu ratkaisuna ISO-järjestelmän mukaista menettelyä ja sertifiointia. Tästä on kuitenkin sanottu, että ISO-järjestelmä toimii "laatulurankona" ja sertifiointi "laatonahkana", mutta varsinaiset "laa-tulihakset" puuttuvat. "Luuranko" ja "nahka" ovat tarpeellisia ja paikallaan, mutta ne eivät paljoa auta jos laatulihakset, laadun numeerinen osoittami-nen, puuttuu. Tässäkin selvityksessä on siis paneuduttu laatuun liittyvien "li-hasten" kasvattamiseen. Eräs menetelmä tähän tarkoitukseen on Six-Sigma, jota esitellään lyhyesti seuraavassa luvussa

1.4 Six Sigma

Six Sigma on viime vuosina esille noussut laatujohtamis- ja laadunparan-nusmenetelmä. Se sisältää enimmäkseen jo kehitettyjä vanhoja laadunpa-rannusmenetelmiä ja onkin ehkä siksi niin kiistelty. Mielipiteet siitä jakaantu-vat selvästi kahtia:

- sitä pidetään filosofiansa ja melkoisen menetelmävalikoimansa takia kaikkien aikojen laadunparannusmenetelmänä, jolla liiketoiminta saa-daan paranemaan selkeästi ja tehokkaasti,
- mutta toisaalta sitä pidetään taas vanhojen jo kehitettyjen menetel-mien työkalupakkina, joissa ei ole mitään uutta.

Kaksi keskeisintä asiaa Six Sigmassa ovat laadullisen menetelmäosaamisen sekä tietoon luottamisen painottaminen. Six Sigmassa voidaan luottaa tie-toon, koska sen oikeellisuuteen on varmistettu. Useat Six Sigman menetel-mistä liittyvätkin enimmäkseen tiedon luotettavuuden parantamiseen. Tieto-putteiden peittelyn ja vähättelyn sijasta tavoitteena on löytää ja tuoda niitä julkisesti esille; vain sitä kautta tiedon laatu ja luottokelpoisuus pääsevät pa-ranemaan.

Six Sigma on monta eri asiaa yhtä aikaa. Sitä voidaan luonnehtia mm. seu-raavilla kuvauksilla:

- se on myös johtamismenetelmä ja laadunhallinnan filosofia. Liiketoi-minnan johtamis-, parannus-, ja laadunhallintamenetelmä, jolla pyri-

tään eliminoimaan olemassa olevien virheiden syyt liiketoimintaprosessista ottamalla samanaikaisesti huomioon asiakastytyväisyys ja tuloksen optimointi.

- se tarjoaa kätevän vertailumitan, jolla verrataan prosessien, tuotteiden ja palveluiden laatutasoa toisiinsa. Laatua kuvataan sigmatasoina.
- se on laatutavoite, joka on hyvin lähellä nollavirhettä.
- se on uusi laadun mittautapa: suorituskky suhteessa asiakkaan tarpeisiin. Menetelmässä korostuu asiakkaiden (sisäisten ja ulkoisten) tarpeiden tunteminen ja huomioiminen. Laatua ei ole hyvä suoritusarvo itsessään, vaan hyvä suoritusarvo suhteessa odotuksiin.
- se on strategia, jolla saadaan aikaan parempaa halvemmalla. Motto on, että "Jokainen liikevaihdon miljoona pitää sisällään ainakin yhden laadunparannusmahdollisuuden, jonka keskimääräinen tuotto/säästö on luokkaa 150 000".
- se on tilastotiedettä, jossa (mm. tilastollisilla) menetelmillä ja datalla on merkittävä asema. Sigma tilastollisesti ymmärrettynä tulee ja-kauman hajonnasta. Virheitä kuvaavien jakaumien hajonnan pienenus on laatua.

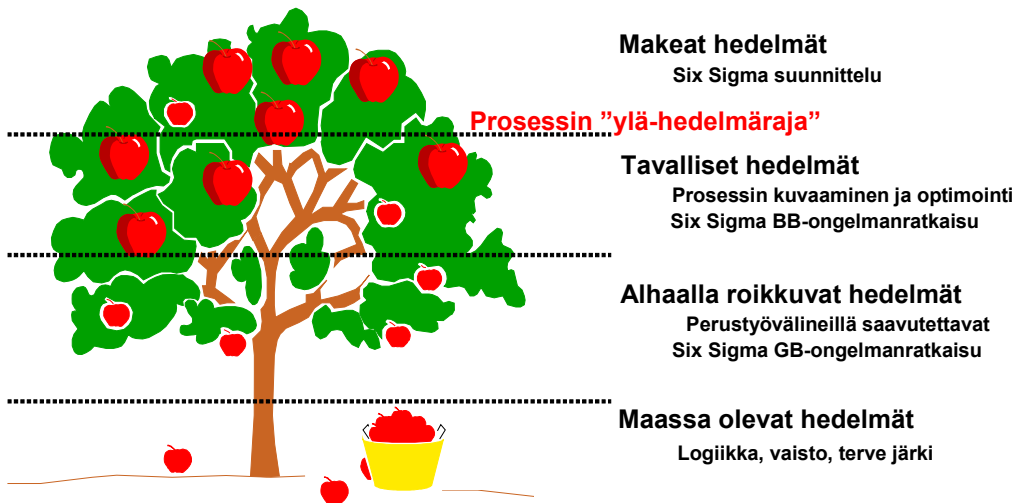
Kaiken kaikkiaan Six Sigma on tehokkaiden työkalujen "välinepakki" ja tapa pitää edistymisen hallinnassa. Se tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden poimia kuvan 1.3 tapaan "laadun hedelmiä" myös ylempää puusta. Menetelmien osaamattomuus rajoittaa poimimaan vain itsestään maahan tippuvia "hedelmiä" (vrt. hyväksikäyttötilanteissa paljastuvat laatu puutteet). Laadunparannuksen menetelmien osaamattomuus pakottaa laadunparannustyön rajoittumaan vain käyttötilanteissa paljastuviin virhetilanteisiin, eikä ennaltaehkäisevää parannustyötä ja laadun systemaattista suunnittelua siten pystytäkään tekemään. Tässä selvityksessä haetaan välineitä "alhaalla roikkuvien hedelmien" poimimiseen.

Six Sigma on maailmanlaajuisessa käytössä muun muassa prosessi-, automaatio-, elektroniikka- ja autoteollisuudessa. Sellaiset yritykset kuten Nokia, General Electric, Samsung, Motorola ja Ford ja monet muut pienemmät yritykset ovat sen ottaneet käyttöönsä menestyksekkäästi. Myös julkinen sekä palvelusektori on alkanut soveltaa Six Sigmaa.

Six Sigmassa tuotteen jokaiselle kriittiselle laatuominaisuudelle lasketaan suoritusarvo asiakkaan määrittämää toleranssia eli asiakasspesifikaatiota vastaan. Tavoitteena on saada palvelu-, tuote tai tapahtumaprosessi kohti tavoitearvoa niin, ettei toleranssin eli asiakasspesifikaation ylittävien tuotteiden määrä ole liian suuri. Tämä ilmaistaan sigma-tason avulla: kuinka monta

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

keskihajontaa mahtuu toleranssirajojen väliin. Tavallisesti tuotantoprosessissa määriteltujen toleranssien eli asiakasspesifikaatioiden, väliin mahtuu 3 keskihajontaa. Sen sijaan Six Sigma -laatutasossa päästään kuuden keskihajonnan määrään: mitä useampi mahtuu toleranssirajojen väliin – sitä parempaa laatu on (vrt. kuva 1.4).

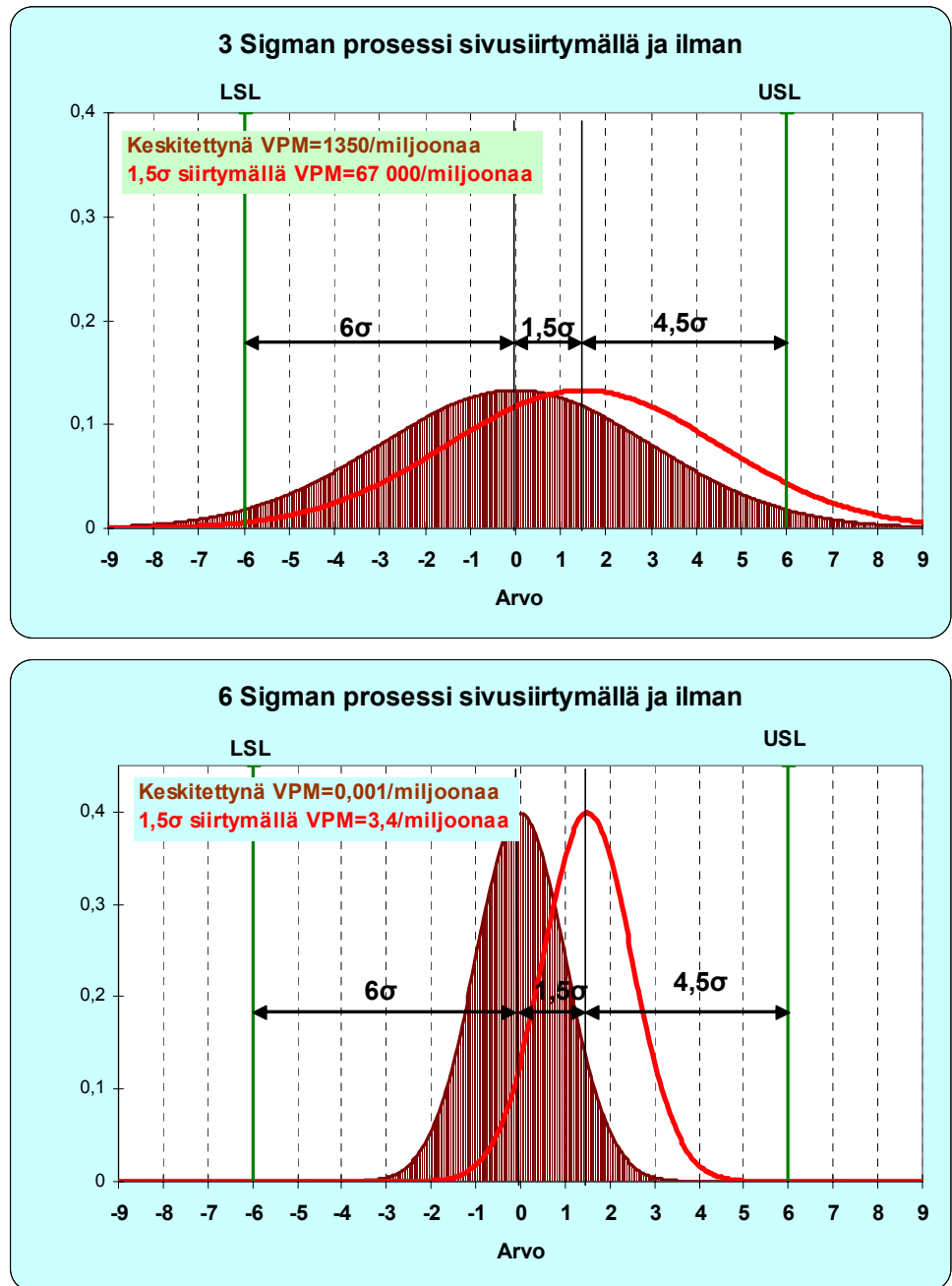


Kuva 1.3. *Laadun mehukkaimmat hedelmät sijaitsevat ylhäällä eikä niitä tavoiteta ilman menetelmäosaamista (vrt. E. Karjalainen, 2002). Perustyövälineitä ovat mm. Syy-seuraus-kaavio, MSA, prosessin kyvykkyys, DOE, FMEA, SPC ja VOC-matriisi, joista osaa käytetään tässä selvityksessä. Six Sigmalla on myös määritetty yhteys ISO-standardiin ja laatupalkintomalliin.*

Miksi 3 sigman laatutaso ei riitä? Kuvan 1.5 kirjan tekstivirhe-esimerkissä virheitä oli 1,5 väärin kirjoitettua sanaa kirjan joka sivulla. Riippuu tietysti kirjasta, mutta tuntuisi hyvinkin siltä, ettei ko. laatu oikein enää riitä.

Jos palveluja tuotettaisiin 3 sigman laatutasoon niin sillä olisi mm. seuraavia piirteitä:

- energian jakelussa joka kuukausi 7 tunnin katkos
- juotavaksi kelpaamatonta juomavettä 15 min joka päivä
- 20 000 kadonnutta postilähetystä USA:ssa joka tunti
- kaksi liian pitkää tai lyhyttä laskeutumista USA:n suurimmilla lentokentillä joka päivä
- 200 000 virheellistä lääkeresepiä joka vuosi USA:ssa



Kuva 1.4. Six Sigma-prosessien ja tavallisten prosessien ero. Yläkuvassa esitetään tavanomaisten tuotantoprosessien laatutaso ja alakuvassa Six Sigma-prosessin laatutaso (6 keskihajontaa). (LSL=Lower specification limit, USL=Upper specification limit).

Sigma taso	Virheiden määrä	Aikana vuosisadassa	DPMO
1	170 väärin kirjoitettua sanaa joka sivulla yhdessä kirjassa	31,5 vuotta	697700
2	25 väärin kirjoitettua sanaa joka sivulla yhdessä kirjassa	4,5 v	308700
3	1,5 väärin kirjoitettua sanaa joka sivulla yhdessä kirjassa	3,5 kk	64810
4	1 väärin kirjoitettu sana noin 30 kokonaista sivua kohti	2,5 pv	6210
5	1 väärin kirjoitettu sana tietosanakirjassa	30 min	233
6	1 väärin kirjoitettu sana pienen kirjaston koko kirjamäärässä	6 sek	3,4*)
7	1 väärin kirjoitettu sana usean laajan kirjaston koko kirjamäärässä	silmänräpäys	

*) 1,5 sigman siirtymällä

Kuva 1.5. Prosessin kyvykkyys sigmatasoina ja viallisten osuus DPMO:na (DPMO = viallisten määrä miljoonaa mahdollisuutta kohti) kirjan tekstivirheiden osuuksilla havainnollistettuna.

Määritelmän mukaan tietty prosessi on 6 sigman suorituskyykytasossa, mikäli siinä esiintyy noin 3 virheellistä tuotetta tai tapahtumaa miljoonaa mahdollisuutta kohden (esimerkiksi lentoliikenteen nousu ja laskeutumisprosessi). Six-sigma laatumenetelmä korostaa jatkuvaa tiedon, laadun ja suorituskyyvyn parannusta ja vaihtelun pienentämistä kohti 0-virhettä. Kohti 0-virhettä tarkoittaa nollavirhettä suhteessa asiakasvaatimukseen (ei absoluuttiseen virheettömyyteen).

2 SELVITYKSEN TAVOITTEET

Päällystetyn tiestön ylläpito pohjautuu kerättyyn kuntotietoon ja siitä tehtäviin päätöksiin. Kerätyn kuntotiedon laatu vaikuttaa suoraan päätöksen teon onnistumiseen. Virheellisistä päätöksistä voi aiheutua suuriakin kustannuksia.

Päällysteiden palvelutasomittausten prosessi voi olla laadun suhteen neljässä eri kategoriassa (taulukko 2.1). Mittausjärjestelmän täytyy olla ensin stabiili mikä tarkoittaa, että mittausjärjestelmän toistokyky ja uusittavuus ovat riittävän hyvässä kunnossa. Tällöin mittauksen vaihtelu ei sisällä enää erityisyyttä ts. systemaattista virhettä ja voidaan lähteä mittaamaan itse tuotantomittausten suorituskkyä. Tuotantomittausten suorituskky on riittävä, kun tuotannon ja kontrollin erojen vaihtelu on riittävän pientä.

Laatuneljänneksen selvittämisessä onkin selvitettävä mittausjärjestelmän toimivuus (stabiilius) ja sen jälkeen suorituskky. Suorituskvyn mittaaminen puolestaan edellyttää asiakasvaatimusten tuntemista. I neljänneksessä tilanne on pahin eikä kumpikaan asia ole kunnossa. IV neljänneksessä tilanne on paras ja molemmat osiot ovat kunnossa.

Taulukko 2.1. Mittausprosessin laadun neljä eri tilaa sekä toimintasuositus kussakin tilassa.

Mittausprosessin laadun neljä tilaa		Mittausjärjestelmän toimivuus	
		Ei kunnossa	Kunnossa
Mittausten suorituskky	Ei kunnossa	Eliminoidi vaihtelun erityisyyttä Vähennä vaihtelun yleisiä syitä	Vähennä vaihtelun yleisiä syitä
	Kunnossa	Eliminoidi vaihtelun erityisyyttä	Ideaalinen tila Seuraa tilaa

Tässä esiselvitysprojektissa on tavoitteena selvittää siten palvelutason mittaamisen suorituskkyä suhteessa asiakasvaatimuksiin paneutumalla seuraaviin kolmeen eri osa-alueeseen:

- 1) Arvioida palvelutasomittausten asiakasvaatimuksia (VOC=Voice Of the Customer). (Mikä kuntotiedon "asiakkaan" laatuvaatimus on tärkein ja määrää siten mittauksen asiakasvaatimuksen?)
- 2) Kehittää mittausjärjestelmän toimivuusanalyysiä (MSA=Measurement System Analysis). Millä kriteereillä mittausjärjestelmän voidaan todeta olevan kunnossa?
- 3) Kehittää mittauksen suorituskkyanalyysiä (PPA=Process Performance Analysis). Miten tuotantomittausprosessi selviytyy sille asetetuista vaatimuksista?

Tavoitteen saavuttamisessa paneudutaan Six Sigma -filosofiaan ja käytetään siihen liittyviä työvälineitä. Kiinnostuksen kohteena on erityisesti se, miten vanhan mittaustekniikan ja uuden mittaustekniikan mukainen mittauksen laatu riittää asiakkaan tarpeisiin.

Selvityksessä edetään käymällä läpi suorituskykylaskennan ja toleranssin-määrittämisen teorioita, määrittämällä kuntotiedon (URA ja IRI) laadulle asiakasvaatimuksia päätöksentekoketjun eri tasoilta sekä määrittämällä PTM-mittauksille edellisiin pohjautuvat suorituskyvyn arvot.

Six Sigma -välineistöön liittyviä menetelmiä käytetään tässä selvityksessä mm. seuraavasti:

- asiakastarpeiden selvittäminen ja huomiointi laatuvaatimusten muodostamisessa
- mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi teollisuudessa käytettyjä SPC-menetelmiä käyttäen
- mittaustuotannon suorituskyvyn mittaaminen Sigmoissa suhteessa asiakasvaatimukseen

On silti todettava, että itse Six Sigma-välineitä on jopa 200 ja tässä selvityksessä tehdään vain pieni raapaisu ko. välineistön hallintaan.

Edelleen on todettava, että PTM-mittausten laatuun liittyy paitsi itse mittauspalvelun sujumiseen ja ajoittumiseen liittyviä laatutekijöitä, myös lukuisa joukko muita kuntomuuttujia, joihin ei tässä yhteydessä puututa. Tässä keskitytään 100 metritason URA- ja IRI-tietojen laatuun. Hanketason 10 - 20 metrin tietojen laatuun ei puututa.

3 ASIAKASVAATIMUSTEN SUUNNITTELU

3.1 Menetelmät

Asiakasvaatimuksia voidaan lähestyä monella eri tavalla. Perinteisesti niitä on lähestytty seuraamalla asiakastyytyväisyyttä tai esim. valitusten määrää. Tämä on kuitenkin hyvän suunnittelun kannalta kovin reaktiivinen tapa toimia tilanteessa, jossa jokin on mennyt pieleen mahdollisesti jo pitemmän aikaa. Proaktiiviset menetelmät ovat nousemassa kuitenkin tälläkin alueella esiin. Näihin voidaan lukea esim. haastattelut ja erilaiset asiakkaiden tarpeita koskevat analyysit ja selvitykset. Asiakkaita voidaan segmentoida ja lähestyä kunkin tarpeita erikseen ja sitä kautta päästä pureutumaan tarpeisiin tarkemmin.

Asiakkaan ääntä voidaan lähteä proaktiivisesti etsimään selvittämällä mikä tuotteessa on kriittistä asiakkaan toiminnan onnistumisen kannalta. Palvelutasomittausten kohdalla voidaan kysyä, mikä esim. uramittauksissa on tärkeintä asiakkaalle:

- Miten mittautulosten toimittamisaikataulu suhtautuu siihen miten tietoa tullaan käyttämään (vrt. kevään urapaikkausohjelmat, toiminnan toteutumisen tuloksenmittaus vuoden aikana, seuraavan vuoden toiminnan suunnittelu/ohjelmointi jne...)
- Miten uramittauksen tarkkuus vaikuttaa päällystyskohteiden valintaan, ajoitukseen ja rankkuuteen?
- Miten uramittauksen tarkkuus vaikuttaa kuntovastuu-urakan toimitusvaatimusten määrittämiseen ja laatuvaatimuksiin?
- Miten uramittauksen tarkkuus vaikuttaa urakan laadun täyttymiseen?
- Miten uramittauksen tarkkuus vaikuttaa urautumisen hallintaan ja uria koskevien ennustemallien laadintaan?
- Miten uramittauksen tarkkuus vaikuttaa tutkimushankkeen rakennekokeilun tutkimustuloksiin?

Mikä tiedon käyttäjien "asiakassegmentti" tai käyttötilanne määrää uramittauksen kriittisimmän laatuvaatimuksen? Laatuvaatimus on yhtä kuin toleranssi. Toleranssin määrittämiseen on olemassa useita eri menetelmiä, jotka voidaan karkeasti jakaa kahteen osaan niiden perusmenetelmän mukaan:

Toleranssin suunnittelun tuotantolähtöisiä menetelmiä ovat muun muassa:

- Perinteinen
- Worst Case -menetelmä
- Lineaarinen menetelmä
- Epälineaarinen menetelmä

Asiakaspohjaisia toleranssin suunnittelun menetelmiä ovat muun muassa:

- COPQ tai tilannesimulointi
- Taguchi Quality Loss-funktio

Liitteessä 1 on esitetty perinteisen toleranssin suunnittelun, COPQ:n ja Taguchin Quality Loss -function teoriapohjaa lyhyesti.

Tässä selvityksessä on valittu asiakasspesifikaatiot noudattamaan PTM-urakkasopimuksessa esitettyjen laatuvaatimusten 95 prosenttipisteen lukuarvoja. Kustannuslähtöisen menetelmän soveltaminen tapahtuu simuloimalla ja on peräisin työraportista "Virtala Päälysteiden kuntotiedon asiakasspesifikaatiot. 2004".

3.2 Tuotantolähtöinen tolerointi

Tuotantolähtöisessä toleroinnissa otetaan laatuvaatimus yksinkertaisesti tuottajan laaduntuottamisen mahdollisuuksista lähtien. Laatuvaatimus on siten mittausjärjestelmän toistettavuuden taso + tuottajan haluama laatumarginaali eli tuotanto- ja kontrollimittauksen eron maksimi. PTM-urakassa nämä esitettiin tarjouksessa ja ovat seuraavan taulukon mukaiset:

Taulukko 1. PTM-urakan laatuvaatimukset URAlle ja IRille 2003-2007.

	50 % piste	95 % piste	erojen hajonta
URA-mittaus	1,0 mm	1,5 mm	0,75 mm*
IRI-mittaus	0,25 mm/m	0,40 mm/m	0,2 mm/m*
*) laskettu 95 %:n arvosta jakamalla se 2:lla			

Laatuvaatimuksia käsitellään tässä selvityksessä lähinnä joko 95 %:n pisteinä tai sitten erojen hajontana. Tuotantolähtöinen toleranssi on siten uramittauksille $\pm 1,5$ mm ja IRI:lle $\pm 0,5$ mm/m. Nämä ovat myöhemmin tässä selvityksessä tehtyjen suorituskykylaskelmien toleranssit tuotannon ja kontrollimittauksen eron itseisarvolle.

Tämän toleranssin määritysmenetelmän etuna on, että se on järkevässä suhteessa mittauksen laaduntuottokykyyn. Haittana on taas se, ettei sillä ole mitään kytkeä asiakkaan tarpeisiin.

