

## **Kunnossapidon materiaalogiikka palvelukokonaisuutena**

12. - 13.10.2004, Järvenpää

### **Case: Materiaalitarpeen ennustaminen kunnossapidossa**

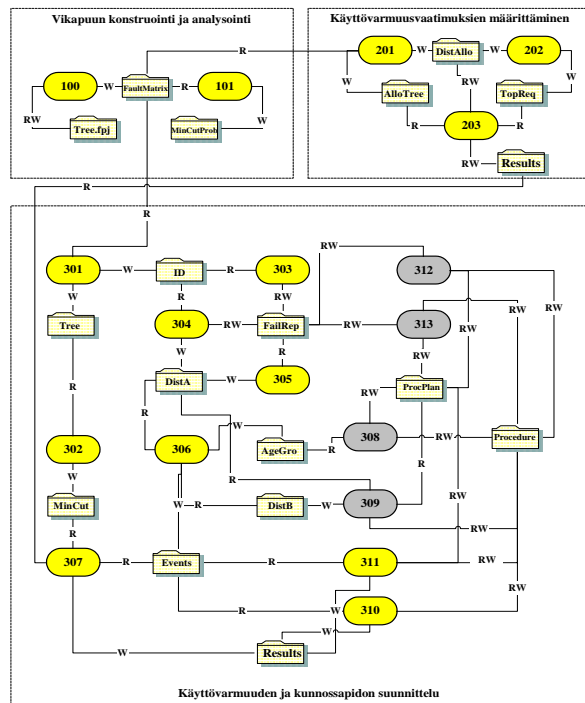
Tausta .....	2
1. Johdanto .....	3
2. Varaosatarpeen synty .....	3
2.1. Vioittavuus $r(t)$ .....	3
2.2. Luotettavuus .....	4
2.3. Kunnossapitostrategiat .....	4
3. Puutekustannusten synty .....	5
4. Varaosien kulutus- ja puutekustannustiedot .....	5
4.1. Yksinkertainen kulutuskohde .....	6
4.2. Osatyypin keston arviointi rasitusryhmittäin .....	7
4.3. Keston parametrien Generic-estimaatit .....	9
4.4. Muun tiedon käyttö keston arviointiin .....	9
4.5. Osatyypin keston lopulliset parametrit .....	9
5. Rypäsrakenteinen kulutuskohde .....	10
5.1. Rypäsrakenteen ja vikaantumisen malli .....	10
5.2. Rypään huoltoja ja vaihtoja kuvaava malli .....	11
5.3. Rypään puutekustannusmalli .....	11
5.4. Rypäsrakenteisen esimerkkikohteen parametrien syöttö .....	11
5.5. Osien tarve kohteessa ja varastosta otto .....	12
6. Varastoa käyttävien kohteiden kulutustiedot .....	13
7. Yhteenveto .....	13

## Tausta

Tekesin *Käyttövarmuus kilpailutekijänä (Käki)* teknologiaohjelmasta (1996-2000) saatujen tuloksien ja ohjelman arviointien perusteella, teollisuuden ja tutkimuslaitosten tarpeeseen tulee kehittää tehokkaita todennäköisyyspohjaisia suunnittelu- ja laskentamenetelmiä. Niiden avulla tuotteiden ja tuotannon käyttövarmuutta voidaan eliniän eri vaiheissa arvioida ja todentaa (kehitys, suunnittelu, testaus, valmistus, käyttö ja kunnossapito). Käki-tutkimusprojektissa on kehitetty tuotteiden ja järjestelmien käyttövarmuuden suunnittelumetodiikkaa ja kehitettyyn metodiikkaan perustuva simulointi- ja laskentaohjelmisto. Suunnittelumetodiikka ja ohjelmisto koostuvat kolmesta osasta (Kuva 1) :

- I. Vikapuun konstruointi ja analysointi
- II. Käyttövarmuusvaatimusten määrittäminen
- III. Käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelu.

- 100 Vikapuun konstruointi  
 101 Minimikatkosjoukkojen etsiminen ja analysointi  
 201 Allokoidavan vikapuun ja sen osien allokointikertoimien määrittely  
 202 Vika- ja korjausaikajakaumien konstruointi asiakasvaatimuksista  
 203 Vika- ja korjausaikajakaumien allokointi suunnittelu-kohteille  
 301 Analysoitavan vikapuun ja sen osien määrittely  
 302 Minimikatkosjoukkojen etsiminen analysoitavasta vikapuusta  
 303 Saatavilla olevien vika- ja korjausaikatietojen esikäsittely  
 304 Asiantuntijatiedoista vika- ja korjausjakaumien konstruointi  
 305 Vika- ja korjausaikajakaumien konstruointi esitiedoista  
 306 Käyttövarmuuden simulointi  
 307 Käyttövarmuuden laskenta simuloiduista tapahtumätiedoista  
**308 - 309 Huollon vaikutuksen arviointi vikataipumukseen**  
 310 - 311 Käyttövarmuuden ja kustannusten laskenta  
**312 Varaosavaraston mitoittaminen**  
**313 Huolto- ja korjausresurssien mitoittaminen**  
 Kaaviokuvassa R = ohjelma lukee tiedostosta ja W = ohjelma kirjoittaa tiedostoon



Kuva 1. Käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnitteluohjelmisto.

Käki-tutkimusprojektin tulosten edelleen kehittämiseksi ja kaupallistamiseksi on käynnistetty jatko-ohjelma (2002-2004), jonka tavoitteena on kehittää todennäköisyyspohjaista käyttövarmuuden suunnittelumetodiikkaa ja simulointi- ja laskentaohjelmistoa huollon vaikutuksen arviointiin, huolto- ja korjausresurssien sekä varaosavaraston mitoittamiseen. Tavoitteena on myös kehittää ohjelmistosta yrityksille käyttäjätasoisella ohjelmistolla tuotteiden ja järjestelmien käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnitteluun ja kehittämiseen niiden eliniän eri vaiheissa. Kuvassa 1 on esitetty, miten tutkimusprojektin tuloksena syntyvät ohjelmat (308, 309, 312 ja 313) liittyvät Käki-projektissa kehitettyyn proto-ohjelmistoon. Tämä kirjoitus kuvaa varaosavaraston mitoittamiseen kehitetyn ohjelman (numero 312) sitä osuutta, jossa varaosatarve ja puutekustannukset määritellään syöttötiedoiksi ohjelman varsinaiseen kustannuslaskenta-osioon, jonka avulla varaston haluttu koko määritellään.