3.3 Asiakslähtöinen tolerointi

Kuntotietoon liittyviä asiakasvaatimuksia voidaan lähestyä monesta eri suunnasta ja vaatimustaso todennäköisesti riippuu huomattavasti siitä mistä päin niitä muodostetaan. Tärkeimmät sisäiset "asiakastahot" kuntotiedon laadulle voidaan listata seuraavasti:

- ohjelmointi. Kuinka tarkkaa kuntotiedon tulee olla, jotta kohteiden ajoitus ja kohdistus osuu riittävän tarkasti? Toisinpäin käännettynä kuinka paljon kuntotiedon nykyisestä laatutasosta aiheutuu ohjelmointitasolla virhepäätöksiä vääränä ajoituksena ja vääräntasoisina toimenpiteinä ja kuinka paljon niistä aiheutuu virhekustannuksia? Ongelma on monimutkainen selvitettävä, koska päällystysohjelman muodostamisessa käytetään useita kuntomuuttujia ja niiden kaikkien virhelähteet on hallittava yhtäaikaaisesti. Eräs käyttökelpoisimmista

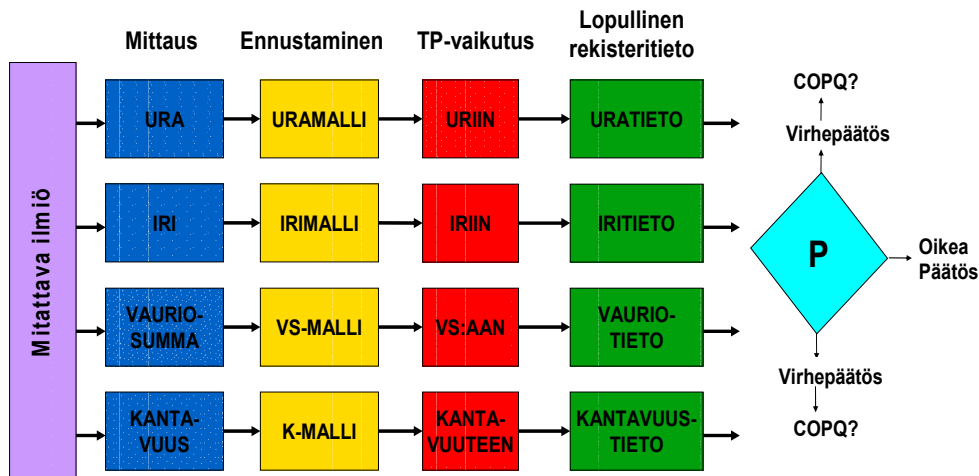
menetelmistä on laatukustannusanalyysi, joka on esitetty lähteessä "Virtala, 2004".

- tulosohjaus. Kuinka paljon kuntotiedon tarkkuus vaikuttaa tulostavoitteen määrittämistarkkuuteen? Kuinka tarkasti tulostavoitteen toteutumisen mittaaminen kuntotiedon nykytarkkuudella onnistuu? Millä tarkkuudella tieverkon ylläpitoa voidaan tulostavoitteilla ohjata? Kuinka tarkkaa kuntotiedon tulisi tulosohjauksen tarpeista lähtien olla? Asian selvittämisen monimutkaisuus on edellisen tapauksen kanssa samaa suuruusluokkaa ja sitä on selvitetty mm. lähteessä "Äijö, 2004".
- Ylläpidon hankintakäytännöt. Urakoissa siirrytään toimivuusvaatimuksiin, joilla toteutunut laatu mitataan lopputuotteesta takuuajan jälkeen tai palvelutasona kuntovastuu-urakan aikana. Sekä tilaajan että tuottajan on hallittava se riskiasetelma, joka vaikuttaa toimivuusvaatimuksen asettamisen kireyteen ja toisaalta toimivuusvaatimuksen täyttämiseen ja sen tulevaan hintaan. Tien käyttäytyminen on hallittava toimivuusvaatimusten tunnusluvulla riittävän tarkasti, mikä asettaa omat vaatimuksensa myös mitattavan kuntotiedon tarkkuuteen.
- ennustemallintaminen. Tieverkon kuntotilan selvittämisessä joudutaan aina tietty osa ennustamaan, koska 100 prosenttiseen edustavuuteen ei kannata mittaamisessa mennä. Ennusteiden laatimisessa on saatava selville miten tien kunto kehittyy yhden vuoden aikana ja mitkä selittävät tekijät siihen kehitykseen liittyvät. Ennustemallien laatimisen lähtötiedoiksi tehtävien kuntomittausten tarkkuuden tulee olla parempaa kuin mitä on itse selvitettävä asia, eli kuntokehitys. Toisin sanoen yhden vuoden aikana mittaamisella on saatava selville miten kunto on vuoden aikana kehittynyt. Liian epätarkalla mittauksella se ei selviä.

3.3.1 Asiakasvaatimukset ohjelmointitasolta

Ohjelmointitason päätöksentekotilanteesta tulevia virhekustannuksia ja niistä johdettavia laatuvaatimuksia on selvitetty tarkemmin lähteessä "Virtala, 2004". Siinä on tutkittu kuntotiedon virhelähteitä ja niistä aiheutuvia virhepäätöksiä kaikkia kuntomuuttujia käsitellen. Tässä yhteydessä ei puututa selvityksen yksityiskohtiin sen tarkemmin, ainoastaan todetaan sen selvittämisen perusperiaatteet ja johtopäätökset.

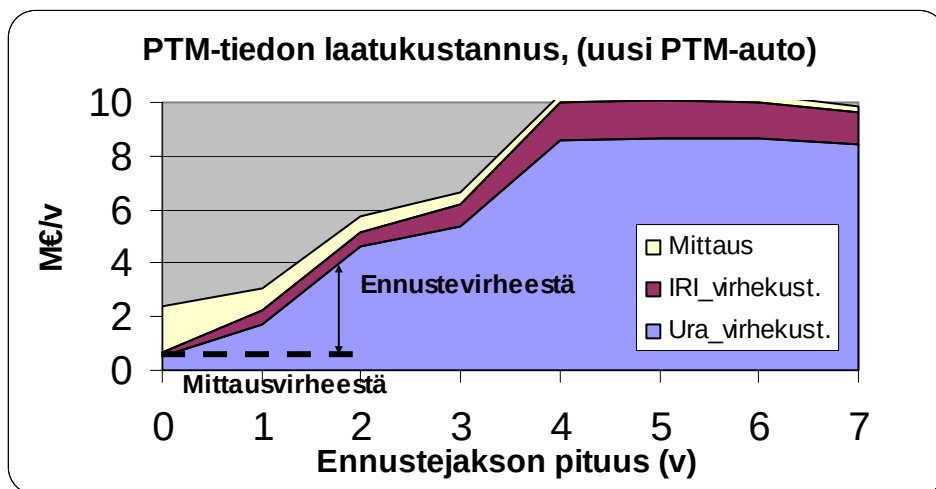
Perusperiaatetta selventää kuva 3.1, jossa esitetään "tietoputket" mitattavasta ilmiöstä päätöksentekotilanteeseen sekä niissä olevat virhelähteet.



Kuva 3.1. Kuntotiedon virhelähteiden yhteys virhepäätöskustannusiin. Mainittujen lisäksi virhelähteenä ovat toimenpiteiden kirjauspuutteet, joita ei ole tutkittu lainkaan.

Ohjelmointitason päätöstilanteiden kannalta näyttäisi siltä, ettei pääasiallisin syy laatupuutekustannusten syntyyn ole mittausvirhe vaan ennustevirhe (ks. kuva 3.2). Ennustevirhe kasvaa ennustejakson kasvaessa jopa niin nopeasti, ettei mittaustaloutta voida edes optimoida. Ohjelmointitason laatukustannusanalyysin pääasialliset tulokset voidaan siis kiteyttää seuraavilla toteamuksilla:

- laatukustannukset minimoituvat sillä, että mittauksen edustavuus nostettaisiin 100 %:iin eikä ennustemalleja käytettäisi lainkaan. Tämä tarkoittaisi mittauskierron kasvattamista täyteen mittaustiheyteen, kerran vuodessa.
- tärkein laadunparannushanke olisi kehittää ennustemallien tarkkuutta, jonka tulisi parantua merkittävästi ennen kuin päästään a) optimoimaan mittaustaloutta ja b) kiinni siihen mitä asiakasvaatimuksia ohjelmointitasolta tulisi mittaustarkkuudelle asettaa.
- Ensisijainen mallienparannuskohde on uramallien parantaminen (asiaa käsitellään VOH-tutkimusohjelman osaprojektissa 2.2).
- ohjelmointitason laatupuutekustannusten optimointi ja mahdolliset tarkkuusvaatimukset mittauksen tarkkuudelle voidaan selvittää vasta sitten, kun ennustemallit on ensin uusittu.
- virhesimulointi on eräs Six Sigma-suunnittelun menetelmistä ja siten myös suositeltava menetelmä tietopalvelun tuottajien työkalupakkiin.



Kuva 3.2. Ura- ja tasaisuustiedon laatukustannukset ennustejakson funktiona. Mittauskierrolla ei voi optimoida laatukustannuksia, koska kustannusten minimohtaa ei ole (tai se on täysmittausten kohdalla).

Virhepäättökustannusten simulointi paljastaa monia muitakin mielenkiintoisia yksityiskohtia siitä, missä osassa ja mihin osaverkkoon pahimmat laatu- puutteet "tietoputkessa" kohdistuvat. Nämä löydökset ovat hyödyllisiä ohjelmointitason päätöstilanteen tietopohjan laadunparannushankkeita muodostettaessa.

3.3.2 Asiakasvaatimukset tulosohejaustasolta

Tulosohejaustasolta ei pystytä tuottamaan varsinaista kustannuspohjaista virhekustannuslaskelmaa ja sen mukaisia laatuvaatimuksia vaan enemmänkin tuloksen mittaamisen luotettavuustasoon liittyviä vaatimuksia. Ts. kiinnostuksen kohteena on määrittää kuinka tarkasti tavoitteen mukainen lopputulos on ylipäättään mitattavissa käytössä olevilla tiedoilla ja minkälaisia rajoituksia tiedon laatu asettaa tuloksen arviointiin. Ja edelleen toisinpäin minkälaisia laatuvaatimuksia tulosohejauksen tuloksen luotettava mittaaminen asettaa tiedon laadulle. Tätä asiaa selvitetään raportissa (Äijö, 2004).

Selvityksen tulokset eivät ole tätä kirjoitettaessa vielä valmistuneet, mutta ennakoarvio on, että vaatimukset kohdistuvat ohjelmointitason tapaan rekisteritiedon laatuun.

3.3.3 Asiakasvaatimukset hankinnan tarpeista

Ylläpitotuotteiden hankinnassa kuntotiedoilla on huomattava merkitys, koska kuntotietona mitattavia muuttujia käytetään sekä lähtötietoina toimenpiteiden suunnittelussa, joka sisältyy urakkaan, että toteutuneen laadun mittaamiseen. Erityisesti kuntotiedon laatu korostuu pitkäkestoisessa kuntovastuuurakassa, jossa seurataan urakan kohteena olevan tiestön kuntomuutosta toteutuneen laadun mittarina. Kuntotieto pitää sisällään siten merkittävän riskinlähteen, joka tulee vaikuttamaan siihen, kuinka hyvin urakoitsija tulee taloudellisesti selviytymään tarjoamastaan ylläpitourakasta ja toisaalta kuinka paljon tienpitäjä joutuu urakan voimassaoloaikana maksamaan kuntovas-

määritetty. Vastaavia virhepäätös- tai riskikustannuksia on siten tässä vaiheessa vaikea määrittää.

Ongelmaa voidaan kuitenkin yrittää lähestyä karkeasti tarjoajan näkökulmasta ja laskea minkälaista epävarmuutta kuntotiedon laatu puutteet aiheuttavat tarjoajan laskennallisiin kuntovastuu-urakan vuosikustannuksiin. Ja toisinpäin käännettynä voidaan arvioida kuinka varmalla pohjalla kuntovastuu-urakan vuosikustannuslaskelman tulisi kohtuullisen riskin tilanteessa olla ja mitä laatuvaatimuksia se asettaa tietojen laadulle.

Vilkasliikenteisten teiden pääasiallinen ylläpitotoimenpiteen syy on pinnan urautuminen ja sen takia tässä yhteydessä kannattaa kiinnittää päähuomio uran tiedon laatuun.

Hankinnan tarpeista lähteviä laatuvaatimuksia kuntotiedon tarkkuudelle ei ole kovin kattavasti määritetty. Asiaa on lähestytty riskianalyysin keinoin lähteessä (Virtala, 2004). Siinä on tutkittu mittausvirheiden vaikutusta ylläpitourakan katteen tunnuslukuihin simuloimalla. Analyysissä on oletettu, että ylläpitourakan tarjouslaskennassa riittää 100 metritason kuntotieto.

Katteen tunnuslukuina on käytetty negatiivisen katteen todennäköisyyttä sekä katteen vaihtelualuetta, jota kuvaa sen hajonnan suhde keskiarvoon.

Tunnuslukujen kriteereinä on käytetty:

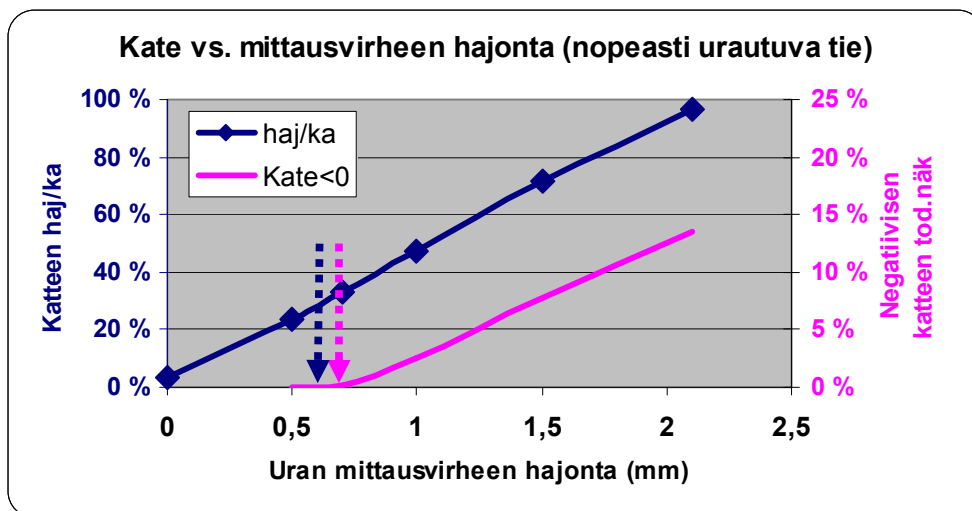
- Negatiivisen katteen mittausvirheestä johtuvan todennäköisyyden tulisi olla lähes nolla
- ja katteen hajonnan suhde sen keskiarvoon tulisi olla enintään 30 %.

Näiden perusteella nopeasti urautuvan vilkasliikenteisen tien tapauksessa uran mittaustarkkuuden hajonnan tulisi olla kuvan 3.3 mukaisesti luokkaa 0,6...0,7 mm. Tämä vastaa 95 %:n raja-arvoina 1,2...1,4 mm.

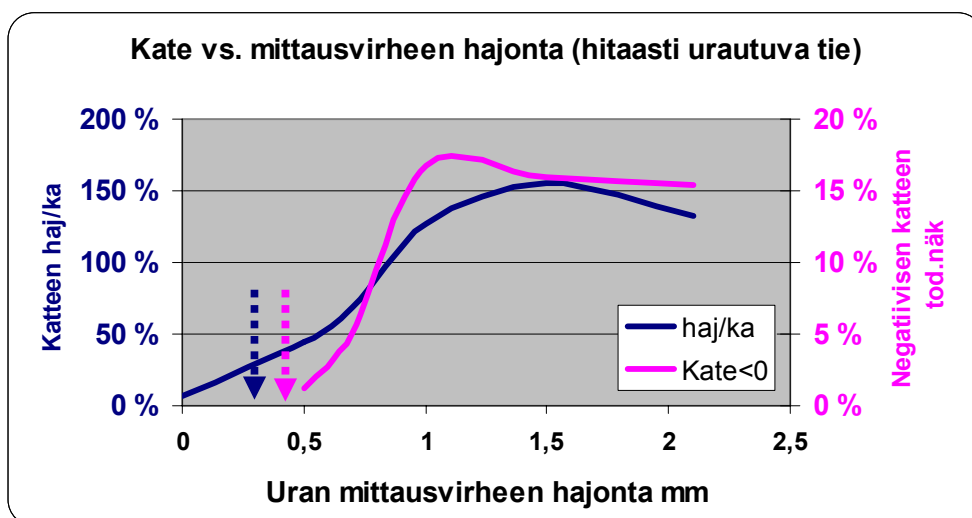
Vanhan mittaustekniikan aikana mittaustarkkuuden hajonta oli hiukan yli 2 mm, jolla negatiivisen katteen todennäköisyys olisi ollut noin 15 % ja katteen hajonnan suhde keskiarvoon lähes 100 %. Näitä tunnuslukujen tasoja ei voida tarjouslaskennan tarpeita ajatellen pitää riittävinä.

Hitaammin urautuvan tien tapauksessa negatiivisen katteen todennäköisyys lähenee nollaa kun mittaustarkkuuden hajonta on alle 0,4 mm ja katteen vaihtelun 30 %:n vaatimus täyttyy kun mittaustarkkuuden hajonta on alle 0,3 mm. 95 %:n luvuiksi muutettuna vaatimus olisi siten 0,6...0,8 mm.

Tarjouslaskennan tarkkuusvaatimuksen kannalta olisi urautumisen perustaksi mitattava uratieto pystyttävä mittaamaan vilkkailla teillä 0,7 mm:n keskihajonnalla ja keskiliikenteisillä teillä 0,4 mm:n keskihajonnalla. **95 % tarkkuusvaatimuksiksi muunnettuna edellä mainitut vaatimukset olisivat 1,4 mm ja 0,8 mm.** Kun painotetaan vilkasliikenteisten teiden urakoiden tarpeita olisi lopullinen tarkkuusvaatimus lähempänä 1,4 mm:ä.



Kuva 3.3. Uran mittausvirheen vaikutus ylläpitourakan katteen tunnuslukuihin (nopeasti urautuva tie). Positiivisen katteen todennäköisyys on riittävä, kun mittausvirheen hajonta $< 0,7$ mm. (Virtala, 2004).



Kuva 3.4. Uran mittausvirheen vaikutus ylläpitourakan katteen tunnuslukuihin (hitaasti urautuva tie). Positiivisen katteen todennäköisyys on riittävä, kun mittausvirheen hajonta $< 0,4$ mm. (Virtala, 2004).

3.3.4 Asiakasvaatimukset kuntoennusteiden mallintamisesta

Asiakasvaatimuksia lähestyttiin kysymällä mallintajilta miten tarkkaa mittaus-tiedon tulisi mallintamisen näkökulmasta olla. Kysely ei kuitenkaan tuottanut vastausta. Syynä lienee se, ettei asia ole kovin helposti selvitettävissä.

Asiaa on lähestytty lähteissä (Ruotoistenmäki, 2004) ja karkeasti myös läh-teessä (Virtala, 2004). Sekä mitatut että mallinnetut arvot sisältävät epävarmuutta, joka on suurempaa mallinnetuissa arvoissa, koska ne sisältävät mit-tausepävarmuuden sekä lisäksi mallintamisesta aiheutuvan lisäepävarmuu-den. Niissä on lähdetty yksinkertaisesti vertaamaan mittaustarkkuutta ja

vuosimuutosta keskenään ja päättelemään niistä tarkkuuden riittäminen. Vertaamalla hajontoja keskenään voidaan todeta, että mittausten hajonnan tulee olla pienempi kuin vuosimuutos, jotta mittaamisella ylipäättään pystytäisiin selvittämään, kuinka suuri ennustemalleilla arvioitava vuosimuutos on. Vuosimuutos on se informaatio, joka pitäisi pystyä selvittämään ja mittauksen epätarkkuus on sitä kohinaa, jonka takaa vuosimuutoksen tulisi näkyä. Jos kohina on liian suurta, ei todellinen informaatio näy ja mallintaminen pääasiassa onkin vain pelkkää kohinaa.

Tasaisuuden vuosimuutoksen keskiarvo vaihtelee liikennemääräluokittain $\pm 0,1$ alueella ollen keskimäärin melkein nolla. Vuosimuutoksen hajonnat vaihtelevat liikennemääräluokittain ollen keskimäärin 0,25 mm/m. 95 % muutoksesta on kahden hajonnan päässä eli liikennemääräluokittain 0,32...0,76 mm/m. 95 % IRI:n mittausvirheistä tulisi siten olla sitä pienempiä.

Taulukko 2. IRI:n vuosimuutos liikennemääräluokittain (2003-2004 mittauksista).

Vuosimuutoksen	Liikennemääräluokka				Keskimäärin
	>6000	1500-6000	350-1500	<350	
- keskiarvo	0,06	0,01	-0,018	-0,08	-0,006
- 1*hajonta = 68%	0,16	0,19	0,28	0,38	0,25
- 2*hajonta = 95%	0,32	0,38	0,56	0,76	0,50
Asiakasvaatimus =	minimi $\pm 0,3$ mm/m tai keskiarvo $\pm 0,5$ mm/m				

Vuosimuutoksen selville saamisen kannalta tulisi IRI-mittauksen tarkkuuden olla sellainen, että tuotanto- ja kontrollimittausten erojen hajonta olisi enintään 0,25 mm/m ja laatuikäyrän 95 %:n raja-arvo kaksi kertaa se eli enintään 0,50 mm/m. PTM-urakan laatuvaatimuksissa käytetään 95 % raja-arvona 0,4 mm/m, joka tästä näkökulmasta olisi tavallaan liian tiukka.

Urautumisen keskiarvo vaihtelee 0,7...1,5 mm/v ollen keskimäärin 1,2 mm/v. Urautumisen hajonta vaihtelee liikennemääräluokittain välillä 1,2...1,5 mm/v ollen keskimäärin 1,3 mm/v.

95 % vuosimuutoksista on keskimäärin alle 2,7 mm/v. Samalla periaatteella vuosimuutoksen edellyttämä vaatimus uran mittaustarkkuudelle olisi siten 2,7 mm. PTM-urakassa 95 %:n raja-arvona on 1,5 mm, joka on tästä näkökulmasta erittäin tiukka.

Taulukko 3. URA:n vuosimuutos liikennemääräluokittain (2003-2004 mittauksista).

Vuosimuutoksen	Liikennemääräluokka				Keskimäärin
	>6000	1500-6000	350-1500	<350	
- keskiarvo	1,5	1,2	0,7	-	1,2
- 1*hajonta = 68%	1,5	1,3	1,2	-	1,3
- 2*hajonta = 95%	3,0	2,6	2,4	-	2,7
Asiakasvaatimus =	minimi $\pm 2,4$ mm tai keskiarvo $\pm 2,7$ mm				

3.4 Yhteenveto asiakastarpeista

Yhteenveto asiakastarpeista ura- ja IRI-mittauksen tarkkuudelle on esitetty seuraavassa taulukossa. Uramittauksille tulee tarkin laatuvaatimus hankinnan tarpeista käsin, jossa tarjouslaskennan kannalta pitäisi mittaustarkkuuden olla hajonnalla kuvattuna alle 0,7 mm ja laatukäyrän 95 %-pisteellä kuvattuna alle 1,4 mm. Uran vuosimuutoksen selvittämiseen näyttää riittävän huonompikin tarkkuus.

Tasaisuuden osalta tiukin vaatimus tulee ennustemallinnuksen kannalta. Mittaustarkkuuden tulisi olla hajonnalla kuvattuna parempi kuin 0,25 mm/m tai laatukäyrällä kuvattuna alle 0,5 mm/m. Hankinnan tarpeisiin nähden ei tarkkuusvaatimusta analysoitu.

Ohjelmointitason laatuvaatimusanalyysin kannalta on tärkeintä, että kokonaislaatu on riittävää. Kokonaislaadussa suurin puute on ennustemallien tarkkuudessa, ja mittaustiedon laatu jää toisarvoiseksi. Sama pätee myös tulosohjauksen tarkkuusvaatimukseen. Tulosohjauksen tarkkuuteen vaikuttaa lisäksi myös mittausten edustavuudet ja vaihtelut niissä, koska mittauksilla eliminoidaan ennustemallien epätarkkuutta.

Taulukko 4. URA- ja IRI-mittausten asiakasvaatimukset eri asiakassegmenttien kannalta määritettynä

Asiakassegmentti.	URA		IRI	
	hajonta	95 %	hajonta	95 %
Tuotantolähtöinen - toistettavuus+marginaali	0,75 mm	1,5 mm	0,2 mm/m	0,4 mm/m
Ohjelmointi - mittaustarkkuus - kierto - ennustetarkkuus - tp-vaikutus	? ? parempi parempi	? ? parempi parempi	? ? parempi parempi	? ? parempi parempi
Tulosohjaus - mittaustarkkuus - kierto - ennustetarkkuus - tp-vaikutus	? parempi parempi parempi	? parempi parempi parempi	? parempi parempi parempi	? parempi parempi parempi
Ennustemallinnus - vuosimuutoksen mittaustarkkuus	1,3 mm	2,7 mm	0,25 mm/m	0,5 mm/m
Hankinta - tarjouslaskenta - laadunmittaus	0,7 mm	1,4 mm		

4 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOIMIVUUS

4.1 Menetelmät

Ennen kuin voidaan laskea mittausprosessin suorituskyky, on varmistuttava, että mittauksesta aiheutuva vaihtelu on tarpeeksi pientä ja seuraa vain yleisistä syistä. Ts. täytyy saada varmuus, että mittaus itsessään on hallinnassa. Tämä voidaan tehdä Gage R&R-testillä, joka on yleisesti käytetty analysointimenetelmä teollisissa prosesseissa. Mittausjärjestelmällä on ainakin seuraavia virhelähteitä, jotka täytyy hallita:

- Kohdistuvuus (accuracy)
- Lineaarisuus (linearity)
- Toistettavuus (repeatability)
- Yhdenmukaisuus (reproducibility)
- Pysyvyys (stability).

Kohdistuvuudella tarkoitetaan mittaustuloksen poikkeamaa tosimitasta (true-ness, accuracy, precision). Tosimitalla tarkoitetaan tässä jonkin tarkan ja luotettavaksi tiedetyn mittalaitteen tai mittaustavan antamaa vastaavaa tulosta. Ongelman tiestömittausten tosimittaa ajatellen muodostaa se, että virallista referenssimittaustapaa ei ole olemassa. Suomen rekisterimittauksissa käytettävien laitteiden (Laser-RST-laitteet) referenssilaitteina on käytetty poikkiprofiilille Ruotsin VTI:n Volvo TVP:tä ja pituusprofiilille PRIMALia.

Lineaarisuudella tarkoitetaan kohdistuksen muutosta mittavälineen mittausalueella. Lineaarisuuspuutetta on esim. se, että kohdistuvuus on pienillä urasyvyyden arvoilla eri kuin suurilla urasyvyyden arvoilla. Tällä on merkitystä mm. silloin, kun valitaan testimittauskohteiden kuntoskaalaa ja tulkitaan testimittauksilla saatuja tuloksia.

Toistettavuus kuvaa sitä hajontaa, joka syntyy tuloksiin saman mittaaajan mitattaessa saman kohteen samalla mittalaitteella samoissa olosuhteissa useam-paan kertaan.

Yhdenmukaisuus (uusittavuus) kuvaa sitä hajontaa, joka syntyy mitattaessa eri mittalaitteilla samoja kohteita samoissa olosuhteissa.

Pysyvyys kuvaa mittaustulosten sitä hajontaa, joka todetaan verrattaessa samalla mittavälineellä samasta kohteesta pitemmällä aikavälillä otettuja mittaustuloksia (edellyttäen, ettei itse prosessin vaihtelu ehdi vaikuttaa siihen). Pysyvyyden tasosta tulisi huolehtia siksi, että varmistutaan laitteen mittauskyvystä mittauskauden alusta sen loppuun saakka, eikä tehdä laadultaan puutteellisia mittauksia turhaan.

Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin määrittäminen edellyttää, että mittausperiaate ja sen kohdistuvuus ovat kunnossa. Itse toimivuusanalyysi sisältää pääasiassa komponentit toistettavuus ja yhdenmukaisuus. Nämä kaksi asiaa on oltava kunnossa, jotta mittausjärjestelmän voidaan sanoa olevan kunnossa. Mittausjärjestelmän toimivuutta on teollisuuden prosesseissa mi-

tattu ns. gageRR-testillä, joka huomioi sekä toistettavuuden että yhdenmukaisuuden.

GageRR-testissä lasketaan mittausepävarmuuden osuutta suhteessa joko toleransseihin tai kokonaisvaihteluun. Sen määrittämisessä käytetään yleensä kahta menetelmää, jotka ovat Xbar-menetelmä ja varianssikomponentti-menetelmä. Kriteerinä mittausjärjestelmän toimivuudelle on, että mittausepävarmuus ei saa olla tiettyä raja-arvoa suurempi suhteessa toleransseihin (tai kokonaisvaihteluun). GageRR-menetelmä erottelee mittautapahtuman toistettavuuden ja uusittavuuden. Niihin liittyviä nyrkkisääntöjä ovat:

Jos toistettavuusvirhe on suuri verrattuna uusittavuusvirheeseen, niin

- mittauslaite kaipaa huoltoa
- mittauslaite täytyy tehdä "tukevammaksi"
- mittauspaikkaa täytyy parantaa
- mitatuissa osissa suurta sisäistä hajontaa

Jos uusittavuusvirhe on suuri verrattuna toistettavuusvirheeseen, niin

- mittaajia on syytä kouluttaa
- mittausasteikon luettavuus voi olla huono
- ohjeistoa parannettava -->yhdenmukaisuutta lisää

Tuotteelle, palvelulle tai tapahtumaprosessille on toimivuusanalyysissä seuraavanlaiset raja-arvot:

Taulukko. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin arviointi. (Barrentine, 1991)

%RR	Mittausprosessin toimivuustulkinta
< 10 %	on erinomaisesti hallinnassa
>10 % ... 20 %	on luotettavasti hallinnassa
>20 % ... 30 %	on hyväksyttävissä, mutta lähellä raja-arvoa
>30 %	on hallitsematon
%RR=100*mittausepävarmuus suhteessa kokonaisvaihteluun tai toleranssiin.	

Suorituskykylaskenta edellyttää siis, että gage RR% on enintään 30 % kokonaisvaihtelusta mutta mielellään enintään 10 % siitä. Tämä mittausjärjestelmäanalyysi on tuotteistettu ISO-standardissa ja sen laskeminen on helppo tehdä kaupallisilla sovellutuksilla, joista tässä selvityksessä on käytetty SPC_XL-sovellusta.

Laskennan lähtötietoina tarvitaan kustakin mittauskohteesta vähintään kaksi mittauskertaa per mittausyksikkö (=mies+auto). Toimivuusanalyysin tulokset tulevat SPC_XL:stä lähes suoraan kun siihen annetaan mittausparien tulokset sarakkeina eikä analyysin teko edellytä mitään laskentakaavojen tuntemista. Mittausprosessin toimivuusanalyysin laskennan teoriaa on käsitelty tarkemmin liitteessä 2.

4.2 Aineisto

Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin (MSA) lähtötietoina ovat ennen mitauskautta suoritettavien vertailumittauksen toistomittauksien tulokset. Vanhan mittaustekniikan kautena (-2002) vertailumittauksissa oli 4-5 mittausautoa ja mittauskertoja oli yleensä kaksi. Uuden mittaustekniikan aikana (2003-) mittausautoja on RST:n kaikki autot, mutta tässä yhteydessä raportoidaan vain Suomessa käytettävien kolmen mittausauton tulokset. Toistomittauksia Ramböll RST:ltä on yleensä kolme (lukuun ottamatta vuotta 2003, jolloin oli käytettävissä kaksi).

Suomessa vertailumittausreittien pituudet ja siten havaintojen määrät ovat olleet huomattavasti suuremmat kuin Ruotsissa. Ruotsissa on käytetty samoja testireittejä kumpanakin vuonna.

4.2.1 Uramittauksen toimivuusanalyysin lähtöaineisto

URA-mittauksen toimivuusanalyysin lähtötietojen tunnusluvut on esitetty taulukossa 7 ja mittausalueen box-plot kuvassa 4.1.

Taulukko 5. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin lähtötietojen tilastolliset perustunnusluvut uramittauksille vuosina 1999-2004.

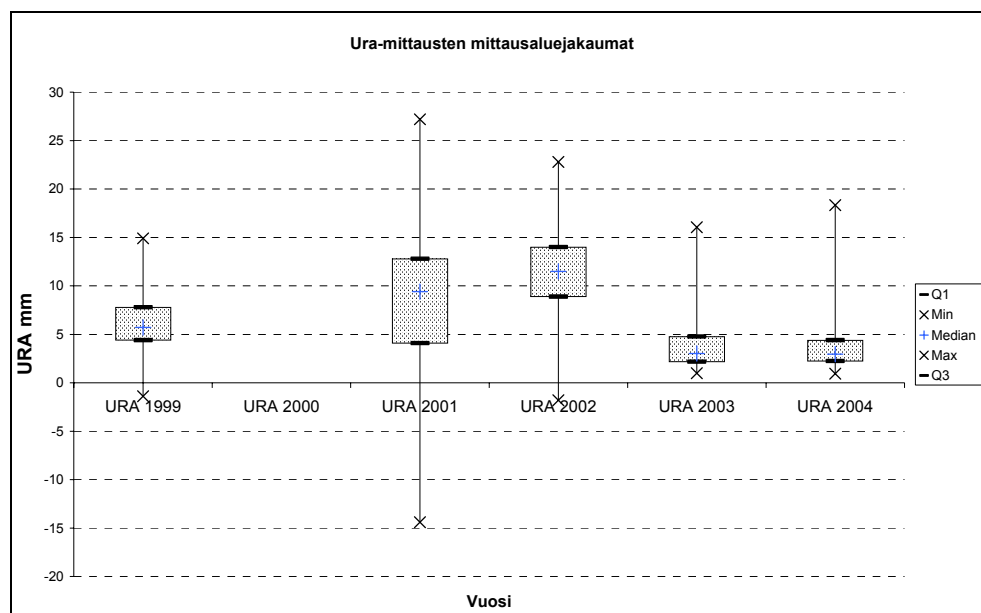
	1999	2000	2001	2002	2003	2004
N	4664	-	1036	174	150	134
Toistokerrat	2	-	2	2	2	3
Operaattorit	4	-	4	5	3	3
Keskiarvo *	0,073	-	-0,009	0,020	0,002	-0,009
Mediaani *	0,100	-	0,000	0,100	0,001	0,000
Hajonta *	0,755	-	0,525	1,310	0,093	0,454
Vaihteluväli *	8,7	-	22,6	14,8	1,0	4,7

* Kahden, samasta kohteesta tehdyn mittauksen ero

Vertailumittauksen mittauskohteet ovat vaihdelleet Suomessa vanhan mittaustekniikan aikana yleensä joka vuosi ja ne ovat siten poikenneet toisistaan jonkin verran, mikä näkyy tunnuslukujen ja arvoalueiden vaihteluna. Uuden mittaustekniikan aikana Ruotsissa on käytetty joka vuosi samaa testimittausreittiä, jolloin tunnusluvut ja vaihteluväli on stabiilimpaa. Suomessa vertailumittauksen teiden kunto on sisältänyt enemmän huonokuntoisia kohteita. Jos mittauksien lineaarisuus on huono niin tällä on vaikutusta toimivuusanalyysin lopputuloksiin. Mittausreitien pituus on ollut myös Ruotsissa pienempi kuin Suomessa.

Uramittauksen box-plotissa näkyy selvästi erot laskenta-algoritmeissa uuden ja vanhan mittauskaluston välillä; vanha algoritmi tuotti myös negatiivisia urasyvyksiä. Kuvasta nähdään, että Ruotsin (2003-2004) vertailumittausreitit ovat hyväkuntoisemmilta teiltä verrattuna Suomen vastaaviin vertailumittausreitteihin. Eräs lisäpohdintaa vaativa seikka on se, että pitäisikö mittausjärjestelmän suorituskykyanalyysin mittausaineiston olla suunnilleen samaa mittausaluealuetta kuin mitä tuotantomittauksen mittausalueet ovat. Ts. pitäisikö MSA:n box-plotin näyttää samalta kuin PPA:n box-plot, joka on esitetty myöhemmin kappaleessa 5.2.1. Kun vertaa kyseisiä kuvia voi todeta, että

MSA:n box-plotin mediaaniarvo on noin 4 mm ja PPA:n vastava arvo melkein 10 mm.



Kuva 4-1. Urien vertailumittausten mittausaluejakaumat vuosina 1999-2004.

4.2.2 IRI-mittausten toimivuusanalyysin lähtöaineisto

IRI-mittausten toimivuusanalyysin lähtötietojen tunnusluvut on esitetty taulukossa 4.2 ja mittausalueen box-plot kuvassa 4.2. Vertailumittausten mittauskohteet ovat vaihdelleet Suomessa vanhan mittaustekniikan aikana yleensä joka vuosi ja ovat siten poikenneet toisistaan jonkin verran, mikä näkyy tunnuslukujen ja arvoalueiden vaihteluna. Uuden mittaustekniikan aikana Ruotsissa on käytetty joka vuosi samaa testimittausreittiä, jolloin tunnusluvut ja vaihtelualue on stabiilimpaa. Suomessa vertailumittausten teiden kunto on sisältänyt enemmän huonokuntoisia kohteita. Jos lineaarisuus (mittausvirheen tasoriippuvuus) on suuri, niin tällä on vaikutusta toimivuusanalyysin lopputuloksiin (analyysi antaa liian positiivisen kuvan mittausjärjestelmän toimivuudesta).

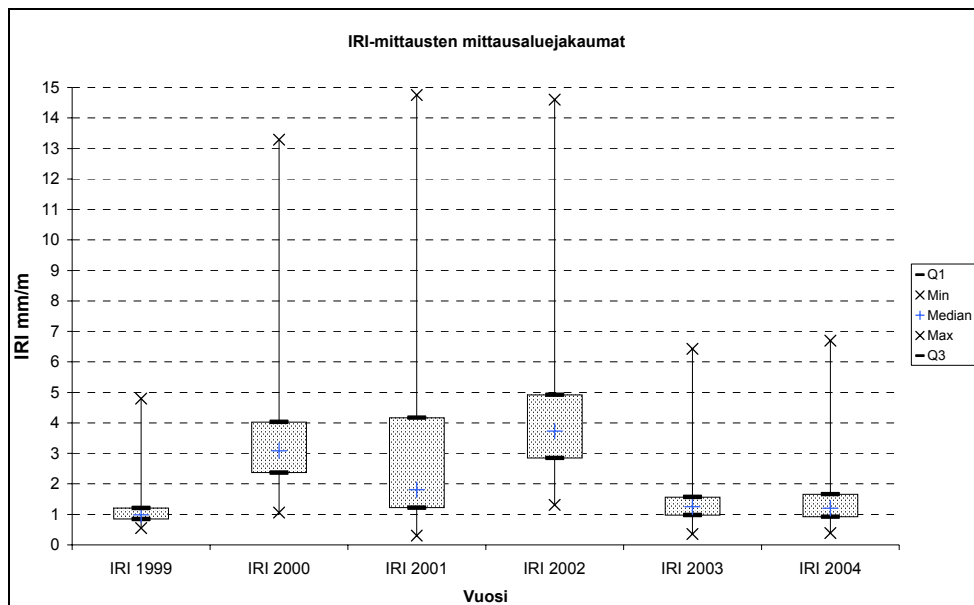
IRI-vertailumittausten osalta ainoastaan vuoden 1999 reitin vaihtelualue on samantapainen kuin mitä Ruotsissa on ollut. Vuoden 2001 vertailumittauksissa on toistomittausten erojen vaihtelualue ollut poikkeuksellisen suuri, mutta erojen keskiarvo ja hajonta silti samaa luokkaa muiden vuosien kanssa.

Taulukko 6. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin lähtötietojen tilastolliset tunnusluvut IRI-mittauksille vuosina 1999-2004.

	1999	2000	2001	2002	2003	2004
N	583	188	1036	587	150	134
Toistokerrat	2	2	2	2	2	3
Operaattorit	4	4	4	5	3	3
Keskiarvo *	-0,002	0,055	-0,009	0,003	0,002	0,004
Mediaani *	-0,000	0,040	0,000	0,001	0,001	-0,002
Hajonta *	0,086	0,367	0,525	0,389	0,093	0,132
Vaihteluväli *	1,1	6,9	22,6	7,4	1,0	3,2

* Kahden, samasta kohteesta tehdyn mittauksen ero

IRI-mittausten box-plotissa näkyy selvästi vuosien 2000-2002 mittauskohteiden muita suurempi kuntoalue. Erot vertailumittausreittien kuntoisuudessa ovat erittäin suuret ja herättävät epäilyn siitä, kuinka paljon sillä mahtaa olla vaikutusta toimivuusanalyysin tuloksiin.



Kuva 4.2. IRI:n vertailumittausten mittausaluejakaumat vuosina 1999-2004.

4.3 Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi

4.3.1 Uramittausten toimivuusanalyysi

Uramittausten toimivuusanalyysin tulokset on esitetty taulukoissa 4.3. Uramittausten kokonaismittausepävarmuus on ollut vanhan mittaustekniikan aikana noin reilut 1 mm ja uuden mittaustekniikan aikana noin millin neljännes.

Kokonaisvaihteluun nähden uramittausten epävarmuus on ollut vanhan tekniikan aikana noin 30-40 %:n tuntumassa ja uuden mittaustekniikan aikana noin 10 %. Alustaviin toleransseihin nähden vastaavat luvut ovat olleet 20-40 % ja alle 10 %. Toleranssina on käytetty samaa lukuarvoa kuin PTM-palvelusopimuksessa esitetty 95 %:n asiakasvaatimus eli 1.5 mm.

Taulukko 7. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin tulokset Xbar-menetelmällä uramittauksille vuosina 1999-2004.

Lähde	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Mittausepävarmuus (Gage R&R)	0,58	-	1,16	1,21	0,24	0,26
- Toistettavuus (mm)	0,50	-	1,13	0,81	0,22	0,26
- Yhdenmukaisuus (mm)	0,29	-	0,26	0,90	0,08	0,01
Osavaihtelu (mm)	1,63	-	4,00	2,51	2,37	2,80
Kokonaisvaihtelu (mm)	1,73	-	4,17	2,79	2,39	2,81
%R&R (kokonaisvaihtelusta) *	33,2 %	-	27,8 %	43,5 %	9,9 %	9,3 %
Toleranssi (mm)	±1,5	-	±1,5	±1,5	±1,5	±1,5
%R&R (toleranssista) *	19,2 %	-	38,5 %	40,4 %	7,9 %	8,7 %

**) %RR<10 %, 10%<%RR<30%, %RR>30%*

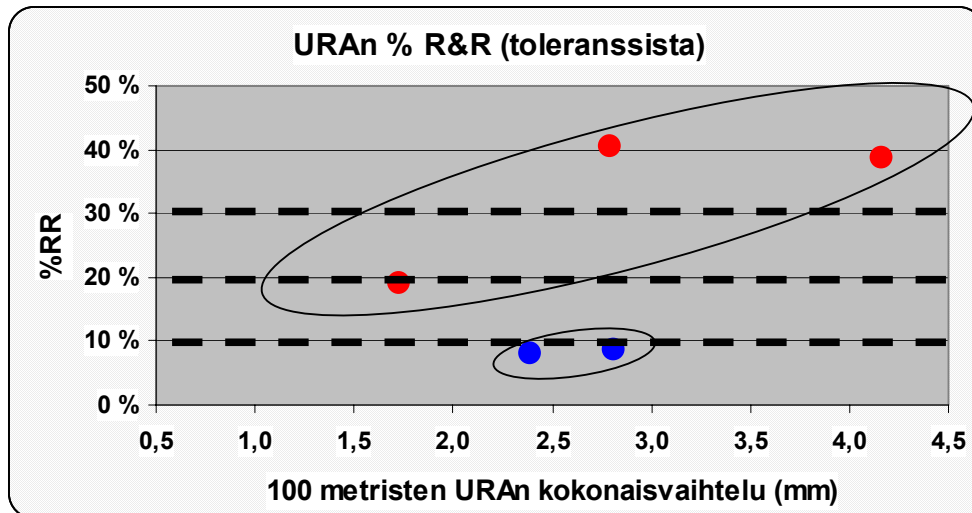
Mittausepävarmuuden muutos vanhan ja uuden mittaustekniikan välillä näkyy selvimmän kuvasta 4.2. Kokonaisvaihteluun suhteutettuna toimivuutta kuvaavan testisuureen, RR%, arvo on vanhan mittaustekniikan suhteen toimivuudeltaan kriittisellä alueella. Erityisesti vuoden 2002 arvo on erittäin huono.

Testisuure käyttäytyy eri vuosina stabiilimmin, kun mittausepävarmuus suhteutetaan vakiotoleranssien sijasta kokonaisvaihteluun. Tunnusluvun stabiiliuden takia sen laskemiseen kannattaa valita jakajaksi kokonaisvaihtelu. Tavoitteenahan mittausjärjestelmän toimivuusanalyysissä on saada selville pääasiassa se miten itse mittausjärjestelmä toimii, eikä sitä saisi sotkea mahdolliset liian suuret vaihtelut vertailumittausreitissä.

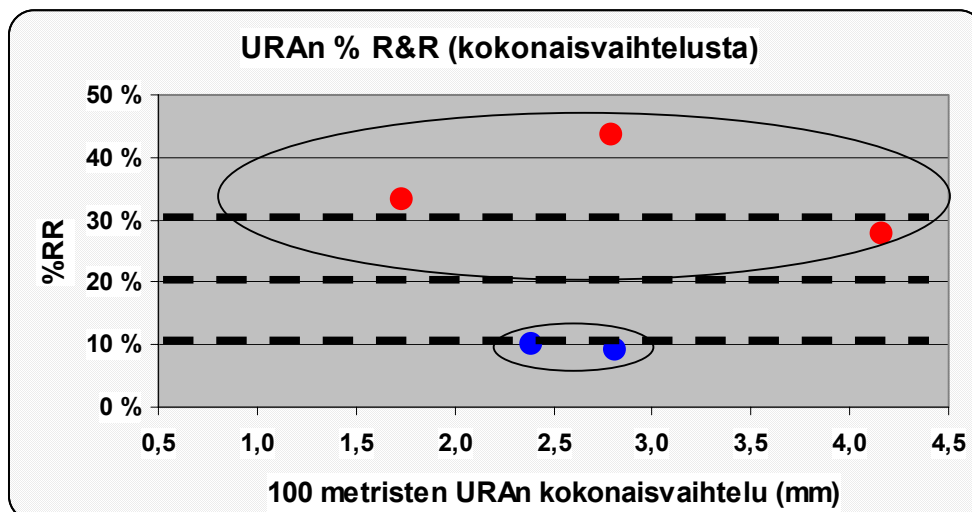
Verrattaessa toimivuusanalyysin testisuureen arvoja voidaan todeta, että uuden mittaustekniikan tuottaman testisuureiden arvot ovat hyvän toimivuuden alueella laskentatavasta riippumatta ja siten osoittavat mittausjärjestelmän olevan kunnossa. Vanhan mittaustekniikan toimivuuden suhteen voidaan todeta, että tunnusluvut pääosin ylittävän kriittisen raja-arvon, mikä tarkoittaa sitä, ettei mittausjärjestelmä ole toiminut kunnolla. Tiettyä epävarmuutta tulkintaan tulee siitä, ettei vertailumittausreittejä ole vakioitu. Kun verrataan vanhan mittaustekniikan toimivuusanalyysin tunnuslukua vuodelta 1999, jolloin kokonaisvaihtelu on lähes samansuuruista kuin uuden mittaus-

tekniikan vastaava vaihtelu, voidaan todeta, että vanhan tekniikan toimivuus on silti kyseenalaista.

Uramittausten osalta mittausjärjestelmän toimivuus ei estä suorituskäytännön suorittamista uuden tekniikan käyttöaikana. Sen sijaan vanhan tekniikan suorituskäytännön laskemisen se kyseenalaistaa.



Kuva 4.3. Uramittausten toleranssiin suhteutetun testisuureen RR% taso vuosina 1999-2004. Testisuureen taso riippuu vertailumittausreitistä ja siten kokonaisvaihtelun suuruudesta.



Kuva 4.4. Uramittausten kokonaisvaihteluun suhteutetun testisuureen RR% taso vuosina 1999-2004. Testisuureen taso ei riipu vertailumittausreitistä ja näyttää stabiilimmalta.

4.3.2 IRI-mittausten toimivuusanalyysi

IRI-mittausten toimivuusanalyysin tulokset on esitetty taulukossa 10. Kokonaismittausepävarmuus on ollut vanhan tekniikan aikana noin 0,2 mm/m ja uuden mittaustekniikan aikana vain neljännes siitä eli noin 0,05 mm/m.

Suurin osuus mittausepävarmuudesta tulee mittalaitteiden toistokyvystä. Laitteet ovat antaneet toisiinsa nähden melko yhdenmukaisia tuloksia.

Mittausepävarmuus on kokonaisvaihteluun suhteutettuna ollut vanhan mittaustekniikan aikana 15-20 % ja uuden mittaustekniikan aikana noin 5 %. Alustaviin toleranssirajoihin suhteutettuna vastaavat luvut ovat 20-25 % ja 5-6 %. Toleranssina on käytetty IRI:lle 0.5 mm/m, joka on hiukan suurempi kuin PTM-palvelusopimuksessa esitetty 95 %:n asiakasvaatimus 0.4 mm/m.