## 1. Johdanto

Teollisuuden kunnossapidon materiaalitarpeita tarkastellaan erityisesti varaosavaraston näkökulmasta. Materiaalit ovat tässä yhteydessä varaosiksi luokiteltavia osia ja laitteita, joiden elinkaarta ja kulutusta vuosien saatossa on mielekästä ja tarpeellista sekä teknisessä että taloudellisessa mielessä seurata. Kunnossapidon materiaalitarvetta lähestytään tarkastelemalla yhtä osaa (varastonimikettä) kerrallaan. Varaosatarve syntyy osien tai laitteiden vioittumisen ja/tai valitun kunnossapitostrategian seurauksena. Syntyneeseen tarpeeseen tulee varaosatoimittajan (ja kunnossapito-organisaation) pystyä vastaamaan sovituksessa ajassa. Varaosatoimittaja on usein oma varaosavarasto, jossa tarvittavan satunnaisen osan odotetaan olevan saatavilla. On totuttu siihen, että varaosavarastot ovat luonnollinen osa kunnossapitotoimintaa. Kannattaa kuitenkin ajoittain pohtia tarvitaanko (omia)varastoja, mitä, missä ja kuinka paljon varastoidaan.

Kirjoituksessa tarkastellaan varaosavaraston mitoittamiseen kehitetyn ohjelman näkökulmasta varaosatarpeen syntyä, valitun kunnossapitostrategian vaikutusta varaosatarpeeseen, varaosan puuttumisesta johtuvia puutekustannuksia sekä niitä materiaalien kulutukseen liittyviä tietoja, jotka ovat riittävät lähtökohdiksi optimaalisen varaosavaraston määrittelemiseksi.

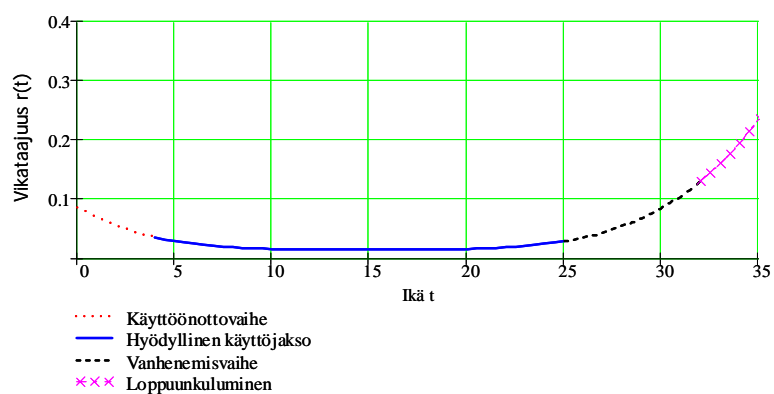
## 2. Varaosatarpeen synty

Varaosatarpeen synnyn perimmäinen syy löytyy erilaisten rasitusten alaisten laitteiden äärellisestä kestoikästä. Kullakin laitteella on laitetyypille ominainen *vikataipumus*. Kestoikä on luonteeltaan satunnainen: mitoitettiinpa laite kuinka pitkää kestoikää silmälläpitäen hyvänsä, on aina mahdollista, että ensimmäinen vika syntyy hyvin pian käyttöönoton jälkeen. Käytännössä voidaan toki olettaa, että oikein mitoitettu, käytetty ja asennettu laite toimii hyvin todennäköisesti mitoitettuun kestoikänsä asti ja jopa paljon sitä kauemminkin.

### 2.1. Vioittuvuus $r(t)$

Laitteiden vioittumista kuvataan usein kuvan 2 mukaisella ammekäyrällä. Käyrä kuvaa suuresta määrästä osia muodostuvan populaation vikataajuutta ajan funktiona (vioittuvuutta). Populaatio voi muodostua samanlaisista osista, esimerkiksi tietynä hetkenä käyttöön otetun paperikoneen samantyyppisistä laakereista, tai erilaisten osien muodostamasta kokonaisuudesta kuten paperikone.

Vioittuneen osan korjaus tapahtuu vaihtamalla osa uuteen (tai uutta vastaavaan) varaosaan. Käyrän alkupää vastaa toimintavaiheen alkuhetkiä, jonka aikana suunnittelu-, valmistus- ja asennusvirheet poistetaan. Varsinaisen hyödyllisen käyttöikävaiheen aikana satunnaisten vikojen aiheuttajia ovat tyypillisesti käyttövirheet ja muutokset ympäristöolosuhteissa. Van-

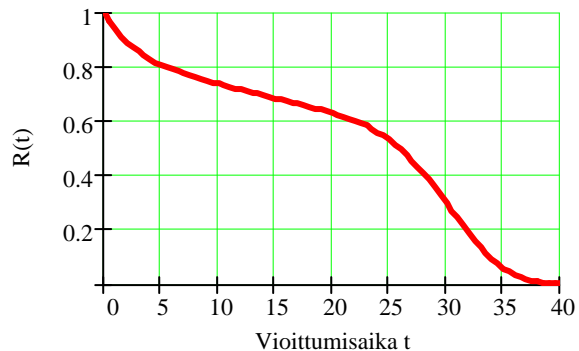


Kuva 2. Laittepopulaation vikataajuutta kullakin ajan hetkellä kuvaava ammekäyrä

henemisvaiheessa laitteen vikataajuus alkaa kasvaa esim. materiaalien väsymisen seurauksena. Tämä vaihe jatkuu laitteen loppuun kulumiseen ja lopulliseen särkymiseen asti. Kuvan käyrä esittää hyödyllistä konseptia, mutta kuten saattaa arvata, niin käytännössä käyrien muodoissa esiintyy huomattavia eroja.

## 2.2. Luotettavuus

Vikataajuuden lisäksi voidaan vioittumista kuvata laitteen luotettavuudella  $R$ . Jos laitteen odotetaan toimiva tietyn ajanjakson, niin sen luotettavuus muuttuu ko. ajanjakson kuluessa. Tarkastellaan  $s$ -ikäistä laitetta: Luotettavuus  $R(t,s)$  on todennäköisyys, että laite toimii vioittumatta ajankohdasta  $s$  alkaen ainakin ajankohtaan  $t$  asti. Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen luotettavuuden  $R$  kuvaaja. Kuvan voidaan nähdä esittävän joko sitä todennäköisyyttä, että tietty laite ei vikaannu hetkeen  $t$  mennessä tai sitä osuutta laitepopulaatiosta, jonka odotetaan toimivan vioittumatta annettuun ajanhetkeen asti.



Kuva 3. Luotettavuusfunktio  $R(t)$

## 2.3. Kunnossapitostrategiat

Laitteiden vioittumishetken arvaamattomuus ja vikojen hyvinkin merkittävät seuraukset ovat pakottaneet laitteiden käyttäjät ja omistajat erilaisiin varotoimenpiteisiin, joilla seurauksia rajoitetaan. Kunnossapidon kannalta varautuminen vioittumiseen tarkoittaa kunnossapitostrategian luontia. Strategiana voi olla:

1. korjaustoimenpiteet vasta vian ilmentyessä,
2. säännölliset toimenpiteet ennalta määrätyn välein laitteiden kuntotilasta riippumatta,
3. korjaustoimenpiteet, kun diagnostiset mittaukset tai kuntoarviot antavat aiheita.