Taulukko 8. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin tulokset IRI-mittauksille Xbar-menetelmällä vuosina 1999-2004.

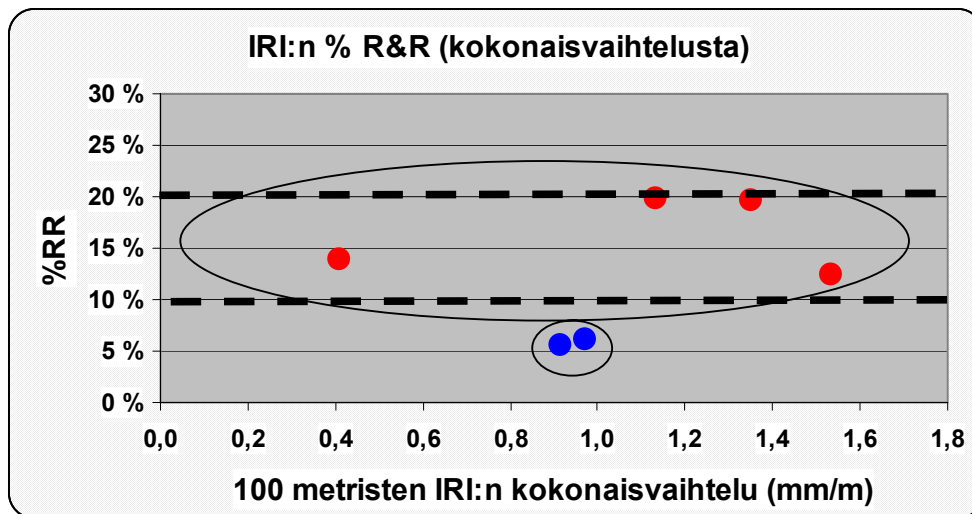
Lähde	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Mittausepävarmuus (Gage R&R)	0,06	0,27	0,19	0,23	0,05	0,06
- Toistettavuus (mm/m)	0,05	0,20	0,19	0,20	0,05	0,06
- Yhdenmukaisuus (mm/m)	0,02	0,18	0,05	0,10	0,00	0,01
Osavaihtelu (mm/m)	0,41	1,33	1,52	1,11	0,91	0,97
Kokonaisvaihtelu (mm/m)	0,41	1,35	1,63	1,13	0,92	0,97
%R&R (kokonaisvaihtelusta) *	13,9 %	19,6 %	12,5 %	20,1 %	5,6 %	6,2 %
Toleranssi (mm/m)	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5
%R&R (toleranssista) *	5,7 %	26,5 %	19,1 %	22,8 %	5,2 %	6,0 %

**) %RR<10 %, 10%<%RR<30%*

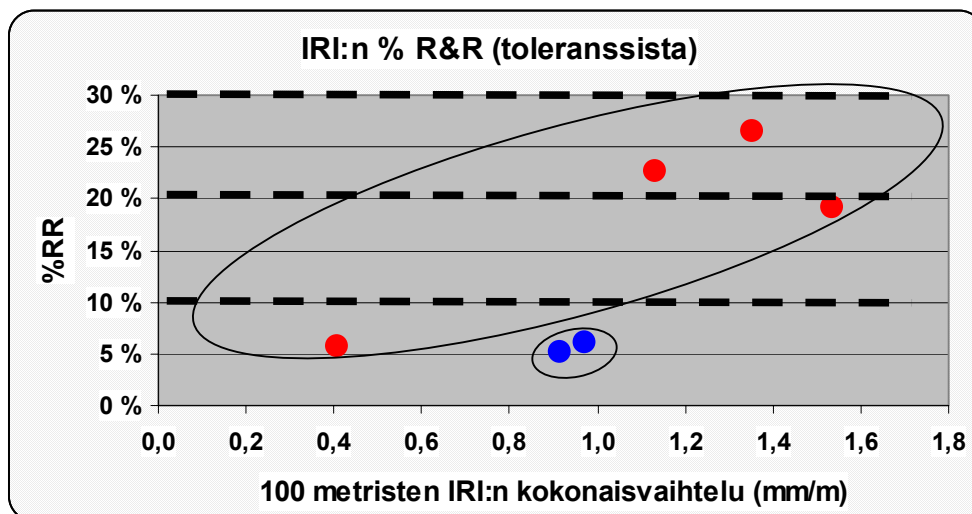
Mittausepävarmuus on ollut vanhan tekniikan aikana noin nelinkertaista uuteen tekniikkaan verrattuna ja vaihdellut myös eri vuosien välillä enemmän kuin uuden tekniikan aikana. Osa mittausepävarmuuden vaihtelusta tulee todennäköisesti siitä, että vertailumittausten testireitit ovat poikenneet toisistaan, mutta osa on saattanut tulla myös mittauslaitteissa tapahtuneista muutoksista. Uuden tekniikan vertailureitit on pidetty vakiona ja vaihtelu mittausepävarmuudessa tulee pelkästään mittalaitteista. Vertailureitin osavaihtelu on myös pienempää kuin vanhan mittaustekniikan vertailureiteissä.

IRI-mittausten mittausepävarmuuteen liittyvän testisuureen RR% käyttäytymiseen pätee sama kuin mitä uramittausten osalta todettiin eli testisuure käyttäytyy eri vuosien välillä stabiilimmin kun se lasketaan kokonaisvaihtelusta.

Kaiken kaikkiaan vertailumittausreittien valintaan voidaan esitetyn perusteella suositella kuntoskaalaltaan mahdollisimman laajan alueen omaavaa testi-reittiä, mutta sen pitämistä ajallisesti samana. Tällä tavoin päästään toimivuusanalyysin testisuureissa stabiilimpiin tunnuslukuihin, eikä jouduta pohtimaan onko tietyn vuoden huonon tuloksen syynä mittauskohteiden valinta.



Kuva 4.5. IRI-mittausten toleranssiin (tässä käytetty 0.5mm/m) suhteutetun testisuureen RR% -taso vuosina 1999-2004. Testisuureen taso riippuu vertailumittausreitin kuntoskaalasta ja siten kokonaisvaihtelun suuruudesta.



Kuva 4.6. IRI-mittausten kokonaisvaihteluun suhteutetun testisuureen RR% -taso vuosina 1999-2004. Testisuureen taso ei riipu vertailumittausreitin kuntoskaalasta ja näyttää stabiilimmalta.

4.4 Mittausjärjestelmän toimivuus

Yhteenvedona edellisten kappaleiden toimivuusanalyyseistä voidaan todeta, että uuden mittaustekniikan käyttöönoton myötä mittausjärjestelmä toimii sekä UR:n että IRI:n 100-metritasoisien tunnuslukujen mittaamisessa hyvin ja mahdollistaa jatkossa tuotantomittausten suorituskylaskennan.

Edelleen voidaan todeta, että vanhan mittaustekniikan aikana mittausjärjestelmä on toiminut 100-metritasoisien IRI:n mittaamisessa siinä ja siinä, mutta

URAn 100-metriarvoisissa mittaamisissa ei. Tuotantomittausten suorituskyläskelmä on siten relevantti vain IRI-mittauksille.

Suomessa on ollut käytössä vertailumittausten muodostamisperiaate, jossa tehdään uusi reitistö joka keväälle erikseen. Tämä tapa on toimivuusanalyysin testisuureiden stabiiliuden kannalta vähän kyseenalainen, mikäli vertailumittausreitit kuntoskaala vaihtelee eri vuosina liikaa. Positiivista suomalaisessa käytännössä on kuitenkin se, että kuntoskaala on ollut laaja kiinnostavalla arvoalueella, sisältäen sekä hyviä, mutta ennen kaikkea huonoja tietosuuksia. Tässä kohden saattaa ruotsalaistyyllisessä vertailumittausreitillä valinnassa olla tiettyä vinoutumaa (ei kata kiinnostavaa arvoaluetta). Toisaalta on myös todettava, että vakioreitin kunto muuttuu ajan kuluessa ja ei välttämättä sijaitse enää kiinnostavalla arvoalueella (parantamistoimenpiteet). Eräänä mallina reitin suunnittelussa voisi olla tietty vakioreitti+muuttuva huonojen osuus.

Vanhan mittaustekniikan toimivuuden suhteen on mielenkiintoista se, onko mittausjärjestelmä esimerkiksi urien suhteen ollut aina yhtä huono vai onko se mennyt mittalaitteen käyttöaikana huonoon kuntoon ja jos on, niin milloin.

Toimivuusanalyysin tulosten tulkinta rajoittuu nyt vain edellä esitettyihin 100-metritasoihin muuttujiin. Lyhyemmän tulostusvälin muuttujien, esim. 10-metrin muuttujat, mittaamisen tarkkuus on aina huonompaa. Toisaalta jos mittausepävarmuus suhteutetaan kokonaisvaihteluun, joka myös 10-metrin muuttujilla saattaa olla suurempaa voi lopputulos olla hyvinkin lähellä esitettyä.

Toimivuusanalyysin tulokset eivät myöskään päde muille muuttujille kuten pituus- ja poikkikaltevuus, kaarteisuus, karkeusmuuttujat, RMS:t jne..

Selvityksen tekijöiden kanta on, että esitetynkaltainen analyysi tuo uusia välineitä kuntomittausten laadunhallintaan ja kasvattaa laatutietoisuutta antamalla ajallista perspektiiviä eri mittaustekniikoiden ja mittausaikojen välisen laadun eroista. Esitetynkaltainen tarkastelutapa painottaa vertailumittausreitit kuntoskaalan merkitystä ja kannustaa siten kiinnittämään siihen riittävää huomiota.

Uusi mittaustekniikka näyttää tuottavan riittävän tarkkaa tulosta ja kaiken kaikkiaan tuo luottamusta mittaustietojen oikeellisuuteen. Tällä tarkkuudella mittaustietojen käyttöaluetta voidaan laajentaa alueelle, jossa mittaustiedoilla on vakavampaa merkitystä kuten kuntovastuu-urakoiden laadun ja sitä kautta arvomuutosperusteiden mittaaminen.

Uuden mittaustekniikan tarkkuus riittää nippa nappa myös sellaisen teollisuudesta tulevan nyrkkisäännön kanssa, jossa mittaustarkkuuden tulisi olla 1/20 osa kokonaisvaihtelusta. IRIn osalta tällainenkin teollisuuden käytännöstä tuleva suhteellisen kovakin tarkkuusvaatimus täyttyy

5 MITTAUSPROSESSIN SUORITUSKYKY

5.1 Menetelmät

Mittausprosessin suorituskky on mitta sille kuinka hyvin tai huonosti koko mittausprosessi toimii suhteessa asiakkaan asettamiin vaatimuksiin. Mittausprosessin lopputuotteen eli tuotantomittauksen laatu voidaan selvittää vertaamalla niiden tuloksia kontrollimittauksen tuloksiin ja laskemalla minkä suuruisen ero niissä on. Laadun mitta on siten tuotanto- ja kontrollimittauksen eron suuruus ja vaihtelu.

Six Sigman anti suorituskyyyn laskentaan on tarjota jatkuva tapa seurata mittausprosessin suorituskkyä ja asettaa erittäin korkeat laadulliset tavoitteet sille. Suorituskkyyn liittyvät keskeiset käsitteet ovat asiakasvaatimukset, mittausprosessin potentiaali ja kvykkyys, sigma suorituskky ja virheelisten määrä.

Asiakasvaatimukset voidaan ilmaista tavoitearvona ja toleransseina. Tavoitearvo on laadun tunnusluvun tavoitteellinen arvo eli mittausparien eroille nolla. Kun tuotanto- ja kontrollimittauksen erojen keskiarvo on nolla ei tuotantomittausprosessi sisällä systemaattista virhettä eri mittausyksiköiden välillä.

Edellä mainittu mittausparien ero ei kuitenkaan ole koko ajan nolla vaan se vaihtelee nollan molemmin puolin tietyn suuruisena satunnaisena vaihteluna. Asiakasvaatimukset määrittävät tälle vaihtelulle minimi- ja maksimiavot, joiden sisään vaihtelun tulisi mahtua.

Mittausprosessin potentiaali osoittaa kuinka hyvään tulokseen tuotantomittausprosessi pystyisi jos prosessin vaihtelun keskiarvo olisi täsmälleen tavoitearvossa eli nollassa. Tätä tunnuslukua käytetään yleisimmin tuotteen suunnittelu- ja kehitysvaiheessa. Potentiaali on siten asiakasvaatimusalueen suhde prosessin leveyteen seuraavasti:

$$C_p = \frac{\text{Asiakasvaatimus}}{\text{Prosessin vaihtelu}} = \frac{YT - AT}{6\sigma}$$

missä σ = erojen keskihajonta, ja asiakasvaatimusten alue on ylä- ja alatoleranssien välinen erotus.

PTM-urakan toleransseina on käytetty uralle $\pm 1,5$ mm ja IRI:lle $\pm 0,5$ mm/m.

Koska mittausprosessi ei välttämättä ole keskitetty tavoitearvoonsa vaan siinä saattaa olla siirtymää on todellinen mittausprosessin kvykkyys jonkun verran potentiaalia huonompi ja sitä kuvaamaan on määritetty toinen termi, prosessin kvykkyys:

$$C_{pk} = C_p \times (1 - k), \text{ missä}$$

$$k = \frac{|\bar{x} - T|}{\frac{YT - AT}{2}}$$

$\bar{x}$ = keskiarvo (esimerkiksi PTM:ssä tuotannon ja kontrollin välisen erotuksen keskiarvo)

T = tavoitearvo (esimerkiksi PTM:ssä se on tasan nolla).

Kyvykyys ilmaisee asetetun vaatimuksen ja mittausprosessin todellisen vaihtelun välisen suhteen huomioiden mittauksien keskiarvon sijainnin toleranssiin nähden.

Lopullinen Sigmataso on luku, joka osoittaa montako hajonnan mittaa mahtuu mittausprosessin keskikohdan ja sitä lähempänä olevan asiakasvaatimusarvon sisään.

$$Sigma = \min\left(\frac{YT - \bar{x}}{\sigma}, \frac{\bar{x} - AT}{\sigma}\right).$$

Virheellisten määrä miljoonaa kohden eli DPMO (Defects per milion opportunities) tai VPM (values per million) osoittaa nimensä mukaisesti kuinka monta virheellistä tuotetta miljoonaa mahdollisuutta kohti laskettuna. Se mittaa nimensä mukaisesti niiden tuotteiden määrää, jotka osuvat asiakasvaatimusalueen so. toleranssialueen ulkopuolelle. Joskus käytetään myös tunnuslukua DPU (viallisten tuotteiden määrä)

Määritelmän mukaan Six Sigman tasoinen tuotantoprosessi omaa C_p -arvon 2,0, C_{pk} -arvon 1,5 ja DPMO-arvon 3,4. Six Sigmassa yritetään ensin keskitää tuotantoprosessi haluttuun tavoitearvoon ja sen jälkeen vähentää vaihtelua sen ympärillä. Suorituskyky on sitä parempi mitä suurempia C_p , C_{pk} ja Sigmataso ovat sekä mitä pienempi DPMO on. Edellä mainittujen tunnuslukujen suhde käy ilmi selvemmin seuraavasta taulukosta.

Taulukko 9. Sigma tasot, C_p :n ja DPMO:n yhteys (NAUMAN et al. 2001).

Sigma-taso	C_p	DPMO* (siirtymän kanssa)	DPMO (ilman siirtymää)	Kommentti
6	2.00	3.4	0.002	Erinomainen laatu
5	1.67	233	0.57	Erittäin hyvä laatu
4.5	1.50	1 350	6.8	Hyvä laatu
4	1.33	6 210	63	Hyvä laatu
3.5	1.17	22 700	466	Hyvä laatu
3	1.00	66 810	2700	Tyydyttävä laatu
2	0.67	308 733	45500	Huono laatu
1	0,33	690 000	320 000	Erittäin huono laatu

*) 1.5 σ siirtymällä

Suorituskykylaskennan teoreettista osuutta on käsitelty yksityiskohtaisemmin liitteessä. Todellisuudessa suorituskykylaskennassa ei teoriaa kovin paljoa

tarvita, koska laskelmat voi tehdä helposti siihen tarkoitukseen kehitetyillä valmiilla ohjelmilla.

5.2 Aineisto

Suorituskykylaskennan perusteena on mittausaineisto kontrollimittauksista sekä niitä vastaavista tuotantomittauksista. Ajallisesti tarkastelussa ovat mittausvuodet vuodesta 2001 lähtien. Suorituskyvyllä tarkoitetaan tuotantolaatua suhteessa asiakasvaatimukseen eli toleransseihin. Suorituskyky on siten tuotanto- ja kontrollimittauksen eron suhdetta siihen mitä se vaatimuksen mukaan saa enintään olla.

5.2.1 Uramittauksen suorituskykyanalyysin aineisto

Uramittauksen tuotantolaatu on laskettu kontrollimittauksista, joita oli vuosina 2001 595 km 2002 372 km, 2003 1544 km ja 2004 2483 km. Kontrollimittauksen edustavuudessa on siten tapahtunut melkoinen määrällinen kasvu johtuen lähinnä siitä, että vuoteen 2002 saakka kontrollimittauksilla lähinnä vain tuotettiin tuotantomittauksen laadun taso, mutta siitä eteenpäin niillä myös osoitettiin arvonmuutosperusteiden läsnäolo ja mahdollinen sakotusperuste.

Kooste uramittauksen tuotantolaadun pohjana olevasta aineistosta on esitetty seuraavassa taulukossa ja sitä seuraavissa kuvissa.

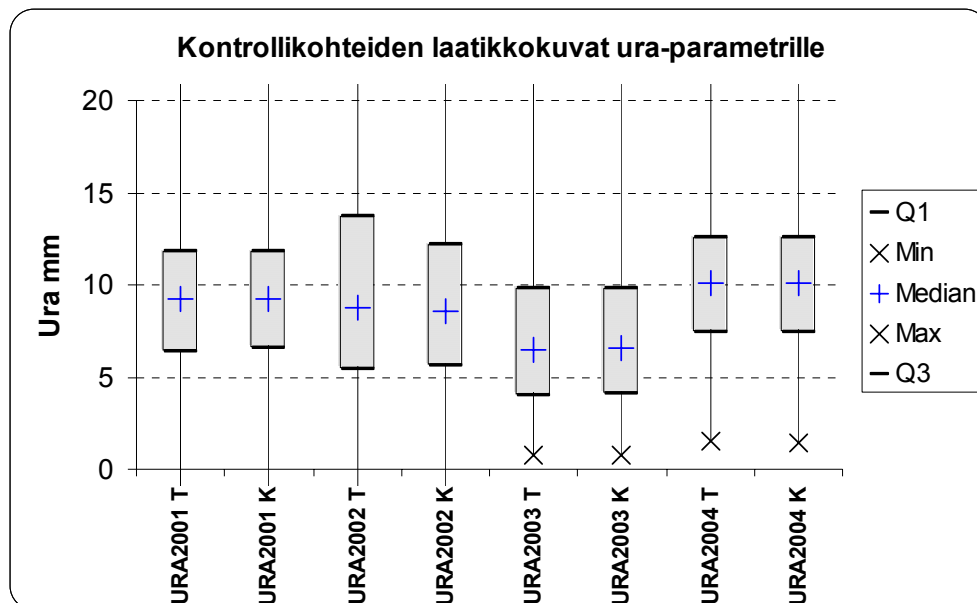
Taulukko 10. Suorituskykyanalyysin lähtötietojen tilastolliset tunnusluvut uramittauksille vuosina 2001-2004.

Parametri	2001 (mm)			2002 (mm)			2003 (mm)			2004 (mm)		
	T *)	K **)	T-K ***)	T	K	T-K	T	K	T-K	T	K	T-K
N	5949	5949	5949	3725	3725	3725	15438	15438	15438	24828	24828	24828
ka	9.26	9.28	-0.019	9,63	9,07	0,558	7.25	7.28	-0.029	7.11	7.11	-0,002
hajonta	4.02	3.87	2.986	5,62	5,12	3,600	4.08	4.06	0.677	4.19	4.19	0,832
P5	3.2	3.6	-3.910	1,2	1,1	-5,070	2.2	2.3	-0.973	1.90	1.90	-1.10
P50	9.2	9.2	-0.300	8,8	8,6	0,300	6.5	6.6	-0.030	6.30	6.30	0,000
P95	16.0	15.7	4.150	19,7	17,9	6,700	14.5	14.5	0.913	14.50	14.50	1.03

*) T = Tuotantodata, **) K = Kontrollidata, (jakaumat eivät ole normaaleja)

***) Tuotannon ja kontrollin ero (lähes normaalijakautunut)

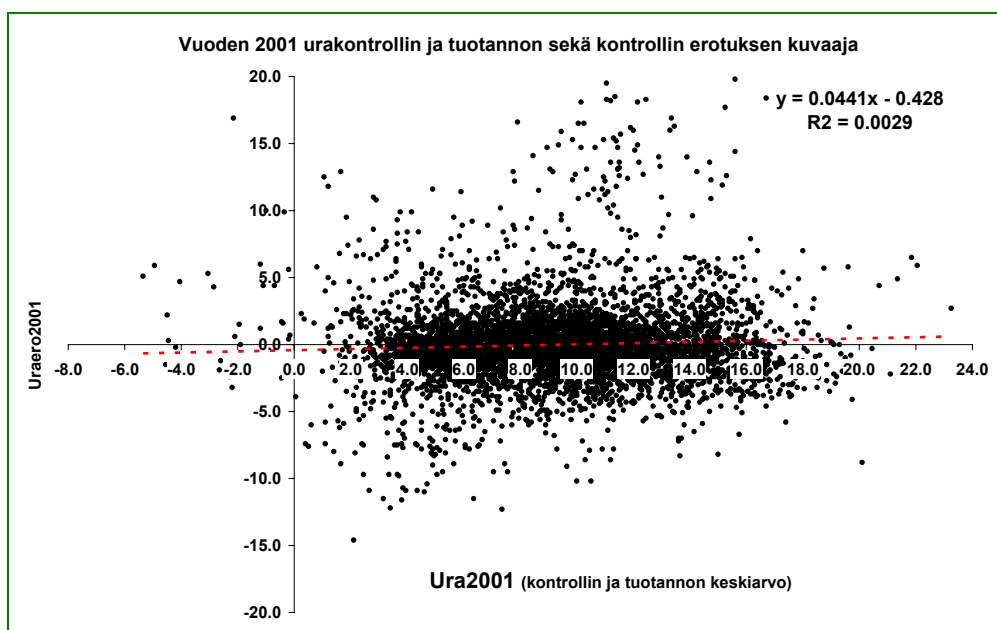
Uramittauksen osalta kontrollimittauksen mittausaluejakauma hiukan notkahti vuonna 2003, mutta on jälleen vuonna 2004 samaa tasoa kuin aikaisemmin. Kontrollimittauksen mittausarvojen mediaani on ollut noin tasolla 10 mm.

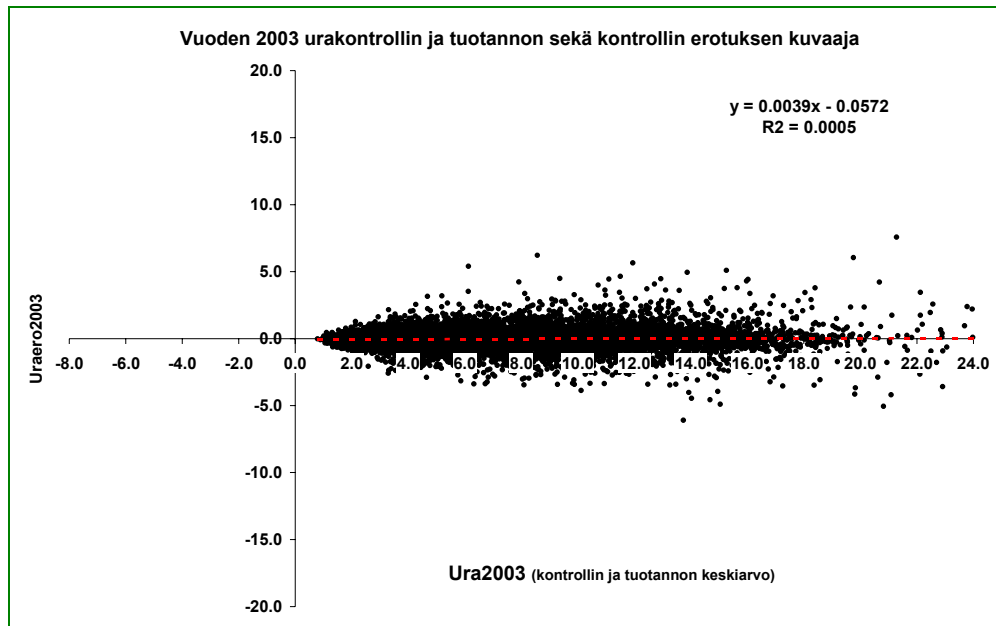


Kuva 5.1. Uran kontrollikohteiden mittausaluejakauma 2001-2004.

Seuraavissa kuvissa on tuotannon ja kontrollimittausten erot plotattu tuotannon ja kontrollimittausten keskiarvoa vastaan. Mikäli havainnot sijaitsevat kaukana nollatasosta (y-akselilta) on tuotannon ja kontrollin välillä suuri poikkeama. X-akseli osoittaa mittauksen tason, jolla havaittu poikkeama esiintyy. Vuosien 2002 ja 2004 kuvat ovat liitteessä 3.

Vuoden 2002 uramittausten kontrollimittausautossa olleen vian takia kuvien ja analyysien esittämä laatuus ei välttämättä vastaa täysin todellisuutta.





Kuva 5.2a,b. Hajontakuvia tuotanto- ja kontrollimittausten eroista vuonna 2001 (a) ja 2003 (b).

5.2.2 IRI-mittausten suorituskykyanalyysin aineisto

IRI-mittausten tuotantolaatu on laskettu kontrollimittauksista, joita oli vuosina 2001 1135 km 2002 312 km, 2003 1544 km ja 2004 2483 km. Kooste IRI-mittausten tuotantolaadun pohjana olevan aineiston tilastollista tunnusluvuisia on esitetty seuraavassa taulukossa ja sitä seuraavissa kuvissa.

Taulukko 11. Suorituskykyanalyysin lähtötietojen tilastolliset tunnusluvut IRI-mittauksille vuosina 2001-2004.

Para- metri	2001 (mm/m)			2002 (mm/m)			2003 (mm/m)			2004 (mm/m)		
	T *)	K **)	T-K ***)	T	K	T-K	T	K	T-K	T	K	T-K
N	11356	11356	11356	3117	3117	3117	15438	15438	15438	24828	24828	24828
ka	1,91	1,93	-0,016	1,90	1,86	0,035	1,58	1,58	0,008	1,60	1,60	-0,004
hajonta	1,04	1,07	0,351	0,88	0,88	0,381	0,83	0,81	0,192	0,897	0,880	0,310
P5	0,93	0,92	-0,476	0,97	0,95	-0,420	0,78	0,78	-0,308	0,79	0,80	-0,24
P50	1,59	1,60	-0,010	1,70	1,68	0,030	1,37	1,37	0,000	1,36	1,36	0,000
P95	4,04	4,09	0,446	3,55	3,47	0,490	3,07	3,06	0,323	3,30	3,26	0,21

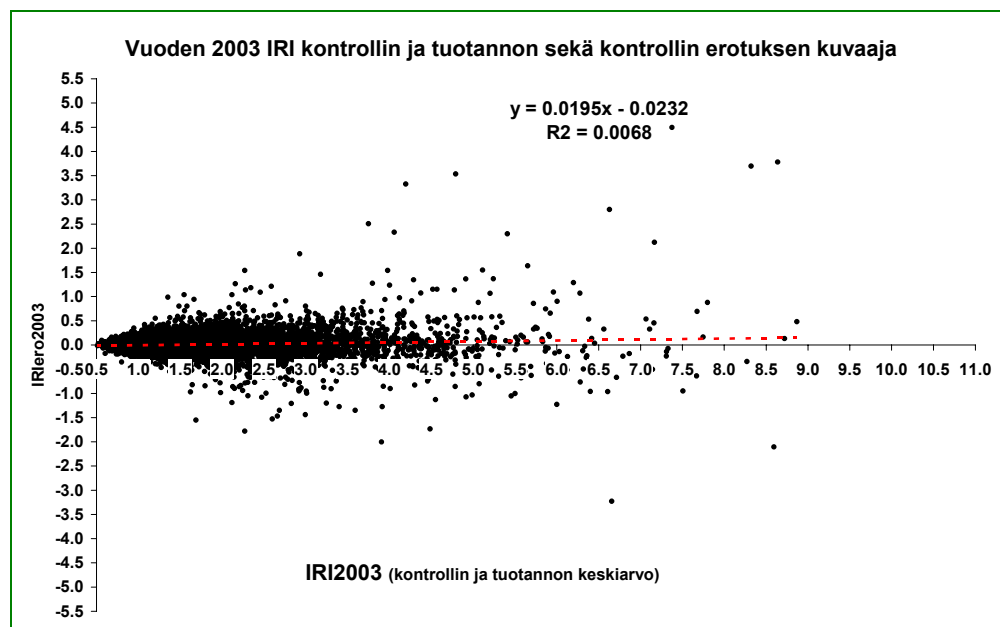
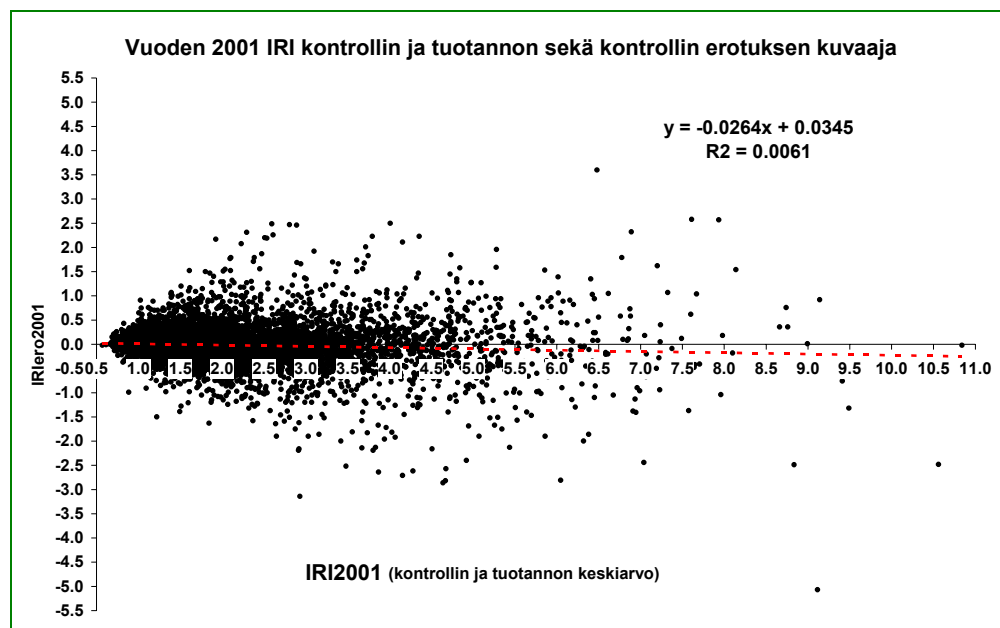
*) T = Tuotantodata, **) K = Kontrollidata, (jakaumat eivät ole normaaleja)

***) Tuotannon ja kontrollin ero (lähes normaalijakautunut)

Seuraavissa kuvissa on tuotannon ja kontrollimittausten erot plotattu tuotannon ja kontrollimittausten keskiarvoa vastaan. Mikäli havainnot sijaitsevat kaukana nollassa (y-akselilta) on tuotannon ja kontrollin välillä suuri

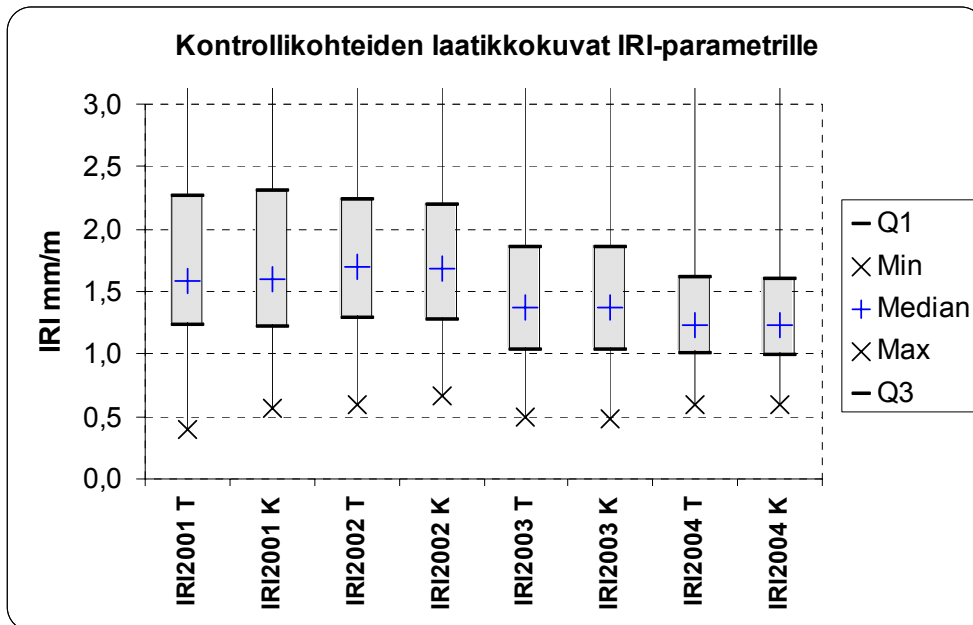
poikkeama. X-akseli osoittaa mittauksen tason, jolla havaittu poikkeama esiintyy. Vuosien 2002 ja 2004 kuvat ovat liitteessä 3.

Vanhan ja uuden mittaustekniikan erot näkyvät selvästi. Uudella mittaustekniikalla mittausvirheiden tasoriippuvuus on pienempää kuin vanhalla eli lineaarisuus on parempi.



Kuva 5.3 a,b. Hajontakuvia tuotanto- ja kontrollimittausten eroista vuonna 2001 (a) ja 2003 (b).

Kontrollikohteiden mittausalue-edustavuus on vanhan mittaustekniikan aikana ollut parempi kuin nykyisen. PTM-urakan projektiryhmän kannattaakin seurata tarkkaan, että kontrollikohteiden edustavuus on riittävällä tasolla.



Kuva 5.4. IRI:n kontrollikohteiden mittausaluejakaumat vuosina 2001-2004.

5.3 Suorituskykyanalyysi

5.3.1 Uramittausten suorituskyky

Uramittausten suorituskykyanalyysi tehtiin syöttämällä tuotanto- ja kontrollimittausparien arvot kultakin mittausvuodelta SPC_XL-ohjelmaan, joka laskee ne suoraan suhteessa toleranssivaatimuksiin. Suorituskykyyn liittyvinä tunnuslukuina saadaan taulukon 14 mukaan potentiaali, kyvykkyys, virhemäärät sekä sigma tunnusluvut. Taulukoissa esitetään lisäksi potentiaalin ja kyvykkyysluottamusvälien ala- ja ylärajat (laskettu tuotanto- ja kontrollimittausten välisistä eroista), jotka on laskettu SAS:n JMP 5.1 ohjelmiston demo versiolla. Virhemäärät on esitetty Six Sigma-menettelyn mukaisen DPMO:n suhteen sekä havainnollisuuden vuoksi myös suoraan prosentuaalisina (DPH-%=defects per hundred cases).

Kontrollimittausten määrää on nostettu huomattavasti uuden mittausurakan myötä. Toleransseina käytetään $\pm 1,5$ mm. Systemaattinen virhe on (vuoden 2002 tuloksia lukuun ottamatta) melko pieni eli erojen keskiarvo on lähellä nollaa. Vanhan mittaustekniikan aikana satunnainen vaihtelu oli suhteellisen suurta (hajonnat noin 3 mm:n luokkaa). Uudella mittaustekniikalla satunnainen vaihtelu on huomattavasti pienempää (0,5-1 mm).

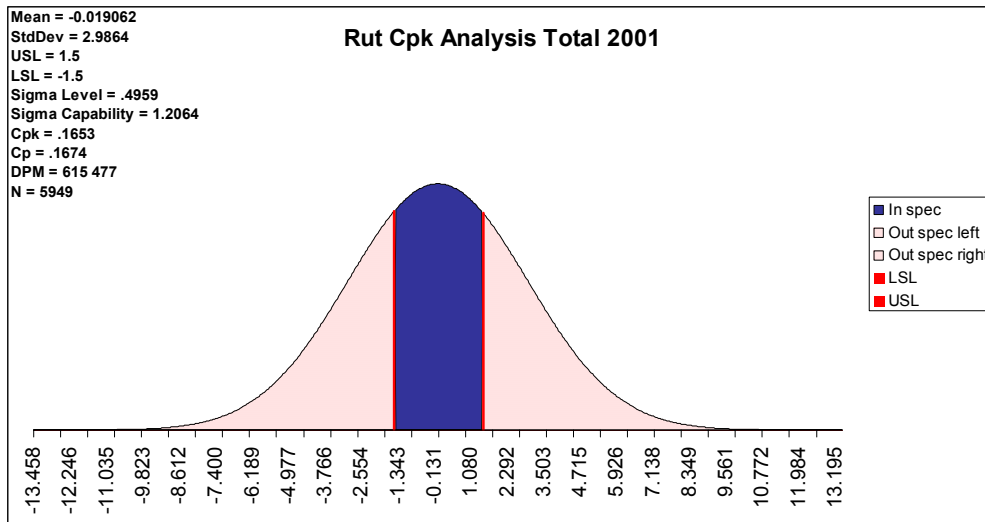
Erot potentiaalissa ja kyvykkyydessä kertovat sen, että keskiarvo poikkeaa tavoitearvosta eli nolasta. Vuoden 2002 tulokset ovat erittäin huonot. Vuosien 2003 ja 2004 tulokset ovat huomattavasti parempia kuin aiempien vuosien. Vanhan mittaustekniikan aikana virhetodennäköisyydet ovat suuria (31-68%). Uuden tekniikan aikana ne putoavat huomattavasti. Vuoden 2004 arvot ovat kuitenkin taas merkittävästi huonompia kuin vuoden 2003.

Taulukko 12. URA-tunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysin tuotantomittauksista 2001-2004.

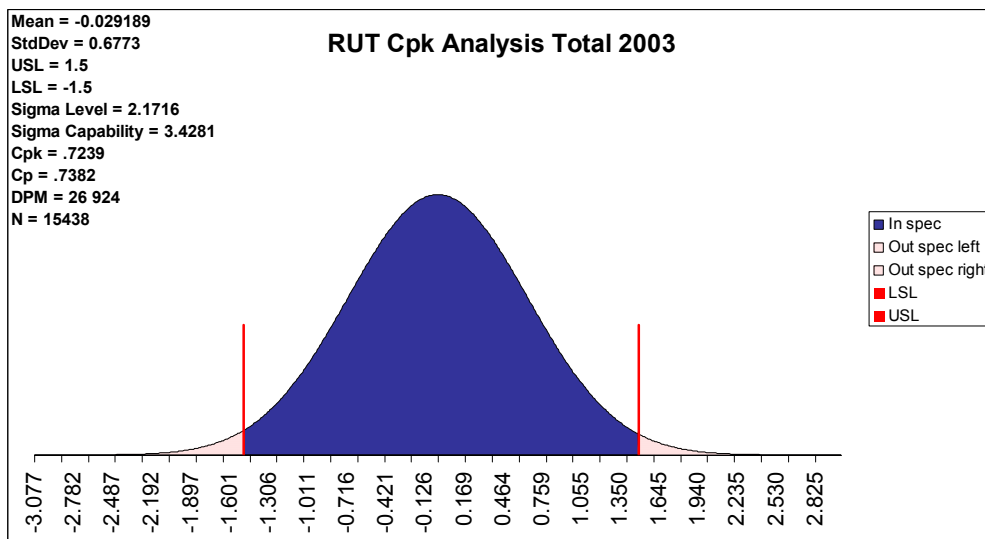
Muuttuja / tunnusluku	2001	2002	2003	2004
N	5949	3718	15438	24828
ka	-0.019	0,558	-0.029	-0.002
hajonta	2.986	3,600	0.677	0.932
USL (=ylätoleranssiraja)	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5
LSL (=alatoleranssiraja)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
Prosessin potentiaali C_p	0.167	0.140	0.738	0.601
C_p luottamusvälin ala- ja yläraja	0.164 - 0.170	0.136 - 0.142	0.730- 0.746	0.595-0.606
Prosessin kyvykkyys C_{pk}	0.165	0.087	0.724	0.600
C_{pk} luottamusvälin ala- ja yläraja	0.156 - 0.174	0.076 - 0.098	0.714- 0.733	0.593-0.697
DPMO	308000	680573	13900	71 565
DPH-%	30.8	68.1	1.4	7.2
Sigmataso	0.5	0.3	2.2	1.6
Sigma suorituskyky	1.2	1.0	3.4	2.7

C_p ja C_{pk} luottamusvälit saatu SAS:n JMP5.1 DEMO-softasta.

Sigmatasoina suorituskyvyn arvot ovat vanhalla tekniikalla 1-2 ja uudella tekniikalla 3-4. Vanhan tekniikan käyttöaikana suorituskykylaskennan järkevyyteen liittyy se varaus, joka mittausjärjestelmän toimivuusanalyysissä todettiin eli että suorituskykylaskelmaa ei kannattaisi mittausjärjestelmän toimimattomuuden takia edes laskea.



Kuva 5.5. Uratunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysi mittauskaudelta 2001. Vain 39 % havainnoista laatuspeksien sisällä. Suorituskyky sigmoissa 1,2 eli erittäin huono. USL=ylätoleranssiraja, LSL=alatoleranssiraja



Kuva 5.6. Uratunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysi mittauskaudelta 2003. Yli 97 % havainnoista laatuspeksien sisällä. Suorituskyvyn taso sigmoissa 3,4 eli hyvä.

5.3.2 IRI-mittausten suorituskyky

IRI-tunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysin tulokset on esitetty seuraavissa taulukossa ja kuvissa. IRI-tunnusluvun toleranssivaatimukset tuotanto- ja kontrollimittausten eroille ovat $\pm 0,5$ mm/m. Mittausmääriin ja systemaattiseen ja satunnaiseen vaihteluun pätee sama mitä todettiin urien

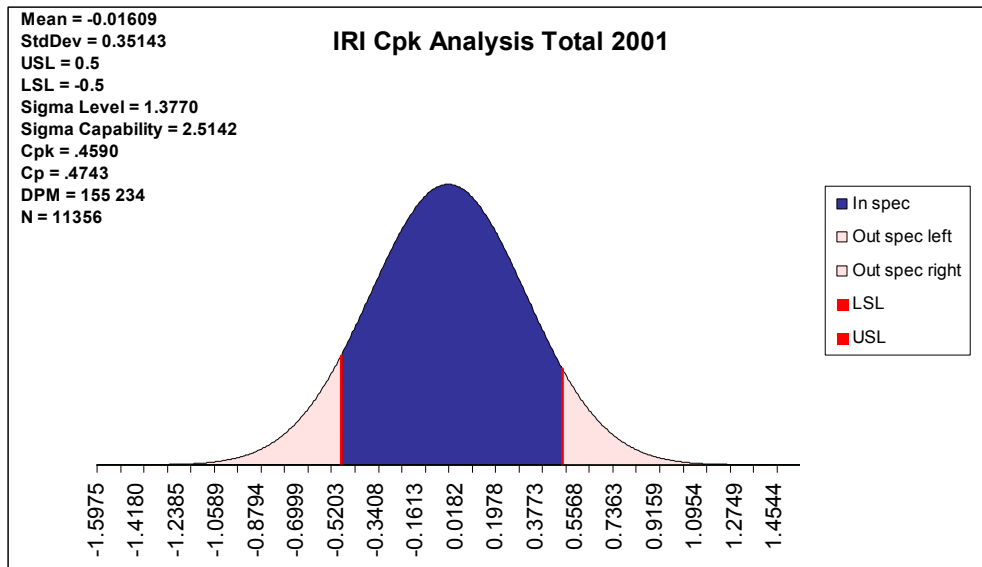
kohdalla edellisessä kappaleessa. Erojen keskiarvo on lähellä nollaa. Erojen hajonta on vanhan tekniikan aikana ollut noin 0,4 mm/m ja uuden tekniikan aikana 0,2-0,3 mm/m.

Prosessin potentiaali ja kyvykkyys ovat uuden tekniikan aikana noin kaksi kertaa parempi kuin vanhan tekniikan aikana.

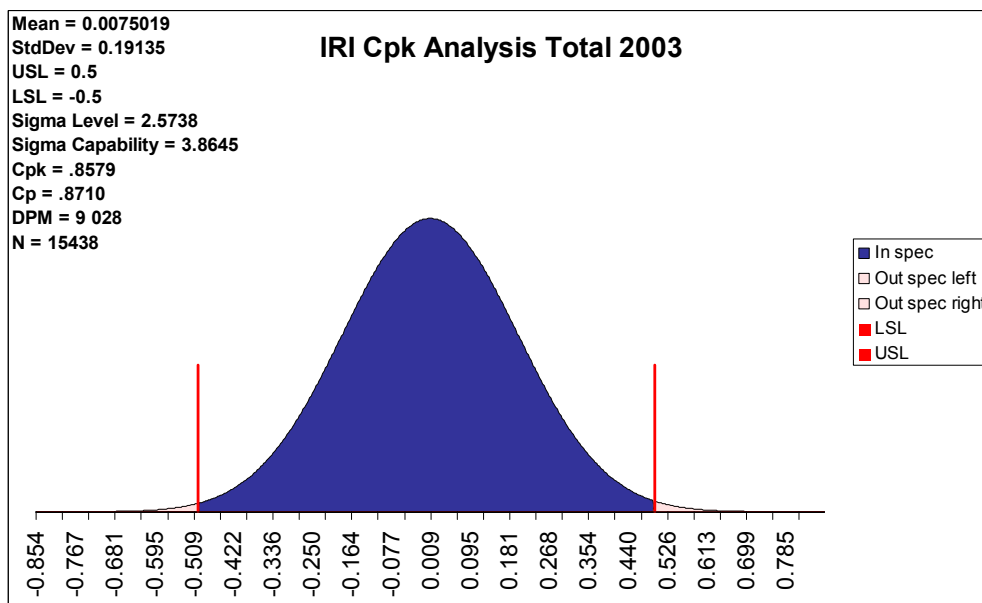
Virheellisten määrät ovat uuden tekniikan aikana noin puolet vanhan tekniikan määristä. Sigma suorituskvyn arvot ovat olleet vanhan tekniikan aikana noin 2,5 ja uuden tekniikan aikana noin 3-4. Vuoden 2004 suorituskvyn arvot ovat kuitenkin pudonneet merkittävästi, minkä tiedetään johtuvan kesämittauksista. Syynä suorituskvyn heikentymiseen arvellaan olevan sen, että mittauksissa on jonkun verran vinoutumaa ja poikkeavia arvoja, jotka vaikuttavat paljon hajontaan ja sitä kautta suorituskvyn, mutta eivät niinkään laatuvaatimukseen, jotka silti täyttyvät. Laatuvaatimus (95 %:n vaatimisarvo) ei ota siten huomioon erojen jakauman vinoutta eikä suurten poikkeamien vaikutusta silloin niitä on vähän. Sigma suorituskvyn näyttää reagoivan siten herkemmin laadussa tapahtuneisiin muutoksiin kuin pelkkä laatuikäyrän yksi piste.

Taulukko 13. Suorituskvyn muuttujat IRI:lle tuotantomittauksista 2001-2004.

Muuttuja / tunnusluku	2001	2002	2003	2004
N	11356	3117	15438	24828
ka	-0.016	0.035	0.008	-0.004
hajonta	0.351	0.381	0.191	0.310
USL (=ylätoleranssiraja)	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5
LSL (=alatoleranssiraja)	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Prosessin potentiaali (C_p)	0.474	0.437	0.871	0.537
C_p luottamusvälin ala- ja yläraja	0.468 - 0.480	0.426 - 0.448	0.861 - 0.881	0.532 - 0.542
Prosessin kyvykkyys (C_{pk})	0.459	0.407	0.858	0.533
C_{pk} luottamusvälin ala- ja yläraja	0.450 - 0.468	0.391 - 0.422	0.847 - 0.869	0.526 - 0.539
DPMO (=virheitä per miljoona)	80700	191363	4600	107 807
DPH-% (=virheitä per sata)	8.1	19.1	0.5	10,8
Sigmataso	1.4	1.2	2.6	1.6
Sigma suorituskvyn	2.5	2.4	3.9	2.7
Cp ja Cpk luottamusvälit JMP5.1 DEMO.				
Muut tunnusluvut SPC_XL.				



Kuva 5.7. IRI-tunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysi mittauskaudelta 2001. Noin 85 % havainnoista laatuspeksien sisällä. Suorituskyvyn taso sigmaissa 2,5 eli huonohko.