### 2.3.1. Korjaustoimenpiteet vasta vian ilmentyessä

Korjaustoimenpiteisiin ryhdytään, kun vika havaitaan. Varaosavaraosto varautuu satunnaisiin vikoihin pitämällä tietyn määrän varaosia aina varastossa. Strategiana voi olla, että vaihdetaan vain vioittunut osa. Strategiana voi olla myöskin, että vaihdetaan muutkin samanaikaisesti käyttöön otetut samanlaiset osat esimerkiksi akselin molemmat laakerit, vaikka vain toinen olisi vioittunut.

### 2.3.2. Säännölliset toimenpiteet ennalta määrätyn välein laitteiden kuntotilasta riippumatta

Säännöllisellä toimenpiteellä tarkoitetaan tässä osan vaihtamista uuteen määrävälein osan kuntotilasta riippumatta. Strategia voi olla laitteen valmistajan suosittelu, lähtöisin viranomaismääräyksistä tai strategia on itse kehitetty, perustuen omiin kokemuksiin ja muihin tarpeisiin. Varastolla on mahdollisuus varautua varaosatarpeeseen tilaamalla tavarantoimittajalta vastaava määrä osia riittävän ajoissa. Yllättävä varaosatarve ja säännölliset toimenpiteet joudutaan strategiassa kytkemään yhteen, silloin kun yllättävä tarve ilmenee lähellä säännöllisen osanvaihdon ajankohtaa. On useampia vaihtoehtoja:

1. Vaihjetaan vain vioittunut osa. Jatketaan normaalin vaihtostrategian mukaan, jolloin myös vasta vaihdettu osa vaihdetaan seuraavana strategian mukaisena vaihtoajankohdaksi.
2. Kuten 1 mutta jätetään vasta vaihdettu osa vaihtamatta seuraavana strategian mukaisena vaihtoajankohtana.
3. Vaihjetaan vioittunut osa ja muut samanaikaisesti käyttöön otetut osat. Jatkotoimenpiteet näiden osalta kuten kohdissa 1 tai 2.
4. Vaihdetun tai vaihdettujen osien osalta kunnossapitostrategian mukaista normaalivaihtoon liittyvää ajankohtaa muutetaan siten, että vaihtosykli pysyy jatkossa strategian mukaisena ts. seuraavat vaihdot aikaistuvat näiden osien osalta.

### **2.3.3. Korjaustoimenpiteet, kun diagnostiset mittaukset tai kuntoarviot antavat aiheita**

Erilaisin diagnostisin mittauksin voidaan havaita kehittymässä oleva vika. Vian kehittymistä voidaan seurata ja voidaan hyvissä ajoin varautua tarvittaviin korjaustoimenpiteisiin. Tämä tarkoittaa varaosien osalta varaston varautumista varaosatarpeeseen kuten säännöllisten toimenpiteiden yhteydessä edellä.

## **3. Puutekustannusten synty**

Puutekustannuksia tarkastellaan varaston näkökulmasta. Varaosan puute voi johtua siitä, että varasto ei kykene toimittamaan varaosaa tarvittaessa. Tämä voi johtaa edelleen tuotantolaitteiston seisokkiin. Seisokin aikaisesta tuotannon menetyksestä ja siitä seuraavista välillisistä kustannuksista käytetään tässä nimitystä puutekustannus. Varaosatarve voi varaston kannalta olla yllättävä ja ei-yllättävä ja tarpeen luonne on seurausta valitusta kunnossapitostrategiasta. Yllättävään varaosatarpeeseen varaudutaan yleensä pyrkimällä pitämään varastossa niin paljon varaosia, että syntynyt tarve pystytään aina tyydyttämään. Tämä varastostrategia, jolla pyritään varmasti estämään puutekustannusten synty, johtaa mitä ilmeisimmin ylisuuriin varastoihin.

## **4. Varaosien kulutus- ja puutekustannustiedot**

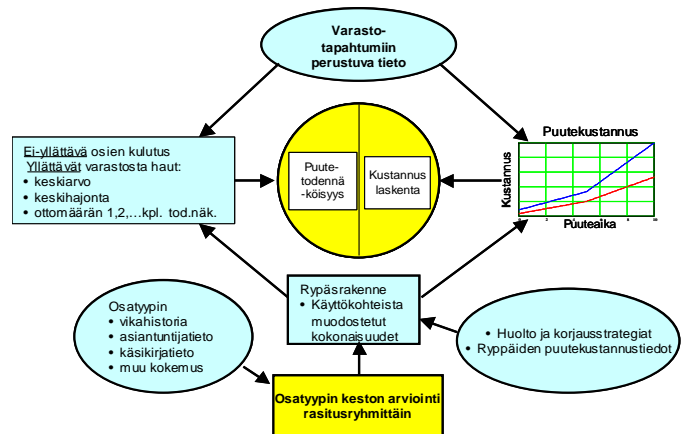
Tarkastelun kohteeksi valitaan yksi osatyypin kerrallaan. *Suunnittelujakso* on mikä tahansa kalenteriin sijoittuva jakso, jonka aikana seurataan valitun osatyypin kulutusta. Varaosien kulutusta aiheuttavat osiin kohdistuvat erilaiset raskaudet osien käyttöpaikoilla. Vioittuneen osayksilön korvaus ajatellaan tapahtuva pääsääntöisesti varastosta haettavalla uudella tai uuden veroisella osalla. Käyttöpaikat ryhmitellään kulutuskohteiksi tai lyhyesti kohteiksi. Kohteiden muodostamisessa on käyttöpaikkojen omistajat otettava huomioon seuraavasti:

- Saman omistajan kaikki käyttöpaikat voidaan aina kerätä yhdeksi kohteeksi (yleissääntö).
- Saman omistajan käyttöpaikoista voidaan myös muodostaa useita kohteita, esimerkiksi jos eri käyttöpaikoissa on hyvin erilainen puutekustannus tai jos puutekustannuksista halutaan enemmän eriteltyä tietoa.
- Jos kustannuslaskenta on oleellinen osa tarkastelua, niin yhteen kohteeseen ei pidä liittää useita omistajia, sillä silloin ne eivät erotu toisistaan kustannuslaskennassa.
- Varaston kannalta voidaan useita asiakkaita/omistajia niputtaa yhdeksi kohteeksi, jos heidän puutekustannuksensa on sama tai lähes sama.

Varaosien kulutus- ja puutekustannus-tietojen lähteet on esitetty kuvassa 4. Kulustietojen päälähteitä on kaksi:

- varasto itse ja siihen liittyvä varaosien kulutuksen kirjanpito,
- osien kulutusta aiheuttavat laitteet, niiden käyttäjät ja kunnossapitäjät.

Puutekustannuksiin liittyvä tieto on luonteeltaan asiantuntijatietoa ja se on hankittava muista kuin edellä esitetyistä lähteistä. Kustannukset on kuitenkin kuvattava, mikäli tavoitteena on varaosan varastoinnin optimointi. Eräiseen kuvaustapaan palataan jäljempänä.



Kuva 4.