Kuva 5.8. IRI-tunnusluvun tuotantomittausten suorituskykyanalyysi mittauskaudelta 2003. Yli 99 % havainnoista laatuspeksien sisällä. Suorituskyvyn taso sigmaissa 3,9 eli hyvä.

5.4 Suorituskyvyn esittämisen tavat

Mittausten tuotantolaatua tai suorituskykyä voidaan esittää monella tavalla. Laadunhallinnan kehittämisessä eräs tavoite onkin ollut kehittää laadun esittämistapoja ja siten keskusteluttaa ja lisätä ymmärrystä laadusta. Esimerkik-

si uramittausten toteutuvaa laatua vuodelta 2003 voidaan kuvata mm. seuraavilla neljällä eri tavalla:

1. Korrelaatiokuva, jossa akseleilla ovat uramittaustulokset tuotanto- ja kontrollimittauksista.
2. Erojen jakaumakuva, jossa on tuotanto- ja kontrollimittausparien erojen jakauma.
3. Laatukäyrä, joka on tehty kuvan 2 informaatiosta ottamalla eroista itseisarvo ja piirtämällä erojen kumulatiivinen laskeva käyrä.
4. Six Sigma suorituskyykykuva, jossa on laskettu spesifikaatiot täyttämättömien havaintojen määrä ja sitä vastaava sigmataso.

Eri esittämistavoilla on kullakin hyvät ja huonot puolensa, joista seuraavassa lyhyt listaus:

Korrelaatiokuva, $R^2=0,97$:

- plussat: helpontuntuinen ymmärtää, antaa laadun tasosta suhteellisen hyvän kuvan, jollain tavalla vertailukelpoinen muihin, tunnusluvusta voidaan tehdä trendejä.
- miinukset: muutoksia vaikea hahmottaa, ei voida käyttää laskennallisesti, ei paljasta systemaattista virhettä.

Erojen jakaumakuva, $x=0,03\text{mm}$, $s=0,68\text{ mm}$:

- plussat: tilastoasiantuntijoille ymmärrettävä, paljastaa sekä systemaattisen että satunnaisen virheen määrän, on mallinnettavissa ja kaumakäyräksi ja sillä voidaan tehdä simuloinnissa laskutoimituksia, tunnusluvuista (x , s) voidaan tehdä trendejä, ottaa huomioon myös suuret poikkeamat.
- miinukset: vaikea hahmottaa suhteessa muihin, ei kerro onko laatu hyvää vai huonoa ellei lukija hahmota sitä pelkkien lukujen perusteella.

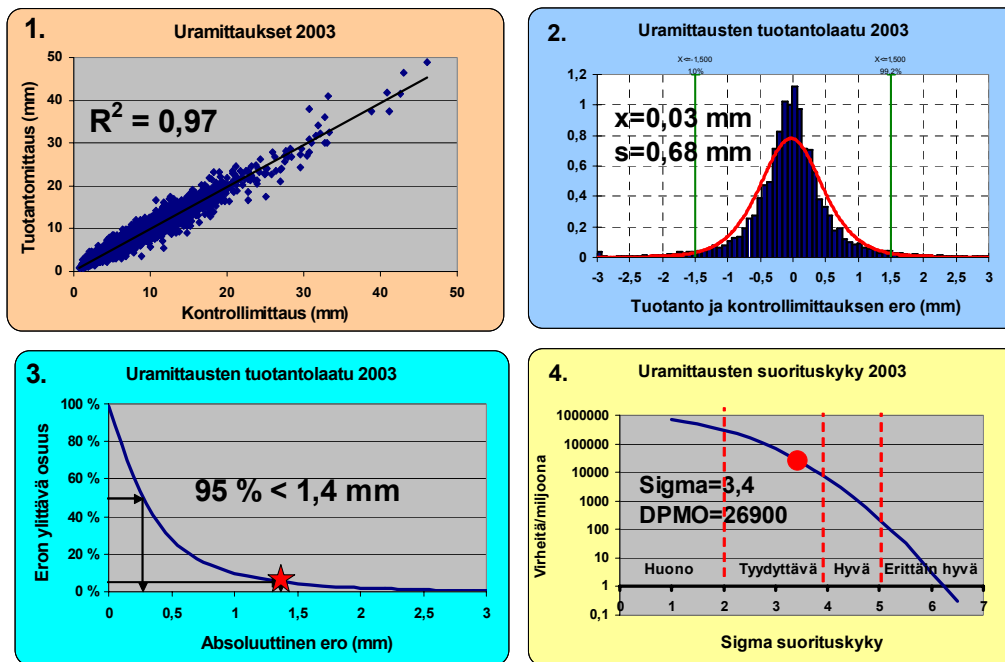
Laatukäyrä, 50 % piste 0,25 mm, 95 % piste 1,4 mm:

- plussat: suhteellisen ymmärrettävä, 95 % piste vastaa mittalaitteiden yleistä mittaustarkkuus informaatiota, 50 % ja 95 %:n tunnuslukuja helppo seurata ja trendittää, sidoksissa mittausurakan laatuvaatimukseen (esim. 95 % < 1,5 mm), suhde asiakasvaatimukseen toteutettavissa.
- miinukset: tunnusluvulla ei voi laskea, se ei ole vertailukelpoinen muiden mittausten vastaavien tunnuslukujen kanssa, eikä se ota huomioon kovin hyvin sellaista tilannetta, jossa on poikkeamat ovat suuria.

Six sigmasuorituskyyky, $\sigma=3.4$, $\text{DPMO}=26900$:

- plussat: täysin suhteutettu asiakkaan vaatimukseen, vertailukelpoinen muiden mittausten tunnuslukuihin, trenditettävissä, suhteellisen ymmärrettävä, laadun tasotietämys helposti opittavissa ja laatutaso luokiteltavissa, antaa tavoitteellisen laatutason, on kytkettävissä osaksi laajempaa prosessin kokonaisuuden suorituskyykylaskentaa (vrt. ylläpidon ohjelmointitason päätösten suorituskyykylaskenta), on osa Six Sigma laatujohtamisen filosofiaa ja liittyy siten kiinteästi laadunparannustoimintaan, ottaa huomioon myös suuret poikkeamat.

- miinukset: uusi asia ja vaatii siten sisäänajoa, pitkän ja lyhyen aikavälin suorituskykyproblematiikka vaatii vielä sisäistämistä, vaatii sof-
taa laskemiseen, riippuu täysin toleransseista eli asiakasvaatimuksista ja vaatii niiden selvittämisen, viallisten määrän DPMO:n sisäistäminen vaatii vielä kehittelyä.



Kuva 5.9. Tuotantomittauksen laadun esittämistapoja. Kaikki kuvat on tehty samasta informaatiosta. Uramittaukset 2003.

5.5 Suorituskyky ja prosessin vaihtelu

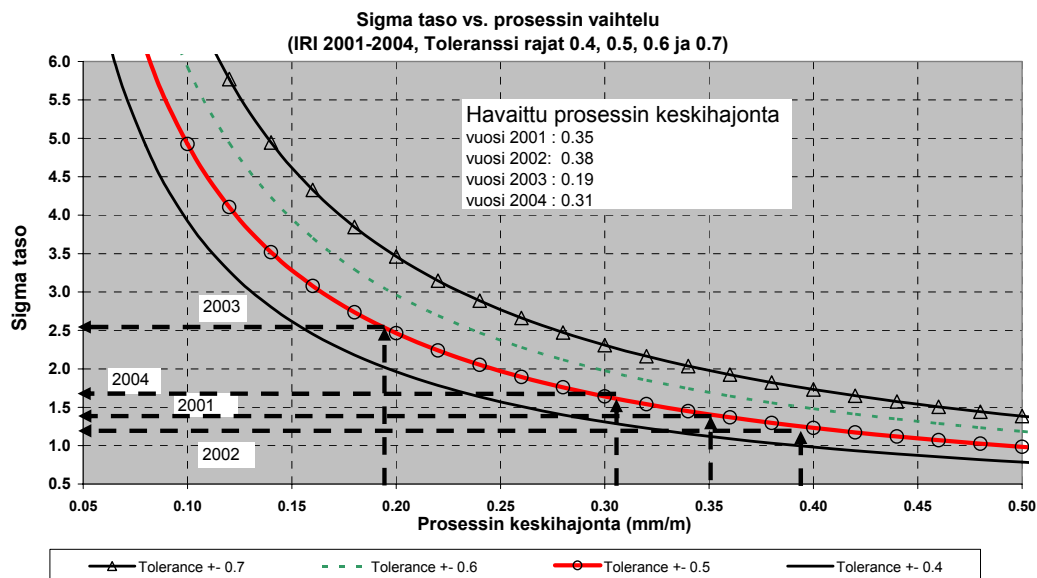
Tuotantomittauksen suorituskyky riippuu kahdesta asiasta; mittausprosessin vaihtelusta ja toleranssien suuruudesta. Mitä pienempää vaihtelu on tai mitä suuremmat toleranssit ovat sitä paremmaksi suorituskyky muodostuu.

Seuraavissa kuvissa on havainnollistettu edellä mainittua yhteyttä erikseen uramittauksille ja IRI-mittauksille sekä esitetty toteutuneet tasot vuosille 1999-2003 (+2004 keväälle).

Vanhan tekniikan aikana tuotantomittauksen vaihtelu on ollut luokkaa 0,38 mm/m, jolla suorituskyky on $\pm 0,5 \text{ mm/m:n}$ toleransseilla vajonnut sigma-tasoina niinkin alas kuin 1-1,5. Tämä suorituskyky on sanallisena arviona heikkoa tasoa.

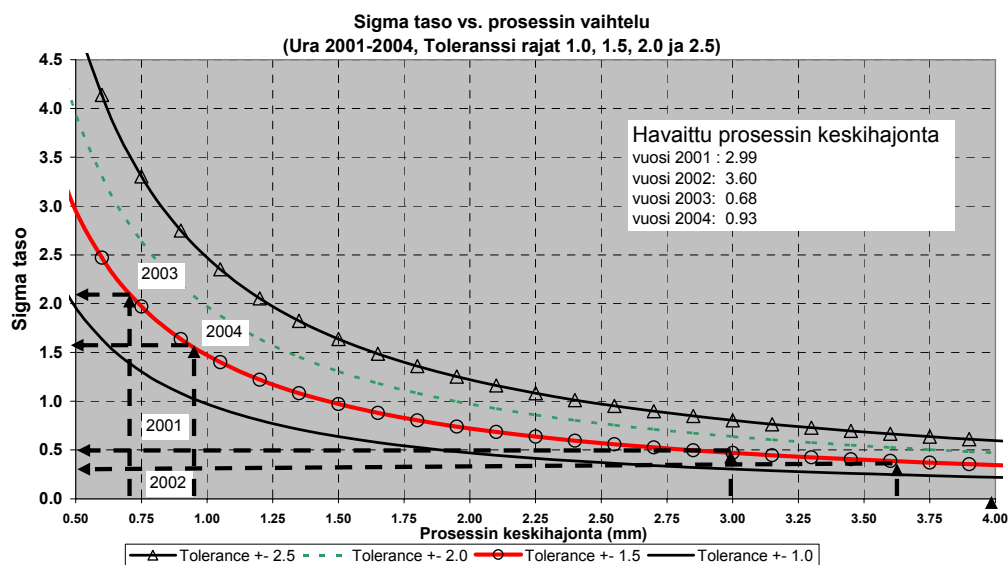
Uuden mittaustekniikan aikana tuotantomittauksen vaihtelu (kontrollimittauksiin verrattuna) on pudonnut 0,10-0,20 mm/m:n tasolle, mikä vastaa sigma-tasoina 2,5-5,0 (ilman sivusiirtymää) ollen tyydyttävän ja hyvän tai erittäin hyvän välillä. Kevät 2004 arvot antavat laadusta kokonaisuutena liian positiivisen kuvan juuri siksi, koska kontrollimittauksen edustavuus erittäin epäta-

saisten teiden osalta on pieni (Sigmataso 5). Vuoden 2004 lopullinen tulos on vain tyydyttävä, kun kesämittaukset otetaan mukaan.



Kuva 5.10. Suorituskyky mittausprosessin vaihtelun funktiona toleranssien eri tasoilla (IRI-mittausten suorituskyky vuosina 2001-2004).

Keväällä 2004 on mitattu pääosin urautuneita teitä, jotka ovat voineet olla tasaisuudeltaan melko hyviä. Tämä voi selittää sen, miksi kevään IRI:n laatu on sigma-mittaristolla niin ylivoimaisen hyvää verrattuna koko vuoden laatuun (esim. keväällä 2004 sigmataso 5.0 kun koko vuoden 2004 sigmataso 1.6).



Kuva 5.11. Suorituskyky mittausprosessin vaihtelun funktiona toleranssien eri tasoilla (URA-mittausten suorituskyky vuosina 2001-2004).

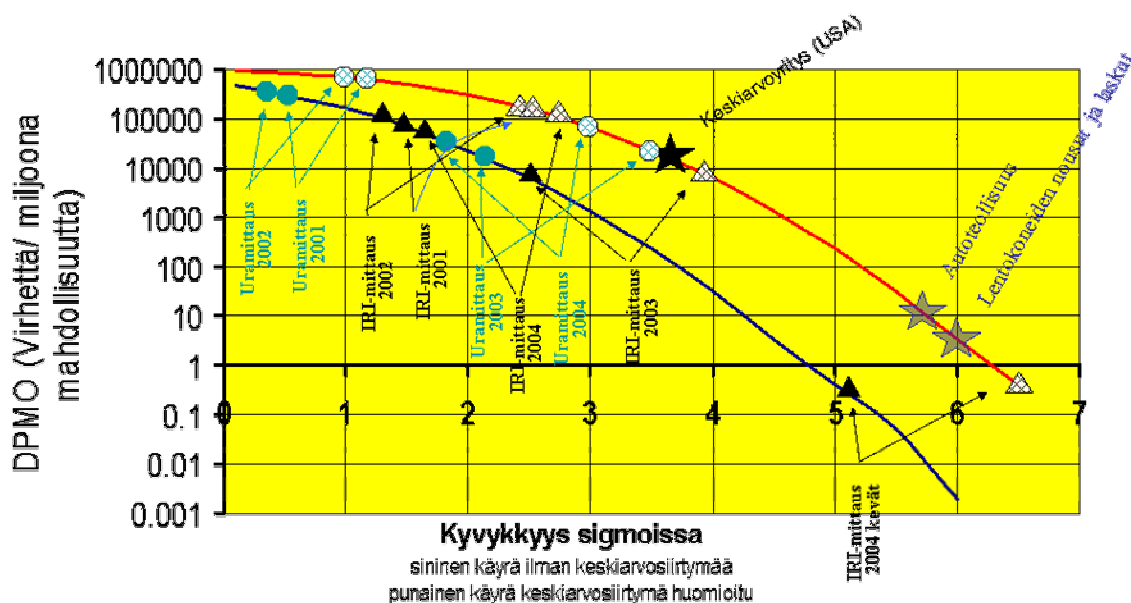
5.6 Suorituskykyvertailua

Suorituskyvyn esittäminen sigmatasoina mahdollistaa sen vertailun muiden asioiden suorituskykyyn. Seuraavissa kuvissa on esitetty PTM-tuotantomittausten suorituskykytuloksia eri mittauksista ja eri vuosina.

Mittaukset on suhteutettu tässä raportissa esitettyihin asiakasvaatimuksiin, jotka ovat IRI-mittauksille $\pm 0,5$ mm/m ja uramittauksille $\pm 1,5$ mm. (Kyseisiä asiakasvaatimuksia tulkittaessa on otettava huomioon, että PTM-tuotantosopimus sallii 5 % kyseisiä raja-arvoja suurempia tuotannon ja kontrollin erojen itseisarvoja eivätkä kyseiset lukuarvot ole täten todellisia toleransseja. Todellisten toleranssien tulisivatkin olla ko. lukuarvoja hieman suurempia).

Yleisesti on tiedossa, että laatutaso on heikkoa kun suorituskyky vaatimukseen nähden putoaa sigmatasossa 2:een tai alle sen. Suorituskyvyn muutokset eri vuosina näkyvät selvästi ja erot ovat suuria. Edelleen pohdittava asia on vielä se miten huomioidaan lyhyen ja pitkän aikavälin laatu ja miten siihen liittyviä lukuja tulkitaan. Hyvä kysymys on vastaako esim. yhden mittausvaiheen, esim. kevätmittaukset, laatu mittausprosessin lyhyen aikavälin laatua ja vastaavasti koko vuoden mittausmäärä pitkän tähtäyksen laatua.

Prosessien suorituskyky (karkeita arvioita)



Kuva 5.12. PTM-mittausten suorituskykyarvoja vuosilta 2001 - 2004 sivusiirtymän kanssa ja sitä ilman.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Päällysteiden palvelutasomittaukset ovat olleet viime vuosina suurehkon muutoksen kohteena eikä niiden laadunhallinta ole kehittynyt siitä tahdissa kuin ulkoiset olosuhteet olisivat edellyttäneet. Tärkeimmät muutokset mittauksiin ja mittaustulosten käyttöön liittyvissä ulkoisissa olosuhteissa ovat olleet mm:

- mittausten toteuttaminen siirtyi Tiehallinnolta mittauspalvelun tuottajalle aluksi neuvoteltujen palvelusopimusten ja myöhemmin kilpailutetun mittausurakan myötä
- mittauksiin liittyvä detaljitason tietämys siirtyy tilaajalta tuottajalle
- mittauskalusto pääsi vanhenemaan ja sen uusiminen tuli kiireelliseksi kaksi vuotta sitten
- mittausten tilaamisessa siirrytään keskitetympiin ja suurempiin kokonaisuuksiin
- mittauspalvelujen laatu kilpailutetaan ja se edellyttää parempaa laatutietoisuutta sekä tilaajalta että tuottajilta
- mittaustietojen käyttöalue laajenee mm. hankinnan tarpeisiin ja se edellyttää laadukasta mittaustietoa
- tiedon hankinnassa siirrytään mittausten tilaamisesta tiedon tilaamiseen ja siinä palvelun tuottajan vastuu ja toimialue laajenevat

Esitettyjen laadunhallinnan menetelmien ja välineiden käyttö olisi suotavaa useista eri syistä. Menetelmien käyttö lisäisi tuntuvasti varmuutta mittausten laadusta ja parantaisi mittauksiin liittyvän laadunhallinnan tilaa sekä loisi pohjan laatuun liittyvälle keskustelulle ja laatutietoisuuden paranemiselle.

Six Sigma -laatujohtaminen tarjoaa monipuolisen ja haasteellisen ympäristön tiedon tuottajille ja käyttäjille. Tässä selvityksessä on käsitelty kolmea eri osa-aluetta Six Sigman 200 eri menetelmästä. Tärkeintä ei kuitenkaan ole varsinaisesti menetelmäosaamisen määrä vaan laatujohtamisen ja jatkuvan parantamisen filosofian omaksuminen.

Tämän kehitysprojektin keskeisimmät tulokset ovat analyysit mittausjärjestelmän toimivuudesta sekä mittausprosessin suorituskyvystä viimeisten viiden vuoden ajalta. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysillä selvitetään onko mittausjärjestelmä kunnossa ennen mittausten aloittamista. Mittausprosessin suorituskyykyanalyysillä selvitetään kuinka hyvin tuotantomittausten laatu vastaa asiakkaan vaatimuksia.

Taulukko 14. Uramittausten mittausprosessien laatu eri "neljänneksissä" vuosina 1999-2004. Mittausjärjestelmän toimivuudessa kahden sijasta neljä eri toimivuusluokkaa. Toimivuus laskettu kokonaisvaihtelusta.

Uran mittausprosessin laatu ja suorituskky		Mittausjärjestelmän toimivuus			
		Ei ok >30%	Joten kuten 20-30%	On ok 10-20 %	Toimii erit- tän hyvin <10%
Mittausprosessin suorituskky	Ei ok	1999 2002	2001		
	Ok				2003 2004

Taulukko 15. IRImittausten mittausprosessien laatu eri "neljänneksissä" vuosina 1999-2004. Mittausjärjestelmän toimivuudessa kahden sijasta neljä eri toimivuusluokkaa. Toimivuus laskettu kokonaisvaihtelusta.

IRIn mittausprosessin laatu ja suorituskky		Mittausjärjestelmän toimivuus			
		Ei ok >30%	Joten kuten 20-30%	On ok 10-20%	Toimii erit- tän hyvin <10%
Mittausprosessin suorituskky	Ei ok		2002	1999 2000 2001	
	Ok				2003 2004

Tärkein tämän selvityksen anti on tapa osoittaa mittausjärjestelmän toimivuus, asiakkaan näkökulman huomiointi sekä mittauspalvelun suorituskky-laskennan käyttöönotto.

Miksi mittausjärjestelmän toimivuus kannattaisi analysoida esitetyllä tavalla?

- MSA (GAGE RR) on teollisuudessa paljon käytetty mittausjärjestelmäanalyysi
- se on helppo tehdä ja siihen on olemassa laskentasoftwaret
- on ISO 5725-yhteensopiva
- se paljastaa mittausjärjestelmän toimimattomuuden tai varoittaa jos siihen suuntaan ollaan menossa
- tarjoaa ajallisen perspektiivin mittauksen toimivuuteen
- antaa mittausepävarmuuden vaihtelun lähteet ja niiden osuudet kokonaisvaihtelusta
- mahdollistaa asiakasvaatimusten (toleranssien) käytön
- lisää laatutietoisuutta ja tarjoaa hyvän pohjan mittauksen laadun varmistamiseen
- tarjoaa hyvän pohjan mittauksen laatuvaatimusten määrittämiselle
- tuottaa tietämystä mittausjärjestelmäanalyysin koesuunnitteluun ja mahdollistaa sen vaikutuksen selvittämisen toimivuusanalyysiin

Miksi asiakasvaatimukset kannattaa selvittää?

- kuntotietoa käytetään monessa tilanteessa ja mittausten laadun kysyntä pitää selvittää
- antaa asiakkaalle mahdollisuuden tulla esiin ja ilmaista tarpeensa (asiakkaan ääni = VOC = voice of the customer)
- mahdollistaa mittausten suorituskylaskennan
- antaa viitteitä siitä mihin mittausten laatu riittää ja mihin se ei riitä
- tarjoaa menetelmän laadun ja siihen liittyvien kustannusten suhteen selvittämiseksi (COPQ)
- asettaa mittausten tarkkuusvaatimukset oikealle tasolle tai osoittaa mittausten laatupuutteiden parannustarpeet

Miksi mittauspalvelun suorituskyyky kannattaisi laskea esitetyllä tavalla?

- kertoo lopullisen palvelun laadun suhteessa asiakastarpeisiin (mittausprosessin suhde asiakkaan prosessiin)
- on helppo laskea kaupallisilla ohjelmilla (SPC_XL)
- on vertailukelpoinen mihin tahansa muun asian suorituskyytulokseen (samalla tavalla määritettyyn)
- tarjoaa ajallisen perspektiivin suorituskyyvyn kehittymiselle
- tarjoaa erinomaisen tavoitearvon suorituskyyvylle
- paljastaa laadunparannuskohteet
- lisää palvelun tuottajan ja tilaajan laatu-tietoisuutta
- tarjoaa hyvän pohjan mittauspalvelun laatuvaatimusten asettamiselle
- täyttää sen aukon, joka ISO-laaturungoista ja sertifiointeista jää puuttumaan eli laadun numeerisen osoittamisen
- mahdollistaa trendien tekemisen

Suosituksena esitetään, että tulevaisuudessa mittauspalvelun tuottaja osoittaisi mittausprosessin laadun käyttäen mittausjärjestelmän toimivuusanalyysiä sekä mittauspalvelun laadun käyttäen mittausjärjestelmän suorituskyy-laskentaa ottamalla huomioon asiakkaan tarpeet (nykyisten laatuvaatimusten lisäksi).

Mittauspalvelun laatu on suurempi asiakokonaisuus kuin edellä esitetyt laskelmat. Palvelun laatuun liittyy monia muitakin tekijöitä kuten asiakaspalvelu, vuorovaikutus, aikataulut ja mittausten toimittamisen yleinen sujuminen yms. Sen takia suositellaan, että sekä mittauspalvelun tuottaja että tilaaja lähtisivät kasvattamaan laatu-tietoisuuttaan tutustumalla Six Sigma-filosofiaan ja työkaluihin sekä käyttäisivät sen menetelmiä jatkuvan parantamisen tueksi mittauspalvelun kaikkien laadun osatekijöiden parantamiseen.

Jatkuvan parantamisen filosofiaan sopii seuraava tosiasia. Ohjelmointitason laatu-kustannusanalyysin (Kohta 3.3.1) eräs tulos on, että uuteen mittaustekniikkaan siirtymisestä saadaan nyt joka vuosi noin 1,4 M€:n säästöt siitä, että mittaustarkkuuden ansiosta ohjelmoinnin kohteet osuvat paremmin. Kun vertaa saatua säästöä uuden tekniikan mittaukustannuksiin niin voi todeta, että "Laatu on jälleen ilmaista" eikä vain ainoastaan parantunut laatu vaan PTM-mittaukset kaiken kaikkiaan ovat nyt "ilmaisia", koska säästö ylittää mittaukustannukset. Kun ottaa huomioon mitä muuta hyötyä parantuneen tekniikan tuottamasta mittauslaadusta on, voi todeta, että mittalaitteuudistus maksaa itsensä moninkertaisesti. Päälysteiden ylläpidon tuote prosessina on ottanut laadullisessa suorituskyyvyssä harppauksen eteenpäin.

7 LÄHDELUETTELO

CREVELING, C.M (1997). Tolerance Design - A Handbook for Developing Optimal Specification. Addison-Wesley Longman inc.

Duncan, K.D. (1974). Analytical techniques in training design, the human operator in process control, London UK.

Barrentine, Larry B (1991). Concepts for R&R Studies. ISBN 0-87389-108-2.

DAUGHERTY, Ray et al. (1995). Measurement Systems Analysis Reference Manual. Detroit, MI: Automotive Industry Action Group.

Virtala, P, Mattila, K. ja Järvinen, S.: Expressing the quality of road condition data by Six Sigma method - Case PTM. 3th European Conference on Managing pavements. Berlin. 2004.

Ruotoistenmäki, A., Seppälä, T., Kanto, A.: Optimising the road condition data collection for a road network. 3th European Conference on Managing pavements. Berlin. 2004.

ISO 5725-1&2 (1994). International Standard 1994 (E). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. First edition.

KARJALAINEN, Eero (2002). Six Sigma – Uuden sukupolven johtamis- ja laatujärjestelmä, p.141.

NAUMAN, Earl, HOISINGTON, Steven (2001). Customer centered Six Sigma. Linking Customers, Process Improvement, and Financial Results. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin.

PYZDEK, Thomas (2001). The Six Sigma Handbook. A Complete Guide for Greenbelts, Blackbelts & Managers At All Levels. McGraw-Hill.

Viatek/RST (2003a). Quality Plan 2003. SCC Viatek Ltd. / Scandi-aconsult Ltd., RST Sweden (Ramboll).

Truscott, William, (2003). Six Sigma. Continual Improvement for Businesses. A practical Guide. Butterworth-Heinemann. Oxford.

Guide to Using @RISK. Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel. Palisade Corporation. 2002.

SPC XL 2000 (1999). Digital Computations, Inc. and Air Academy Associates, LLC. Software.

Demo - JMP 5.1 (2003). A BUSINESS UNIT OF SAS.

Virtala, P. (2004). Päälysteiden palvelutasomittausten asiakasspesifikaatiot. Tiehallinto. (julkaisematon).

Äijö, J. (2004). Riskianalyysin käyttömahdollisuudet. (julkaisematon).

Ohjelmistot:

@RISK. Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel. Version 4.5. February 2002. Palisade Corporation.

SPC XL 2000

5

8 LIITTEET

Liite1. Toleranssien suunnittelun teoriaa

Liite 2. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin teoriaa

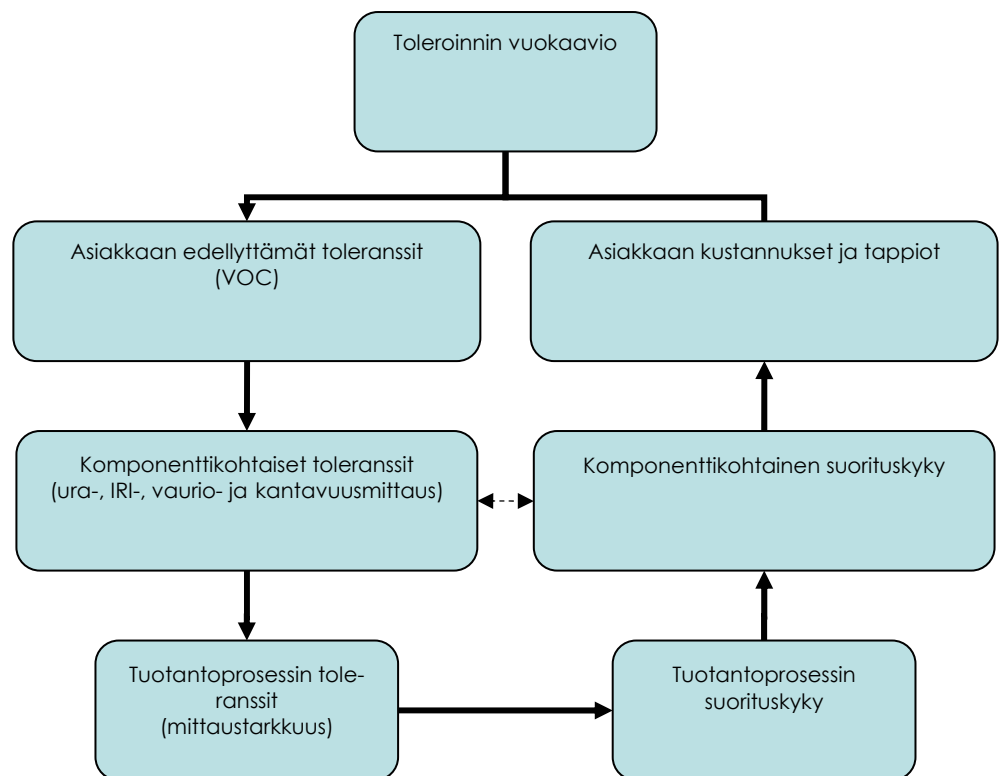
Liite 3. Mittausprosessin suorituskykylaskennan teoriaa

Liite 4. Suorituskykylaskelmien jakaumat

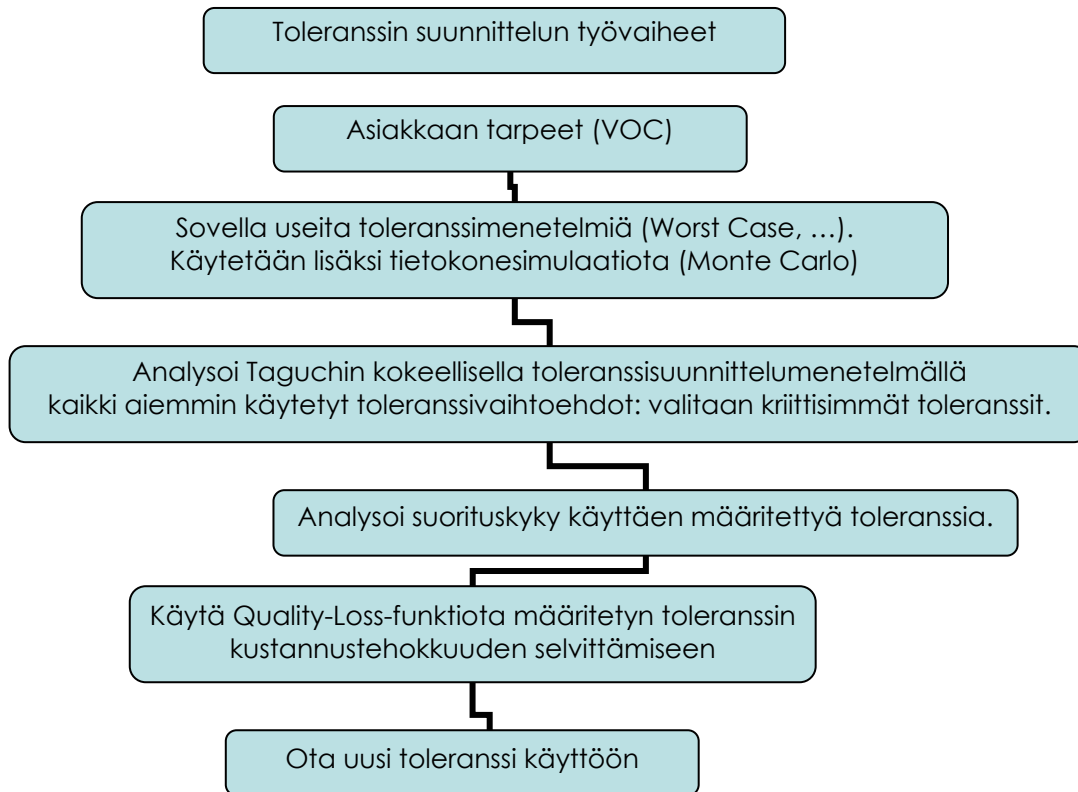
LIITE 1. TOLERANSSIEN SUUNNITTELUN TEORIA

1. Toleranssin suunnittelun menetelmät

Perusideana toleranssinsuunnittelussa on, että suunnittelun- ja valmistuksen (tuotannon) toleranssien tulee täyttää asiakkaan toleranssivaatimukset. Lisäksi suunnittelun- ja valmistuksen (tuotannon) prosessin potentiaalin (C_p) tulee olla optimoitu asiakkaan mahdollisten tappioiden minimoimiseksi.



Yleensä toleranssin suunnittelussa on oltava ainakin seuraavat työvaiheet:



1.1 Perinteinen toleranssin suunnittelu

Perinteisessä toleranssisuunnittelussa lähtökohtana on 3 sigmatason paradigma: $T = 3 \times (\pm\sigma)$, missä

T = toleranssi

σ = prosessin keskihajonta (esimerkiksi PTM-mittarin tuotanto- ja kontrolliauton välinen parametrin erojen keskihajonta).

Tällöin prosessin potentiaali C_p olisi tasan yksi. Toleranssisuunnittelussa tarkasteltavan prosessin on oltava hallinnassa, toisin sanoen mittausjärjestelmän on oltava toimiva (Gage R&R-testi).

Yllä mainittujen kaavojen mukaisesti on mittausprosessia valvottava reaaliaikaisesti SPC-menetelmillä, jotta voidaan varmistua tuotantoprosessin pysymisestä stabiilina.

1.2 Taguchin ”quality loss”-menetelmä

1.2.1 Perusidea

Alun perin toleranssi on määritelty sellaiseksi, että asiakkaan kokema rahallinen tappio on pienin. Taguchin menetelmässä pyritään löytämään taitekoh- ta, jossa on suurin sallittu poikkeama tavoitearvosta ilman merkittäviä lisä- kustannusten syntymistä.

Quality-Loss-funktion peruskaava on:

$$L(y) = k \times (y - m)^2, \text{ missä}$$

L(y) = tappio euroina johtuen yhden tuotteen poikkeamasta tavoitearvoon nähden

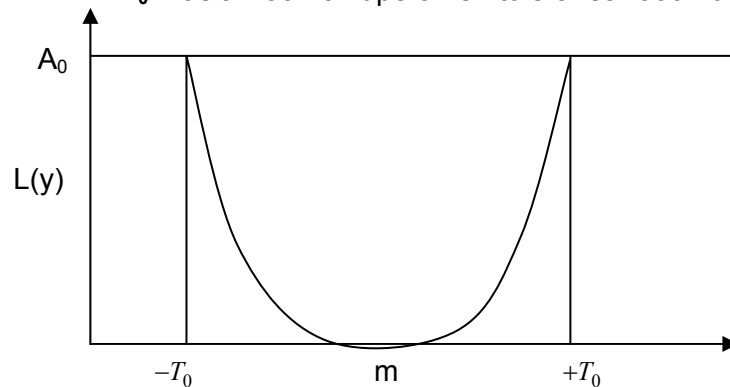
y = havaittu tuotteen arvo tuotannosta (esimerkiksi tiestömittauksen kontrollin ja tuotantomittauksen poikkeama)

m = tavoitearvo tuotteessa (esimerkiksi tiestömittauksissa kontrolli- ja tuotantomittauksen eron tavoitearvo /teoreettisesti = 0)

k = $\frac{A_0}{T_0^2}$ = taloudellinen vakiotermi, missä

A₀ = kustannukset, jotka aiheutuvat yhden tuotteen vaihtamisesta, uusimisesta tai virheellisen tuotteen käyttämisestä (vertaa tiestömittaustiedon käyttötarkoitukset ja niiden kustannukset).

T₀ = asiakkaan alkuperäinen toleranssivaatimus



Kuvasta nähdään, että kun tuotannon mitattu arvo **y** saavuttaa tavoitearvon **m**, kustannukset ovat nolla.

Kun tuotteita on *n* kappaletta, voidaan käyttää seuraavaa kaavaa:

$$\overline{L(y)} = k \times (MSD) \approx k \times [\sigma^2 + (\bar{y} - m)^2], \text{ jossa}$$

σ^2 = kontrollimittausprosessin varianssi (tiestömittaus)

$\bar{y}$ = kontrollimittausprosessin havaittu keskiarvo (esim. tuotannon ja kontrollin eron keskiarvo)

m = tavoitearvo (tiestömittauksessa = nolla)

k = $\frac{A_0}{T_0^2}$ = taloudellinen vakiotermi, missä

A₀ = kustannukset, jotka aiheutuvat *n* kpl tuotteen vaihtamisesta, uusimisesta tai virheellisten tuotteiden käyttämisestä (vertaa tiestömittaustiedon käyttötarkoitukset ja niiden kustannukset).

T₀ = asiakkaan alkuperäinen toleranssivaatimus.

Tässä yhteydessä ei esitetä Taguchin menetelmää tämän tarkemmin. Lisätiedot löytyvät lähteestä "C.M. Creveling Tolerance Design s. 201-232".

1.3 COPQ

Laatupuutekustannusten simuloinnissa otetaan huomioon lähtötietojen vaihtelualueet ja simuloidaan niillä päätöksentekotapahtumia ja niiden virhepäätösten kustannusten suuruutta.

Lähtötiedoista selvitetään ensin niiden jakaumat ja vaihtelualueet sekä mallinnetaan ne esim. @RISK-ohjelmiston BestFit-toiminnolla.

Tämän jälkeen rakennetaan itse malli muodostamalla esim. Excelissä se kaavasto, jolla päätöstilanteiden vaatima tieto lasketaan. Lopuksi määritetään @RISK-ohjelmistoon tulostietueet ja simuloidaan riittävän monta kertaa.

Lopputulokset ovat luettavissa tilastoina ja graafeina halutuilta osin.

Simulointia kutsutaan usein Monte Carlo -simuloinniksi, koska yksi jakaumien arvontatapa on juuri Monte Carlo. Toinen ehkä tehokkaampi tapa on Latin Hypercube, joka suppenee yleensä nopeammin ja vähäisemmällä iterointimäärillä.

Simulointia on selvitetty paremmin mm. @RISK-ohjelmiston käyttöohjeissa.

Toinen vastaavan kaltainen simulointiohjelmisto on Crystal Ball.

LIITE 2: MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOIMIVUUSANALYYSIN TEORIAA

Six-Sigman suorituskäytännöt olettavat mitattavan muuttujan taustajakaumaksi normaalijakauman. Mikäli tämä oletus ei pidä paikkaansa, on tehtävä muunnos, jotta jakaumasta tulisi normaalijakauma.

1 Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi, Gage R&R

Kohdistuvuus (bias)

Tämä on määritelmän mukaisesti mittausprosessin keskiarvon ja tavoitearvon välinen ero. Esimerkiksi tiestömittauksissa kohdistuvuuden tavoitearvo on tasan nolla (poikkeama tuotanto- ja referenssiarvon välillä). Tällöin kohdistuvuus on suoraan tuotanto- ja referenssiarvon välinen erojen keskiarvo.

Kohdistuvuus voidaan esittää myös prosentuaalisena bias-lukuna:

$$\%bias = \frac{|\mu(\text{prosessi}) - \text{referenssi}|}{tol} \times 100.$$

Toistettavuus (repeatability)

Mittausjärjestelmä toistettavuus on hyvä, jos sen vaihtelu on muuttumaton. Toistettavuudella tarkoitetaan havaittua mittauksen vaihtelua, kun sama operaattori käyttää samaa mittauslaitetta useaan kertaan.

Toistettavuus voidaan laskea myös perinteisellä tavalla toistettavuusaineiston keskiarvotestinä tai varianssianalyysitestinä (SNK). Tällöin saadaan käsitys siitä poikkeako keskiarvo tilastollisesti eri toistokerroilla vai ei. Lisäksi SNK-testistä saadaan kriittiset kynnyksarvot eli toisinsanoen jos valitaan umpimähkään saman laitteen toistokerrat, mikä on pienin ero, joka voidaan havaita - mikäli eroa olisi. Samaa varianssianalyysin SNK-testiä voidaan soveltaa myös uusittavuudelle (kun verrataan saman laitteen eri operaattoreiden eroja) ja vertailtavuudelle.

Uusittavuus (reproducibility)

Uusittavuus on useiden mittausten keskiarvojen vaihtelua, kun eri operaattorit käyttävät samaa mittalaitetta.

1.1 Gage R&R Xbar-menetelmä

Lähteenä on käytetty SAS:n version 8.2 QC proseduurin manuaalia.

Keskiarvon ja vaihtelun analysointiin perustuva mittausjärjestelmän toimivuuden menetelmä (Xbar) on laajalti teollisuudessa käytetty sen laskentojen yksinkertaisuuden vuoksi. Tässä tutkitaan mittausjärjestelmän toistettavuus ja uusittavuus. Tätä menetelmää voidaan soveltaa silloin, kun toistojen lukumäärä on välillä 2 - 4. Uusittavuuden analysoimiseksi eri mittajia on vähintään yksi mutta enintään 4.

Laskennat perustuvat aina tietyn sigman monikerroille ν (tavallisesti parametri ν on 4, 5.15 tai 6). Useissa laskentaohjelmistoissa käytetään juuri lukua 5.15, jolloin toimivuusanalyysin tulokset ennustaisivat 5.15 sigman prosessia, kunhan mittausjärjestelmä olisi tulosten mukaan hallinnassa.

Mittalaitteen vaihtelu ja toistettavuus lasketaan kaavalla

$$EV = \bar{R} \times K_1, \text{ missä}$$

$\bar{R}$ = keskimääräinen vaihtelu ja

$$K_1 = \frac{\nu}{d_2} = \text{vakio}$$

ν = suorituskyvyn sigman monikerta = tässä 5.15

d_2 = taulukkoarvo (Duncan 1974, taulukko M. Taulukosta otetaan mittaaajien sekä havaintojen lukumäärä ja kerrotaan molemmat keskenään. Mikäli niiden tulo on vähintään 16, voidaan käyttää tätä taulukkoarvoa d_2 . Muutoin käytetään d_2^* , joka riippuu toistojen ja havaintojen lukumäärästä, Duncan 1974, taulukko D3).

Mittalaitteiden välinen vaihtelu eli uusittavuus lasketaan kaavalla

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{diff} \times K_2)^2 - \frac{(EV)^2}{nr}}, \text{ missä}$$

EV = mittalaitteen toistettavuus

$\bar{X}_{diff}$ = havaittu keskiarvopoikkeama maksimi ja minimi keskiarvon välillä mittaaajilla

$$K_2 = \frac{\nu}{d_2^*} = \text{vakio}$$

d_2^* = taulukkoarvo (Duncan 1974, taulukko D3, riippuu mittaaajien lukumäärästä ja havaintojen lukumäärästä).

n = havaintojen lukumäärä

r = toistojen lukumäärä.

Mikäli mittaaajia on yksi, on uusittavuus nolla koska vaihtelua ei ole.

Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysin Gage R&R toistettavuus ja uusittavuus tulos lasketaan seuraavasti:

$$R \& R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2}.$$

Osan vaihtelu PV lasketaan lisäksi:

$$PV = R_p \times K_3, \text{ missä}$$

R_p = osakeskiarvojen vaihteluväli

$$K_3 = \frac{\nu}{d_2^*} = \text{vakio.}$$

d_2^* = taulukkoarvo ("Duncan 1974 taulukko D3", riippuu osien lukumäärästä yksittäistä havaintoa kohden. Osien määrä voi vaihdella 2 - 15 välillä).

Kokonaisvaihtelu TV perustuu Gage R&R ja osavaihtelu PV lukuihin ja lasketaan seuraavasti:

$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + (PV)^2}.$$

Toistettavuuden ja uusittavuuden sekä Gage R&R:n tulokset on jaettu kokonaisvaihtelu TV:llä sekä kerrottu 100:llä, että on päästy prosentuaalisiin %Gage-tuloksiin (taulukossa oikealla) seuraavasti:

$$\%EV = 100 \times \frac{EV}{TV}$$

$$\%AV = 100 \times \frac{AV}{TV}$$

$$\%R \& R = 100 \times \frac{R \& R}{TV}$$

$$\%PV = 100 \times \frac{PV}{TV}.$$

Toistettavuuden ja uusittavuuden sekä Gage R&R:n tuloksia voidaan verrata myös erikseen määriteltyyn toleranssiin (asiakasspesifikaatioon), että päästään prosentuaalisiin %Gage-tuloksiin seuraavasti:

$$\%EV = 100 \times \frac{EV}{|toleranssi|}$$

$$\%AV = 100 \times \frac{AV}{|toleranssi|}$$

$$\%R \& R = 100 \times \frac{R \& R}{|toleranssi|}$$

$$\%PV = 100 \times \frac{PV}{|toleranssi|}.$$

Yleensä tunnusluku jaetaan pelkällä toleranssilla, mutta esim. PTM:ssä toleranssi määritellään tuotannon ja kontrollin väliselle poikkeamalle. Esimerkiksi IRI:n poikkeama saa olla enintään -0.5 tai + 0.5 jolloin jakajana on 2 x toleranssin itseisarvo.

Nyt %R & R -luvulle on toimivuusanalyysissä seuraavanlainen tulkinta "Lähde Barrentine (1991)":

%R & R	Tulkinta
< 10 %	erinomainen
>10 % ... 20 %	luotettava
>20 % ... 30 %	hyväksyttävä
>30 %	ei kelpaa

Seuraavaksi on yksi esimerkkitulostus Xbar-menetelmällä lasketusta mittausjärjestelmän toimivuusanalyysistä, jossa alkuperäiset toimivuusanalyysin tulokset on jaettu kokonaisvaihtelulla TV.

Taulukko x.x. Xbar-esimerkki tulostus SAS 8.2.

Average and Range Method			
Test ID: Gasket		Performed By:	
Date: 09/18/98		John Smith	
Part No. & Name: Gasket			
Characteristics:			
Specification:		0.6-1.0 mm	
Gage Name: Thickness			
Gage No.:		X-2034	
Gage Type:		0-10 mm	
MEASUREMENT	UNIT	ANALYSIS	% PROCESS VARIATION
Repeatability			
EV =	0.1443		% EV = 15.33 %
Reproducibility			
AV =	0.1516		% AV = 16.11 %
Gage R&R			
R&R =	0.2093		% R&R = 22.24 %
Part Variation			
PV =	0.9177		% PV = 97.50 %
Total Variation			
TV =		0.9413	
Results are based upon predicting 5.15 sigma.			
(99.0% of the area under the normal distribution curve)			

1.2 Gage R&R varianssikomponenttimenetelmä

Lähteenä on käytetty SAS:n version 8.2 QC proseduurin manuaalia.

Vaihtoehtoisesti toimivuusanalyysi Gage R&R voidaan tehdä Xbar-menetelmän sijaan varianssikomponentti menetelmällä. Se on tehokkaampi tilastollinen menetelmä, jossa mittausvirhe ja muut vaihtelun lähteet voidaan arvioida Xbar-menetelmää paremmin.

Varianssikomponenttimenetelmä ei ole kovin käytetty johtuen sen vaatimasta raskaasta laskenta- ja ohjelmistotarpeesta. Myös tämä menetelmä edellyttää aika paljon tilastotieteen osaamista.

Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi varianssikomponenttimenetelmän avulla toteutetaan toisto- ja uusittavuuden analysoinnilla.

Laskennat perustuvat samoin kuin Xbar-menetelmässä aina tietyn sigman monikerroille ν (tavallisesti parametri ν on 4, 5.15 tai 6). Useissa laskenta-ohjelmistoissa käytetään juuri lukua 5.15, jolloin toimivuusanalyysin tulokset ennustaisivat 5.15 sigman prosessia, kunhan mittausjärjestelmä olisi tulosten mukaan hallinnassa.

Varianssikomponenttimenetelmän etuna Xbar-menetelmään on:

- Varianssikomponentit on laskettu tehokkaasti tilastollisin menetelmin
- Enemmän tietoa voidaan esittää kuten yhdysvaikutukset mittaaajan ja osan välillä
- Aineistorajoituksia on vähemmän

Varianssikomponenttimenetelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi SAS-ohjelmistossa Mixed-proceduurilla. Jäännösvirheille eli residuaaleille SAS käyttää rajoitettua suurimman uskottavuuden estimaattoria (REML).