## 4.1. Yksinkertainen kulutuskohde

Kulutuskohdetta sanomme yksinkertaiseksi, jos sitä kuvaavat lähtötiedot ovat niin niukat, että ne saavuttavat juuri ja juuri varastosuunnittelun tarvitseman ”minimitason”. On saatavissa vain melko erittelemätöntä kulustietoa, hyvässä tapauksessa kuitenkin saman- tai vastaaventyypisistä osista, suunnittelukohdetta vastaavilta, kuvitelluilta tai olemassa olevilta/olleilta käyttöpaikoilta. Yksinkertaisin ja nopein tapa arvioida varaosien kulutusta on tarkastella kulutusta menneisyydessä perustuen pelkästään varastokirjanpitoon (vrt. kuva 4). Varastokirjanpidon perusteella on määritettävissä varastosta otot edellisinä vuosina sekä hävikki. Tulevan kulutuksen ennustaminen perustuu tällöin siihen oletukseen, että suunnittelu-jakson kulutuksen luonne noudattaa aikaisempien vuosien kulutuksen luonnetta. Varastokirjanpidosta saatavaa tietoa joudutaan täydentämään asiantuntijatietämyksellä, jotta em. ”mi-nimi-taso” saavutettaisiin.

### 4.1.1. Osien kulutus kohteessa suunnittelujaksolla

Suunnitelmaan kuuluvan kohteen kulutuksesta on tavalla tai toisella arvioitava seuraavat läh-tötiedot (lukuarvot on annettu esimerkin vuoksi):

#### Yllättävä kulutus suunnittelujaksolla

- Hakukertojen lukumäärän keskiarvo (kpl) 5.156
- Hakukertojen lukumäärän keskihajonta (kpl) 1.5
- Eri ottomäärien  $i=0,1,..$  todennäköisyydet (0 0.5 0.4 0.1)

#### Ei-yllättävä kulutus suunnittelujaksolla

- Kokonaiskulutus keskimäärin (osia) 4.0

Pääsääntöisesti yllättävä hakukerta johtuu vikatilasta ja ei-yllättävä suunnittelusta huollosta. Yksinkertaisen kulutuskohteen erikoistapauksena voi pitää varaston hävikkiä, joka suorittaa varaston kannalta vain yllättäviä ottoja. Hakukerta viittaa yksittäiseen varastosta hakuun ja ottomäärä viittaa kullakin hakukerralla otettavien varaosien lukumäärään.

### 4.1.2. Kohteen puutekustannukset

Yksinkertaisissa kulutuskohteissa puutekustannukset arvioidaan yhtenäisesti koko kohteelle. Mikä kustannus syntyy, kun kohde joutuu odottamaan osaa, jota se tarvitsee? Puutekustan-nukset mallitetaan yksinkertaisella lineaarisella mallilla, joka muodostuu seuraavasti:

**1 osa puuttuu:**

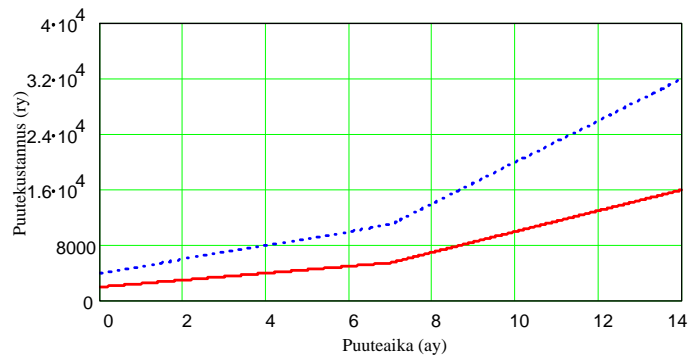
kertakustannus	2000	(€)
aikariippuvuus 0...t0	500	(€/vrk)
aikariippuvuus t0...	1500	(€/vrk)

**2 osaa puuttuu:**

kertakustannus	4000	(€)
aikariippuvuus 0...t0	1000	(€/vrk)
aikariippuvuus t0...	3000	(€/vrk)

Aikariippuvuuden muutoshetki 7 (vrk)

**HUOM:** Hävikin puutekustannukset määritellään luonnollisesti nolliksi.



Kuva 5. Tyypillinen puutekustannuskäyrästä

Puutekustannuksia vastaava puutekustannuskäyrästä on perustyyppiltään kuvan 5 mukainen (yhden osan puute = ehjä viiva, kahden osan puute = pisteviiva). Useamman kuin kahden osan aiheuttama puutekustannus määräytyy yhden ja kahden osan puutteen välisestä erosta.

## 4.2. Osatyyppin keston arviointi rasitusryhmittäin

Toinen varaosien kulutuksen tietolähde on osaa käyttävä laite ja sen käyttöympäristö. Mallia varten kerätään eri tietolähteistä kaikki mahdollinen osatyyppin käyttöä ja vikaantumista koskeva tieto. Kuvan 4 mukaisesti tietolähteitä ovat:

- käyttöpaikat, joissa tarkasteltavaa osaa käytetään, PlantSpecific-tieto;
- asiantuntijat, joille on kertynyt ko. osaan liittyvää henkilökohtaista suunnittelu-, käyttö- ja kunnossapitokokemusta, Expert-tieto;
- valmistajat, maahantuojat, käsikirjat ja vastaavat tietolähteet, Generic-tieto;
- muu kokemustieto saman- tai vastaavantyyppisistä osista.

Em. tietolähteistä kerätyistä tiedoista muodostetaan nyt samat tiedot yllättävälle ja ei-yllättävälle kulutukselle, jotka kohdassa 4.1.1. muodostettiin yksinkertaiselle kulutuskohteelle. Nyt rakennetaan kuitenkin enemmän yksityiskohtia huomioon ottava malli. Tarkasteltavan osatyyppin keston mittaamiseen on valittava jokin luonteva käyttömäärä (esim. käytötunnit) ja käyttömäärän mittaamiseen sopiva yksikkö (ky, esim. tunti). Osan kokema "rasitus" vaikuttaa tietenkin sen keston. Rasituskäsitettä ei tarvitse määrittellä tarkasti, riittää kun suunnittelukohteessa käyvät osat (osapaikat) jaetaan rasitusryhmiin siten, että saman rasitusryhmän jäsenet kokevat oleellisesti yhtä suuren rasituksen (/ky). Seuraavassa oletetaan, että taustalla on tietty rasitusryhmä.

Kulutuskohde	Käyt. nimike	Käyttökohde	Vaihdettu		
			lkm	Vaihto pvm.	
Kulutuskohde 1	23072 CC/W33	KMO hakun 1 vaihde	2	13.6.1994	
			2	17.6.1998	
		KMO hakun 2 vaihde	2	26.6.1990	
			2	24.12.1994	
		(+varavaihde)	2	17.5.1999	
		PK imutela,	1	30.6.1995	
		PK pur.imutela	2	5.4.1995	
		(+varatela)	1	14.12.1995	
			2	4.5.2000	
		Kulutuskohde 2	23072 CC/W33 ja C08	PK konekal.	1
SYM-alatela					
PK konekal.	1			17.9.1998	
SYM-alatela, hoitopuoli					
23072 CC/W33 ja C08	Hakun vaihde			2	6.5.1998
23072 CC/W33	PK, Pick-up imutela			1	27.12.1994
				2	21.10.1999

Kuva 6. Kulutuskohteista saatavasta tiedosta on kerättävä samaan rasitusryhmään kuuluva tieto

#### 4.2.1. Käyttöpaikoilta kerätyn PlantSpecific-tiedon käsittely (sensurointi)

Tyypillistä eri kulutuskohteista kerättyä PlantSpecific-tietoa on kuvassa 6. Kerätystä tiedosta tunnistetaan eri rasiusryhmiin kuuluvat käyttöpaikat. Eri rasiusryhmiin kuuluvat tiedot käsitellään sen jälkeen rasiusryhmittäin. Kuvassa 7 on esimerkki siitä, mihin muotoon kuvan 6 tiedot on muokattava tietokoneella tapahtuvaa jatkokäsittelyä varten. Tietoa kutsutaan sensuroiduksi, koska osan vikaantumusta mallinnettaessa hyödynnetään sekä osan vikaantumiseen liittyvä tieto että myös tieto siitä että osa ei ole vikaantunut siihen mennessä, jolloin se jostain syystä on vaihdettu uuteen. Ensimmäinen rivi sisältää osayksilöiden loppullisen käyttömäärän  $x$  (ky), ja toinen rivi käytön päättymisen syyn:

$$x^T = \begin{array}{c|cccccccccccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 \\ \hline 0 & 837 & 2842 & 1774 & 2072 & 1234 & 1400 & 837 & 2842 & 1774 & 2072 & 1234 & 1400 & 700 & 1167 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

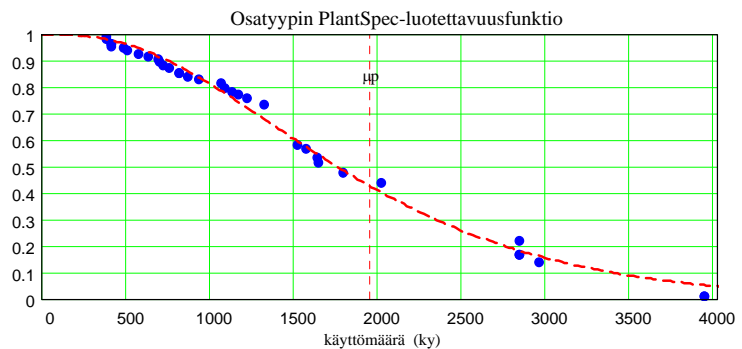
Kuva 7. Esimerkki sensuroidusta PlantSpecific-tiedosta

- 1 tarkoittaa että käyttö päättyi vikaan (sensuroimaton,  $x = \text{elinikä}$ ),
- 0 että käyttö ei päättynyt vikaan (sensuroitu,  $x < \text{elinikä}$ ).

Tämän tiedon perusteella saadaan osatyyppin keskiarvo ( $\mu_p$ ), hajonta ( $\sigma_p$ ):

Keskiarvo  $\mu_p = 1960.9$   
 Hajonta  $\sigma_p = 1089.2$

sekä luotettavuusfunktio (kuva 8). Sovituksen taustalla on Gamma-jakaumaperhe.



Kuva 8. Sensuroidun datan perusteella konstruoitu tiettyyn rasiusryhmään kuuluvan osatyyppin luotettavuusfunktio

#### 4.2.2. Osatyyppin keston parametrien Expert-estimaatit

Asiantuntijoiden arvio tarkasteltavan osan vikaumisesta. Asiantuntijoiden Expert-tiedot ovat ehkä tyypillisimmin luotettavuustodennäköisyyksiä ( $P$ ), joihin suunnittelija saattaa liittää oman arvionsa asiantuntijan "pätevyydestä" ( $w$ ).

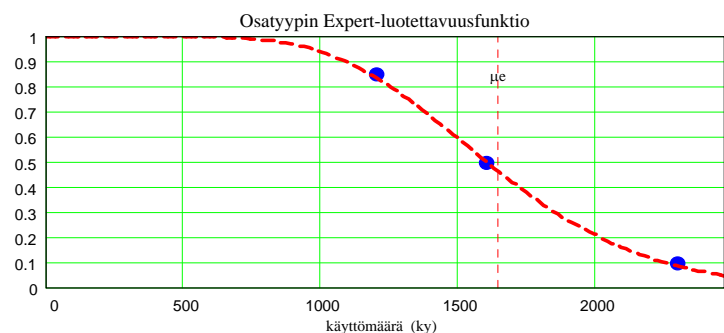
Kestää ainakin

$t_0 = 1200$ (ky)	$P_0 = 0.85$	$w_0 = 1$
$t_1 = 1600$ (ky)	$P_1 = 0.5$	$w_1 = 2$
$t_2 = 2300$ (ky)	$P_2 = 0.1$	$w_2 = 1$

Jne.

Expert-tiedosta lasketaan keskiarvo, hajonta ja konstruoidaan luotettavuusfunktio (kuva 9):

Keskiarvo  $\mu_e = 1649.1$   
 Hajonta  $\sigma_e = 459.2$



Kuva 9. Expert-tiedosta konstruoitu luotettavuusfunktio

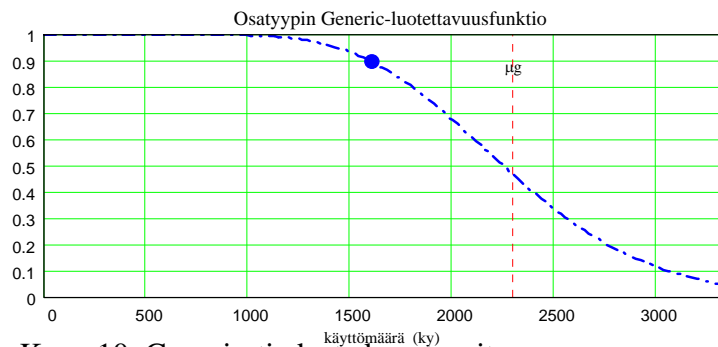
### 4.3. Keston parametrien Generic-estimaatit

Generic-tieto on valmistajan, maahantuojan tai vastaavan antama arvio osan vikataipumuksesta. Se voi perustua myös teoreettisiin laskelmiin, vrt. laakerien kestoikälaskelmat. Valmistajan tai maahantuojan (tms.) antamat Generic-tiedot ovat tyypillisesti:

Keskimmääinen kesto 30000 (ky)  
 Kestää ainakin 7000 (ky) TN:llä 0.90  
 Näistä tiedoista lasketaan keskiarvo ja hajonta

Keskiarvo  $\mu_g = 2300$   
 Hajonta  $\sigma_g = 575.6$

sekä konstruoidaan luotettavuusfunktio kuva 10.



Kuva 10. Generic-tiedosta konstruoitu luotettavuusfunktio

### 4.4. Muun tiedon käyttö keston arviointiin

Aina ei ole käytettävissä niin yksityiskohtaista osien vikaantumiseen ja vaihtamiseen perustuvaa tietoa kuin edellä. Joskus on saatavissa vain esimerkiksi seuraavanlaista PlantSpec-tyyppistä lukumäärätietoa saman- tai vastaavantyyppisistä osista suunnittelukohtetta vastaavilta, olemassa olevilta/olleilta tai kuvitelluilta käyttöpaikoilta:

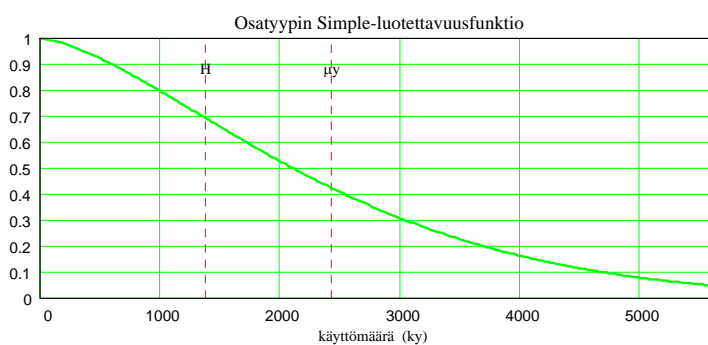
Osien käyttömäärät yhteensä (ky)	15000
Vikaantuneita osayksilöitä (kpl)	4
Ilman vikaa vaihdettuja osia (kpl)	9
Weibull-muotoparametri ( $\beta > 0$ )	1.5

Oletetaan myös, että tämän datan taustalla on voimassa seuraava käytäntö: *Kun osayksilö saavuttaa suurin piirtein tietyn (mahdollisesti tuntemattoman) käyttömäärän ("huoltoväli" H), niin se vaihdetaan, ellei se sitä ennen ole ehtinyt vikaantua.*

Suunnittelijalla saattaa olla perusteltu käsitys tavallisesti käytettävästä huoltovälistä H. Samoin voi suunnittelijalla olla käsitys osatyypin keston Weibull-muotoparametrin  $\beta$ , koska Weibull-jakaumaperheittä on perinteisesti käytetty paljon teknisissä elinikä tarkasteluissa. Koska H on funktio  $\beta$ :sta, muiden parametrien pysyessä muuttumattomina, voi suunnittelija hakea sopivan kompromissin. Edellä olevilla valinnoilla saamme seuraavat tulokset.

$H = 1381.8$   
 Keskiarvo  $\mu_y = 2430.3$   
 Hajonta  $\sigma_y = 1650.2$

Luotettavuusfunktio on kuvassa 11.



Kuva 11. Yksinkertaisesta datasta konstruoitu luotettavuusfunktio

### 4.5. Osatyypin keston lopulliset parametrit

Edellä eri tietolähteiden antamat estimaatit keskiarvolle ja -hajonnalle voidaan lopuksi painottaa vielä "arvonsa" mukaisesti (w):

PlantSpec	wp = 3	$\mu_p = 1960.9$	$\sigma_p = 1089.2$
Expert	we = 1	$\mu_e = 1649.1$	$\sigma_e = 459.2$
Generic	wg = 1	$\mu_g = 2300$	$\sigma_g = 575.6$
Yksinkertainen	wy = 1	$\mu_y = 2430.3$	$\sigma_y = 1650.2$

Yhdistely tuottaa nyt *valittuun rasitusryhmään* kuuluvien osien kestoparametrien lopulliset arviot:

**Keskiarvo** (ky)  $\mu = 2043.7$   
**Keskihajonta** (ky)  $\sigma = 1096.6$   
**Mediaani** (ky)  $S(0.5, \mu, \sigma) = 1851.2$   
**95%-kvantiili** (ky)  $S(0.05, \mu, \sigma) = 4115.7$

Lopullinen yhdistetty luotettavuusfunktio on esitetty kuvassa 12.

## 5. Rypäsrakenteinen kulutuskohte

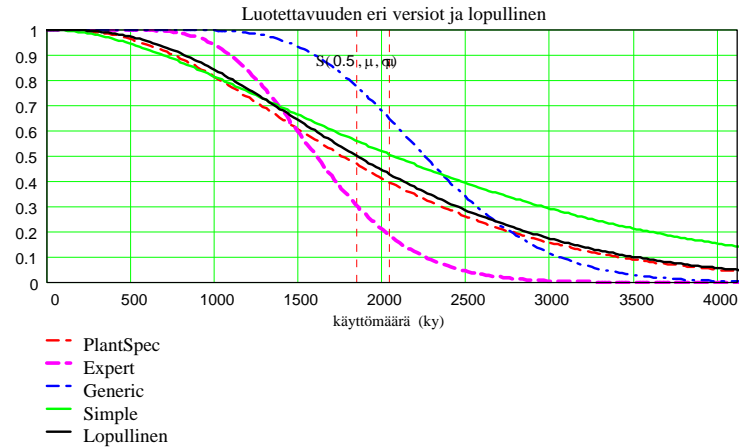
Edellä määriteltyä yllättävää ja ei-yllättävää *kulutusta* sekä *puutekustannuksia* on joskus syytä käsitellä tarkemmin. Tarkasteltavan osatyypin kesto on edellä arvioitu sellaisilla rasituksilla, jotka esiintyvät osatyypin käyttöpaikoissa. Rasitusryhmän osien keston keskiarvon ja hajonnan perusteella arvioidaan, paljonko kulutusta syntyy vikaantumisen takia. Kulutukseen vaikuttavat myös käyttöpaikkojen väliset riippuvuudet, niiden muodostamat kokonaisuudet, käyttömäärät suunnittelujakson aikana, kunnossapitostrategia so. osien vaihtostrategiat ja huoltovälit sekä huollon varmuus ja laatu. Mahdollisen puutekustannuksen arviointiin taas vaikuttavat ne (todelliset) kustannukset, jotka eri käyttöpaikat tai niiden kokoelmat kohteessa aiheuttavat, jos tuotantolaitteisto käyttöpaikkojen varaosien puutteesta johtuen joutuu seisomaan käymättömänä. Edellä mainitut seikat voidaan huomioida keräämällä kulutuskohteen sisältämät käyttöpaikat ns. ryppäiksi. Tällaista kohdetta sanotaan jatkossa rypäsrakenteiseksi. Yhdessä kulutuskohteessa voi siten olla useita ryppäitä. Rypäsrakenteen syynä voi olla samaan laitteeseen kuuluvat osat (esim. laakeripari), korjattavuus, luoksepäästävyys, erilaiset redundanssit, puutekustannukset, tms.

### 5.1. Rypäsrakenteen ja vikaantumisen malli

Eräeseen ryppääseen kuuluvien osayksilöiden lukumäärä merkittäköön  $r$ , ja ryppään (yllättävä) vikaantuminen määritellään tapahtuvan silloin, kun ainakin  $s/r$  osaa on vikaantunut. ("Korjaus" ja osien tarve alkavat silloin.)

*Esimerkkejä:*

- Jos ei ole mahdollista, tarpeellista tai luonnollista jakaa kulutuskohtetta ryppäisiin, niin silloin ryppään osien lukumäärä on yksi.
- Valinta  $s = 1$  merkitsee sitä, että rypäs tulkitaan vikaantuneeksi heti, kun yksi sen osista vikaantuu.
- Valinta  $s = r$  taas tarkoittaa, että rypäs vikaantuu vasta silloin, kun kaikki osat ovat vikatilassa.
- Jos kunnan diagnosointi ja siitä tietyn ajan kuluttua sovittu ei-yllättävä vaihto kohdistuu *yksittäiseen* osaan, niin tällainen osa täytyy valita yhden osan ryppäiksi.

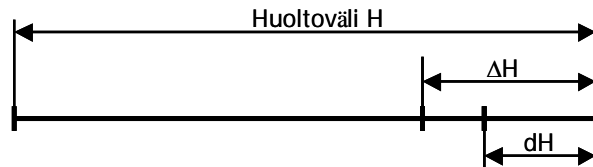


Kuva 12. Eri tietolähteiden yksittäiset luotettavuusfunktiot ja niiden yhdistetty painokertoimilla painotettu luotettavuusfunktio.

## 5.2. Ryppään huoltoja ja vaihtoja kuvaava malli

Samaan ryppäeseen kuuluvien kaikkien osien käyttömäärät oletetaan ”suunnilleen” samaksi. Sen sijaan eri ryppäiden käyttömäärien ei tarvitse olla sama. Tarkasteltava rypäs vaihdetaan kokonaan uudeksi viimeistään huoltovälin  $H$  (ky) päästä (huom. huoltoväli määritetään tässä käyttömääränä esim. käyttötunteina ei kalenteriaikana).

Ryppään vikaantumisen ajankohta suhteessa seuraavaan suunniteltuun rypäsvaihtoon voi vaikuttaa suoritettaviin toimenpiteisiin. Jos ryppään vikaantumisen hetki on käyttömäärässä kauempana kuin huoltomarginaali  $\Delta H$  (ky) seuraavasta suunnitellusta rypäsvaihdosta, niin vaihdetaan vain ryppään vikaantuneet osat ja seuraava suunniteltu rypäsvaihto on edelleen suunnitellussa paikassa. Muuten koko rypäs vaihdetaan ja seuraava suunniteltu rypäsvaihto on sitten tästä käyttömäärän  $H$  (ky) päässä. Kuitenkin jos ollaan vähintään  $dH$ :n päässä suunnitellusta rypäsvaihdosta, niin suunnitelman mukainen rypäsvaihto jätetään tekemättä ja myöhempien suunnitelma pysyy ennallaan.



Kuva 13. Huoltoväli  $H$  ja huoltomarginaalit.

Kuitenkin jos ollaan vähintään  $dH$ :n päässä suunnitellusta rypäsvaihdosta, niin suunnitelman mukainen rypäsvaihto jätetään tekemättä ja myöhempien suunnitelma pysyy ennallaan.

*Esimerkki:* Huoltomarginaali on nolla ( $\Delta H = 0$ ), niin silloin ryppään vikaantuessa vaihdetaan aina vain vikaantuneet osat, ja seuraava suunniteltu rypäsvaihto on edelleen suunnitellussa paikassa.

*Esimerkki:* Jos tällaisia suunniteltuja rypäsvaihtoja ei suunnittelujakson aikana ole, eli vaihtoja tapahtuu ainoastaan kun rypäs on vikaantunut, niin silloin ainoat mielekkäät vaihtoehdot huoltomarginaaliksi ovat:

- huoltomarginaali  $\Delta H$  on sama kuin huoltoväli, jolloin vaihdetaan aina koko rypäs,
- huoltomarginaali  $\Delta H$  on nolla, jolloin vaihdetaan aina vain vikaantuneet osat.

Ryppään suunniteltu rypäsvaihto voi jostakin syystä jäädä joskus tekemättä, eli huoltoväli voi venyä kaksinkertaiseksi, samoin ryppäeseen vasta asennettu osa voi myös jostakin syystä vikaantua heti vaihdon jälkeen.

## 5.3. Ryppään puutekustannusmalli

Ryppään puutekustannukset määritellään samalla mallilla kuin yksinkertaisen kohteen puutekustannukset edellä kohdassa 4.1.2.

## 5.4. Rypäsrakenteisen esimerkkikohteen parametrien syöttö

Se, kuinka luontevasti tarkasteltavan kulutuskohteen yksityiskohdat saadaan sopimaan eo. mallin määritelmiin ja parametreihin, riippuu hyvin monesta seikasta. Joskus on useita järkeviä vaihtoehtoja, joskus kohde on sellainen, että on tyydyttävä kompromisseihin. Käyttöön otetut parametrit, osien rasisryhmät, ryppään rakenneparametrit sekä ryppään puutekustannuksen parametrit muodostavat kaksi matriisia. Nämä karakterisoivat tämän jälkeen kokonaan kyseisen kulutuskohteen.

Esimerkki:

$n$  = samaa tyyppiä olevien ryppäiden lkm

$r$  = ryppään osien lukumäärä

$s$  = ryppään vikakriteeri

$H$  = huoltoväli (ky)

$\Delta H$  = huoltorytmin siirtyminen (ky)

$dH$  = seuraava rypäsvaihto jää tekemättä (ky)

$K$  = käyttömäärä suunnittelujaksolla (ky)

$\varepsilon$  = TN että huolto jää tekemättä

$\delta$  = TN että asennettu osa vikaantuu heti

$\phi$  = ryppään osan (nro  $i$ ) rasisusryhmä

Yksi osa puuttuu

Kertakustannus  $a1$  (ry)

Ajasta riippuva (0... $t0$ )  $k1$  (ry/ay)

Ajasta riippuva ( $t0$ ...)  $m1$  (ry/ay)

Kaksi osaa puuttuu

Kertakustannus  $a2$  (ry)

Ajasta riippuva (0... $t0$ )  $k2$  (ry/ay)

Ajasta riippuva ( $t0$ ...)  $m2$  (ry/ay)

Aikariippuvuuden muutoshetki  $t0$  (ay)

$n$	1	2
$r$	2	3
$s$	2	1
$H$	4001	1500
$\Delta H+dHi$	0	400+100i
$K$	4000	3000
$\varepsilon$	0.05	0.05
$\delta$	0.05	0.05
$\phi$	1	1
$\phi$	1	2
$\phi$	0	2
$\phi$	0	0

$a1$	2000	0
$k1$	400	500
$m1$	2000	2000
$a2$	2000	0
$k2$	1000	800
$m2$	3500	3000
$t0$	7	14

Yksi sarake kuvaa yhtä *rypästyyppiä* ja samaa tyyppiä olevien ryppäiden lukumäärä ilmoitetaan *kopiomäärällä*  $n$ .

## 5.5. Osien tarve kohteessa ja varastosta otto

Kappaleessa 5 on käsitelty yhden rypäsrakenteisen kulutuskohteen parametrien määrittelyä varaosavaraston mitoittamiseen kehitettyyn ohjelman syöttötiedoiksi. Ohjelma laskee tulokset stokastisen simuloinnin menetelmin. Tuloksena syntyy tiedosto, joka sisältää kohteen kunkin ryppään eri syistä aiheuttaman kulutuksen monien (simuloitujen) suunnittelujaksojen aikana. Simuloinnin tuloksena syntyvästä rypäskohtaisesta raakadatasta on poimittavissa monentyyppistä tietoa kohteen käyttäytymisestä.

Poimitaan tässä esimerkkinä osien tarpeeseen liittyvät tiedot.

**Tapaus 1.** Rypäsvikojen lukumääriä:

Vaihdetaan vain vikaantuneet osat	keskiarvo	6.399	keskihajonta	2.21
Vaihdetaan koko rypäs	keskiarvo	1.993	keskihajonta	0.995
Yhteensä		8.392		2.395
Eri tarvemäärien todennäköisyydet (0,1,2, jne.):		(0 0.565 0.198 0.237)		

**Tapaus 2.** Suunniteltujen rypäsvaihtojen lukumäärä:

	keskiarvo	1.909	hajonta	1.001
Eri tarvemäärien todennäköisyydet:		(0 0 0 1)		

**Kokonaistarpeeksi** suunnittelujaksolla muodostuu siten 19.764 osaa.

Edellä oleva tarvetarkastelu antaa tietoa kohteen kulutuksesta. *Hakukerta* varastosta on usein "sama" kuin tarvekerta, ja *ottomäärä* "sama" kuin tarvemäärä. Suunnittelijan on lisäksi määriteltävä mikä haku on varaston kannalta yllättävä mikä ei-yllättävä. Ryppään vikaantuminen on yleensä yllättävä ja suunniteltu rypäsvaihto taas ei-yllättävä.

Käytännön sovelluksissa tulkinta ei kuitenkaan aina ole näin yksioikoinen. Esimerkiksi jos osien kunnonseuranta osoittaa, että rypäs on pian vikaantumassa, niin tulevaa vaihtohetkeä voi perustellusti pitää vikaantumishetkenä. Osatarve ei kuitenkaan ole varastolle yllättävä, jos varasto saa tiedon ennen tulevaa hakuhetkeä. Tämä mahdollisuus on hoidettavissa seuraavalla lisätiedolla:

Ei-yllättävien rypäsvikojen osuus ( $p$ ) esim. 30%

Varastosta otto suunnittelujaksolla on lopulta seuraava:

**Yllättävä varastosta otto.** (Tapaus 1,  $1 - p = 70\%$ )

Hakukertojen lukumäärä keskiarvo = 5.874 hajonta = 2.144

Eri ottomäärien todennäköisyydet (0, 1,2, jne.) (0 0.565 0.198 0.237)

Yllättävä otto yhteensä (osia) 9.826

**Ei-yllättävä varastosta otto.**

Tapaus 1, $p = 30 \cdot \%$	4.211
Tapaus 2, 100 %	5.727
Ei-yllättävä otto yhteensä (osia)	9.938
<b>Kokonaisotto suunnittelujaksolla</b>	19.764 osaa

## 6. Varastoa käyttävien kohteiden kulutustiedot

Edellä käsiteltiin yksittäisten kulutuskohteiden varaosien kulutustietoja. Kulutuskohteita on kolmea perustyyppiä: hävikki, yksinkertainen kulutuskohde ja rypäsrakenteinen kulutuskohteen hävikkiä lukuunottamatta muita kulutuskohdetyyppijä voi olla useita riippuen suunnittelijan tarpeista ja käytössä olevista kulutustiedoista, kuten edellä on kuvattu. Varastosuunnitteluohjelma koostaa kaikkia kulutuskohteita koskevat kulutustiedot yhteen tiedostoon, kuva 14. Yhden kulutuskohteen tiedot ovat yhdellä rivillä:

$$KL^T =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1.6	1.265	0	0.75	0.25	0	0	0
1	1	4	5.156	1.5	0	0.5	0.4	0.1	0	0
2	2	7.089	8.45	2.359	0	0.578	0.193	0.229	0	0

Kuva 14. Tarkasteltavan osatyyppin kulutustiedot.

yhdellä rivillä:

( $i \quad vk_i \quad m_i \quad \Delta_i \quad M_{i,0} \quad M_{i,1} \dots$ )

missä  $i$  = kulutuskohteen numero

$vk_i$  = ei-yllättävän kulutuksen keskiarvo

$m_i$  = varastolle yllättävien hakukertojen lukumäärän keskiarvo

$\Delta_i$  = edellistä vastaava keskihajonta

$M_{i,j}$  = ottomäärän  $j$  todennäköisyys yllättävässä haussa

## 7. Yhteenveto

Kunnossapidon materiaalitarvetta on tarkasteltu varaosatarpeen ja varaston näkökulmasta. Varaosatarve syntyy erilaisten rasiusten alaisen osan kulumisen seurauksena. Kulumisen johtaa ennen pitkää osan vioittumiseen (kappale 2). Tieto tarkasteltavan osatyyppin vikataipumuksesta saadaan seuraamalla niitä käyttöpaikkoja, joissa ko. osatyyppi on käytössä (kappale 4). Täydentävää tietoa vikataipumuksesta saadaan myös asiantuntijoilta, kirjallisuudesta, suunnittelijoilta, valmistajilta yms.. Vikataipumuksen, rasiuksen ja osapaikkojen keskinäisten riippuvuuksien perusteella voidaan simulointia hyväksi käyttäen tuottaa tarkasteltavan osatyyppin kulutuskohdekohtainen varaosien kulutustieto (kappale 5). Mikäli käytettävissä olevat tiedot eivät anna mahdollisuutta edellä kuvattuun yksityiskohtaiseen kulutuksen ennustamiseen, voidaan kulutusta lähestyä myös yksinkertaisemmalla tavalla (kappale 4). Osan puuttuminen varastosta silloin kun sitä tarvitaan, saattaa johtaa tuotantolaitteiston seisokkiin ja aiheuttaa sitä kautta puutekustannuksia (kappaleet 3). Puutekustannuksia on perinteisesti pyritty välttämään pitämällä riittävän suurta varaosavarastoa, joka toisaalta aiheuttaa turhia pääomakustannuksia.

### Lähde

Hagmark, Per-Erik. 2003. Varaston suunnittelu, Simulointi ja laskentaohjelmiston rakenne ja toimintaperiaate. TTY/