Esimerkiksi ajovirta

```
proc mixed;
    class mittaaaja osa;
    model meas=;
    random mittaaaja osa mittaaaja*osa;
run;
```

luo kovarianssiparametritaulun, joka sisältää

σ_{EV}^2 = varianssikomponentti mittalaittevaihtelusta = toistolle

σ_{AV}^2 = varianssikomponentti mittaaajan vaihtelusta = uusittavuudelle

σ_{IV}^2 = varianssikomponentti yhdysvaikutus mittaaajan ja osan vaihtelusta

σ_{PV}^2 = varianssikomponentti osan vaihtelusta.

Edellä olevista varianssikomponenteista saadaan

$$EV = v \times \sqrt{\sigma_{EV}^2}$$

$$AV = v \times \sqrt{\sigma_{AV}^2}$$

$$IV = v \times \sqrt{\sigma_{IV}^2}$$

$$PV = v \times \sqrt{\sigma_{PV}^2}, \text{ missä}$$

v = suorituskvyn sigma monikerroin (usein 4, 5.15 tai 6). Mutta ohjelmistoissa oletusarvona käytetään monesti arvoa 5.15.

Varianssikomponenttimenetelmässä toimivuusanalyysin Gage R&R tulos lasketaan Xbar-menetelmään verrattuna hieman poikkeavalla tavalla:

$$R \& R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2 + (IV)^2}.$$

Kokonaisvaihtelu on kuitenkin sama eli

$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + (PV)^2}.$$

Toistettavuuden ja uusittavuuden sekä Gage R&R:n tulokset on jaettu kokonaisvaihtelu TV:llä sekä kerrottu 100:llä, että on päästy prosentuaalisiin %Gage-tuloksiin (taulukossa oikealla) seuraavasti:

$$\%EV = 100 \times \frac{EV}{TV}$$

$$\%AV = 100 \times \frac{AV}{TV}$$

$$\%R \& R = 100 \times \frac{R \& R}{TV}$$

$$\%PV = 100 \times \frac{PV}{TV}.$$

Toistettavuuden ja uusittavuuden sekä Gage R&R:n tuloksia voidaan verrata myös erikseen määriteltyyn toleranssiin (asiakasspesifikaatioon), että päästään prosentuaalisiin %Gage-tuloksiin seuraavasti:

$$\%EV = 100 \times \frac{EV}{|\text{toleranssi}|}$$

$$\%AV = 100 \times \frac{AV}{|\text{toleranssi}|}$$

$$\%R \& R = 100 \times \frac{R \& R}{|\text{toleranssi}|}$$

$$\%PV = 100 \times \frac{PV}{|\text{toleranssi}|}$$

Yleensä tunnusluku jaetaan pelkällä toleranssilla, mutta esim. PTM:ssä toleranssi määritellään tuotannon ja kontrollin väliselle poikkeamalle. Esimerkiksi IRI:n poikkeama saa olla enintään -0.5 tai + 0.5 jolloin jakajana on 2 x toleranssin itseisarvo.

Nyt %R & R-luvulle on toimivuusanalyysissä seuraavanlainen tulkinta "Lähte Barrentine (1991)":

%R & R	Tulkinta
< 10 %	erinomainen
>10 % ... 20 %	luotettava
>20 % ... 30 %	hyväksyttävä
>30 %	ei kelpaa

Seuraavaksi on yksi esimerkkitulostus varianssikomponenttimenetelmällä lasketusta mittausjärjestelmän toimivuusanalyysistä, jossa alkuperäiset toimivuusanalyysin tulokset on jaettu kokonaisvaihtelulla TV.

Variance Components Method			
Test ID: Gasket		Performed By:	
Date: 09/18/98		John Smith	
Part No. & Name: Gasket			
Characteristics:			
Specification:		0.6-1.0 mm	
Gage Name: Thickness			
Gage No.: X-2034			
Gage Type: 0-10 mm			
MEASUREMENT UNIT ANALYSIS % PROCESS VARIATION			
Repeatability			
EV	=	0.1662	% EV = 15.77 %
Reproducibility			
AV	=	0.1483	% AV = 14.06 %
Part x Condition			
IV	=	0.2423	% IV = 22.98 %
Gage R&R			

R&R =	0.3291	% R&R =	31.21 %
	Part Variation		
PV =	1.0016	% PV =	95.00 %
	Total Variation		
	TV =		1.0543
Results are based upon predicting 5.15 sigma. (99.0% of the area under the normal distribution curve)			

Varianssikomponentti- ja Xbar-menetelmän toimivuusanalyysitulokset saattavat poiketa hieman toisistaan.

Varianssikomponenttimenetelmä tiivistettynä:

- tarkempi kuin Xbar, sillä ottaa huomioon yhdysvaikutuksen mittaajan ja osan välillä
- aineistossa saa olla joitakin puuttuvia havaintoja eivätkä laskennat mitätöidy
- tilastollinen menetelmä, joka perustuu varianssikomponentteihin.

LIITE 3: Prosessin suorituskykylaskennan teoriaa

3.1 Tilastollisia peruskäsitteitä

Prosessien suorituskykylaskenta pohjautuu merkittävästi tilastotieteeseen. Kolme perusasiaa ovat erittäin tärkeitä kun numeerisesta datasta lasketaan kyvykkyyttä ja suorituskykyä:

- *Keskeisyyden mitta.* Tämä voi olla keskiarvo, mediaani tai moodi.
- *Vaihtelun mitta.* Tämä on yleensä joko vaihtelualue (suurimman ja pienimmän arvon ero), keskihajonta tai varianssi.
- *Vaihtelun muoto.* Tämä on usein lähellä normaalia (symmetrisesti kellokäyrän muotoista), log-normaalia (vinoa) tai negatiivisesti eksponentiaalista jakaumaa. Diskreetille aineistolle muoto tulee yleensä poisson-jakauman tyyliksi.

Normaalijakaumalla on kaksi parametria. Se on jatkuvasti jakautunut keskiarvon, $\bar{x}$, molemmille puolille hajonnan, σ , määräämään leveyteen. Normaalijakaumalle tyypillisiä faktoja ovat:

- $\pm$ yhden hajonnan, σ , sisään keskiarvon, $\bar{x}$, ympärille mahtuu 68,26 % havainnoista
- $\pm$ kahden hajonnan sisään, 2σ , keskiarvon, $\bar{x}$, ympärille mahtuu 95,44 % havainnoista
- $\pm 3\sigma$:n ulkopuolelle jää kummallekin puolelle 0,135 % havainnoista
- $\pm 4\sigma$:n ulkopuolelle jää kummallekin puolelle 32 arvoa miljoonasta
- $\pm 5\sigma$:n ulkopuolelle jää kummallekin puolelle 0,29 arvoa miljoonasta
- $\pm 6\sigma$:n ulkopuolelle jää kummallekin puolelle 0,001 arvoa miljoonasta

Mikäli jokin ominaisuus noudattaa joko sellaisenaan tai muunnosten kautta normaalia jakaumaa, sitä voidaan arvioida normaalijakauman muodon perusteella.

3.1 Prosessin arviointi

Prosessin arvioinnilla tarkoitetaan muutamien tuote-erien, palveluiden tai tapahtumien suorituskyvyn laskemista.

2.1.1 Potentiaali

Prosessin lyhyen tähtäimen potentiaali (laskettu yhdestä näytteestä tai kontrollikokeesta) lasketaan kaavalla

$$C_p = \frac{YT - AT}{6\sigma}, \text{ jossa}$$

YT = ylempi toleranssiraja

AT = alempi toleranssiraja

σ = lyhyen tähtäimen keskihajonta.

Mikäli $C_p = 1$, niin tällöin on 3-sigman mittausprosessi. Potentiaali C_p kertoo mihin mittausprosessi pystyisi mikäli prosessin keskiarvo olisi täsmälleen tavoitearvossa (esimerkiksi tiestömittauksessa tavoitearvo on tasan nolla). Potentiaali ei siis ota huomioon prosessin omaa keskiarvoa.

Potentiaalin luottamusväli lasketaan halutulla riskitasolla kaavalla:

$$\begin{aligned} \text{Alaraja: } C_p &\times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha, n-1}}{\omega}} \\ \text{Yläraja: } C_p &\times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-(1-\alpha), n-1}}{\omega}}, \text{ missä} \\ n &= \text{havaintojen lukumäärä.} \end{aligned}$$

(Lähde JMP 5.1 manuaali).

2.1.2 Kyvykkyys

Prosessin lyhyen tähtäimen kyvykkyys lasketaan kaavalla (mikäli prosessin keskiarvo poikkeaa tavoitearvosta):

$$C_{pk} = C_p \times (1 - k), \text{ missä}$$

$$k = \frac{|\bar{x} - T|}{\frac{YT - AT}{2}}$$

$\bar{x}$ = keskiarvo (esimerkiksi PTM:ssä tuotannon ja kontrollin välisen erotuksen keskiarvo)

T = tavoitearvo (esimerkiksi PTM:ssä se on tasan nolla).

TAVOITE:

T = TUOTANTO – KONTROLLI = 0.

tällöin $\bar{x}$ voi olla positiivinen tai negatiivinen.

Mikäli prosessin poikkeamien keskiarvo $\bar{x}$ konvergoituu kohti tavoitearvoa T, vastaa prosessin potentiaali C_p suoraan prosessin kyvykkyyttä C_{pk} . Lyhyen tähtäimen kyvykkyys ottaa siis huomioon datan keskiarvon sijoittumisen toleranssirajojen sisällä, joten se on realistisempi prosessin kyvykkyyden mittari kuin potentiaali.

Lyhyen tähtäimen kyvykkyys voidaan laskea alemmalle ja ylemmälle toleranssirajalle seuraavilla kaavoilla:

$$C_{pk(YT)} = \frac{(YT - \bar{x})}{3\sigma}, \text{ missä}$$

YT = ylempi toleranssiraja

$\bar{x}$ = keskiarvo

σ = lyhyen tähtäimen keskihajonta

$$C_{pk(AT)} = \frac{(\bar{x} - AT)}{3\sigma}, \text{ missä}$$

AT = ylempi toleranssiraja

$\bar{x}$ = keskiarvo

σ = lyhyen tähtäimen keskihajonta.

Kyvykkyyden luottamusväli lasketaan halutulla riskitasolla kaavalla:

$$\text{Olkoon aluksi } c = \frac{\sqrt{n} \times (\mu - \frac{YT + AT}{2})}{\sigma}, \text{ missä}$$

n = havaintojen lkm

μ = prosessin keskiarvo

σ = prosessin keskihajonta

YT = ylempi toleranssiraja

AT = alempi toleranssiraja.

$$\text{Lisäksi määritellään apuparametri } d = \frac{YT - AT}{\sigma}.$$

Kyvykkyyden odotusarvolle saadaan kaava

$$\mu(C_{pk}) = \frac{1}{6} \times \sqrt{\frac{n-1}{2n}} \times \frac{\Gamma(\frac{n-2}{2})}{\Gamma(\frac{n-1}{2})} \times \left(d\sqrt{n} - 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(\left(\frac{-c^2}{2}\right) - 2c \times (1 - 2\Phi \times (-c))\right) \right)$$

Kyvykkyyden varianssi on puolestaan hankala kaava:

$$\begin{aligned} Var(C_{pk}) = & \left[\frac{d^2}{36} \times \left(\frac{n-1}{n-3} \right) \right] - \left[\frac{d}{9\sqrt{n}} \times \left(\frac{n-1}{n-3} \right) \right] \times \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(\frac{-c^2}{2}\right) + c \times (1 - 2\Phi \times (-c)) \right]^2 \\ & + \frac{1}{9} \left[\frac{n-1}{n(n-3)} \right] \times (1 + c^2) - \left(\frac{n-1}{72n} \right) \times \left[\frac{\Gamma(\frac{n-2}{2})}{\Gamma(\frac{n-1}{2})} \right] \times \\ & \left(d\sqrt{n} - 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(\left(\frac{-c^2}{2}\right) - 2c \times (1 - 2\Phi \times (-c))\right) \right)^2. \end{aligned}$$

Täten kyvykkyyden odotusarvon ja varianssin avulla saadaan luottamusväli:

$$\text{Alaraja: } \mu(C_{pk}) - k \times \sqrt{Var(C_{pk})}$$

$$\text{Yläaraja: } \mu(C_{pk}) + k \times \sqrt{Var(C_{pk})}.$$

(Lähde JMP 5.1 manuaali).

2.1.3 DPU ja DPMO

Virheellinen tuote, palvelu tai tapahtuma on se, jota halutaan välttää. Tämä edellyttää tietysti toleranssirajojen eli asiakasspesifikaatioiden määrittämistä, joiden sisällä tuote saa vaihdella (esimerkiksi tien kunto-ominaisuudet).

Kun toleranssi on määritelty - voidaan kirjoittaa kaava

$$DPU = N \times p, \text{ jossa}$$

DPU = viallisten lukumäärä yksikköä kohden

p = tuotteen, palvelun tai tapahtuman todennäköisyys ylittää toleranssirajat

N = havaintoyksiköiden lukumäärä.

Virheellisten tuotteen, palvelun tai tapahtuman todennäköisyys ylittää toleranssiraja lasketaan seuraavan kaavan avulla

$$p = \frac{DPMO}{10^6}, \text{ missä}$$

DPMO = Virheellisten tuotteiden, palveluiden tai tapahtumien lukumäärä miljoonaa mahdollisuutta kohden.

Virheellisten tuotteiden lukumäärän q todennäköisyys voidaan laskea kaavalla:

$$P(q) = \frac{(DPU)^q \times e^{-DPU}}{q!}, \text{ missä}$$

q = arvioitu viallisten tuotteiden lkm (ulkopuolella toleranssien), joka saadaan Poisson-jakaumasta.

Nollalaadun kaava voidaan kirjoittaa (q=0) seuraavasti:

$$FTY = e^{-DPU}.$$

Nollalaadulla tarkoitetaan lähes virheettömyyttä suhteessa asiakasspesifikaatioon (ei absoluuttiseen virheettömyyteen).

2.1.4 Sigmataso

Lyhyen tähtäimen sigma-taso saadaan kaavalla

$$Sigma = \min\left(\frac{YT - \bar{x}}{\sigma}, \frac{\bar{x} - AT}{\sigma}\right).$$

Pitkän tähtäimen sigmatasoon päästään kun lyhyen tähtäimen arvosta vähennetään 1.5 sigmaa.

Vastaavasti, mikäli aineisto on valmiiksi pitkän tähtäimen aineistoa, voidaan laskettuun sigmatasoon lisätä 1.5 sigmaa, jos halutaan esittää lyhyen tähtäimen laatua (Lähde E. Karjalainen).

2.2 DPMO ja sigmatason yhteys

Kirjallisuudessa puhutaan virheellisten määrästä käyttäen useita määrittelyjä. Osa käyttää DPMO:ta (defects per million opportunities) ja osa VPM:ää (values per million). Määritelmästä riippumatta tarkoitetaan kuitenkin ulkopuolella speksien olevaa määrää miljoonaa mahdollisuutta kohti.

Sigmatason ja ulkopuolella speksien per miljoonaa mahdollisuutta kohden vastaa seuraavanlainen yhteys:

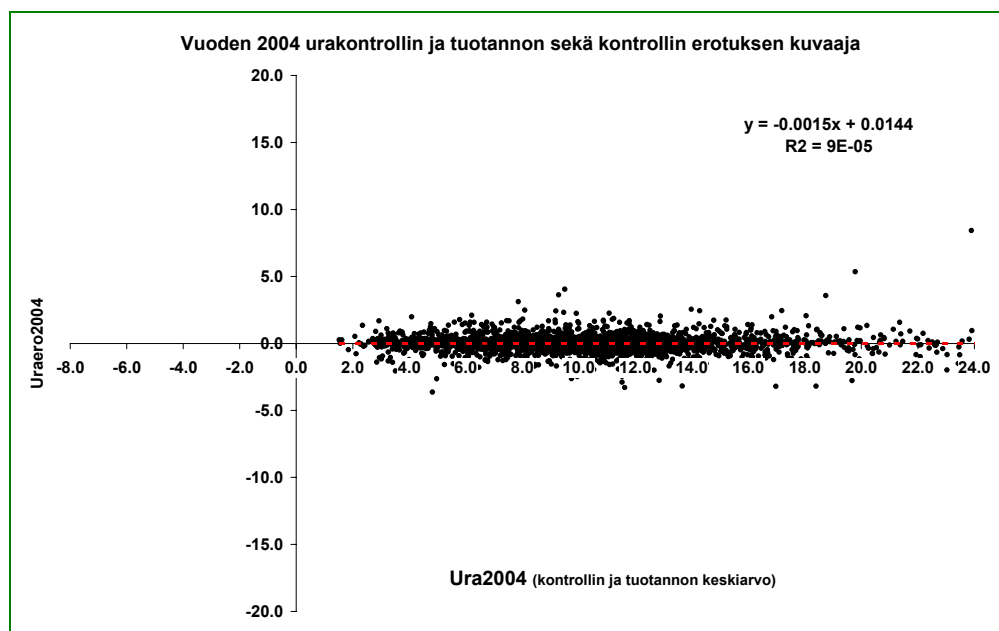
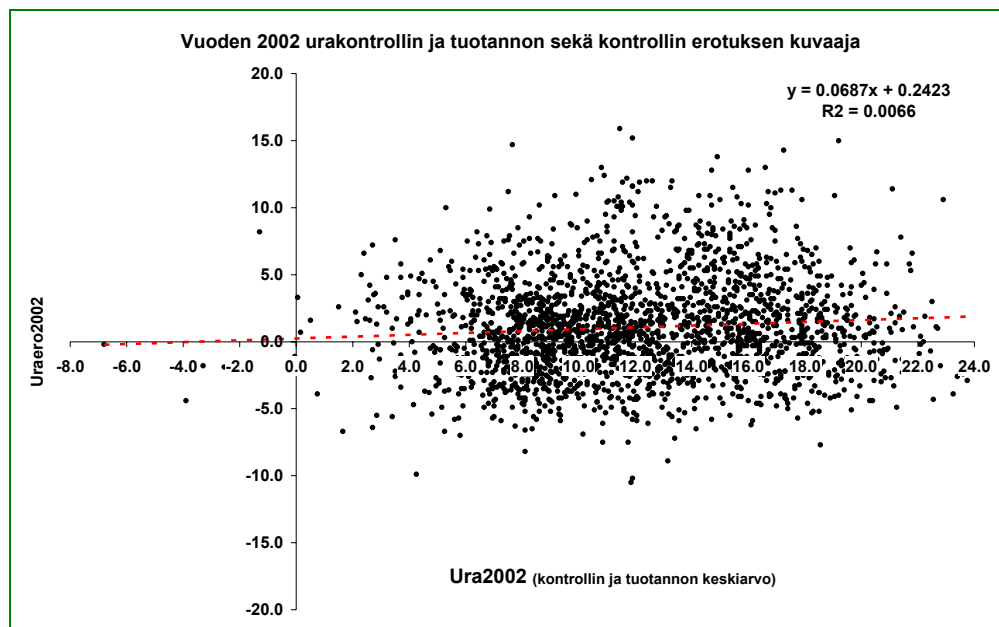
Lähde: Truscott (s. 233):

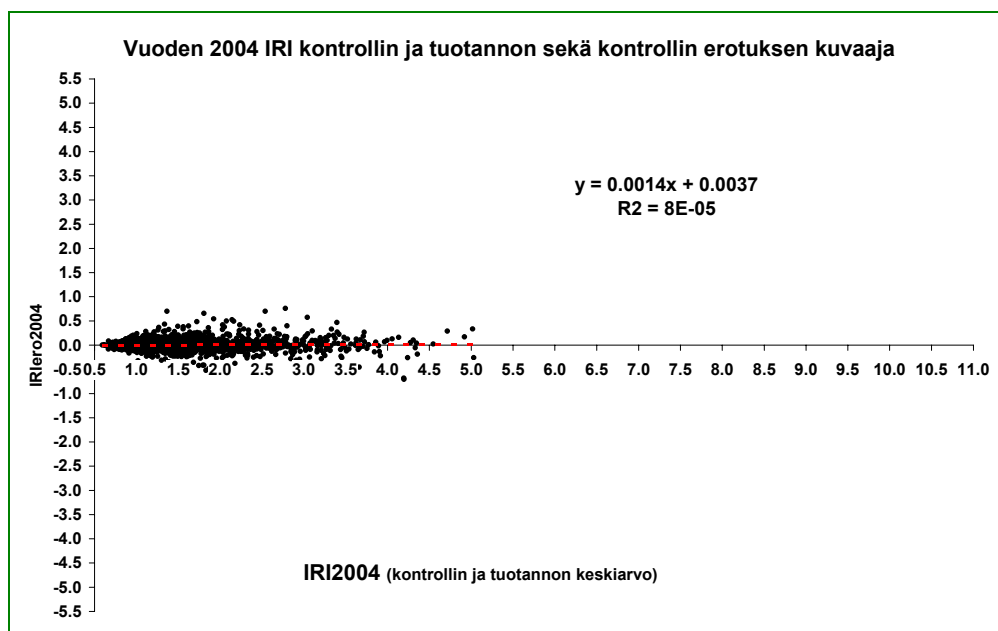
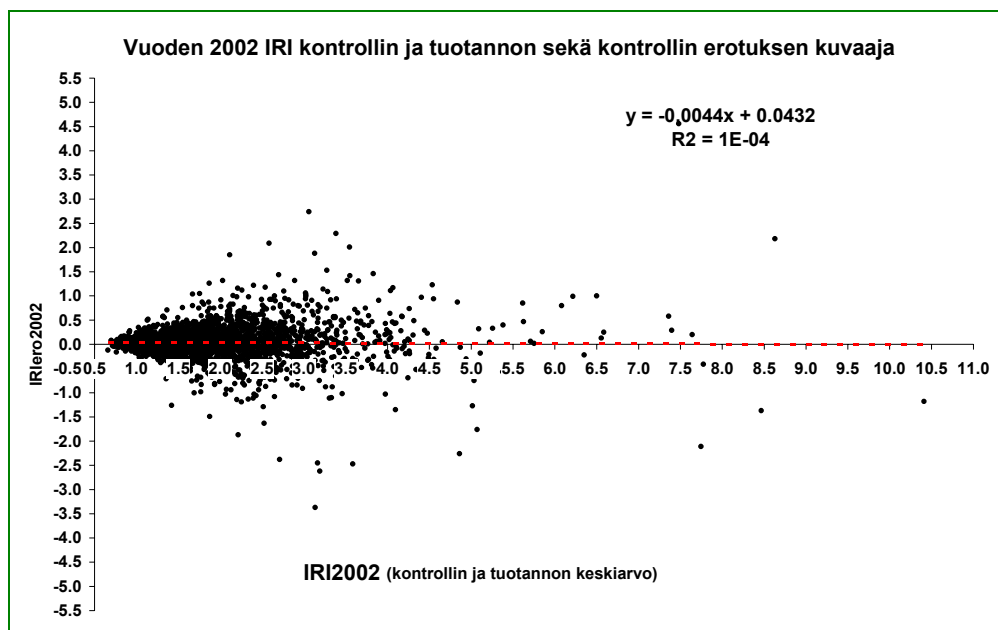
Sigma taso	DPMO/VPM ylärajan yläpuolella	DPMO/VPM alarajan alapuolella	Kokonais VPM eli ulkopuolella speksien
6	3.4	lähellä 0	3,4
5	233	lähellä 0	233
4	6 210	lähellä 0	6210
3	66 807	3,4	66 810
2	308 537	233	308771
1	691 462	6297	697 759

1) sarakkeet 2 ja 3 on muunnettu vastaamaan tilannetta, jossa prosessin keskiarvo on siirtynyt positiiviseen suuntaan. Negatiivisessa tapauksessa sarakkeiden luvut vaihtavat paikkaa.
2) Taulukko on voimassa vain normaalisti jakautuneelle suurelle tilanteessa, jossa ylä- ja alaspesifikaattioraja ovat symmetrisesti nollan molemmin puolin.
3) Sigma arvot vastaavat nyt 1,5 sigman verran sivussa olevan prosessin tilannetta.
4) Osassa Six Sigma kirjallisuutta virheellisten määrän sanotaan tulevan vain siltä puolelta, jonne prosessin keskiarvo on poikennut. Alle 3 Sigman tasolla on hyvä laskea molemmat puolet.
5) VPM=values per million, DPMO=defects per million opportunities.

Taulukkoa tulkittaessa on huomioitava, onko kyseessä lyhyen vain pitkän tähtäimen tuote, palvelu tai tapahtuma.

LIITE 3. KONTROLLI- JA TUOTANTOMITTAUSTEN HAJONTAKUVAT





LIITE 4: SUORITUSKYKYLASKENNAN JAKAUMAKUVAT

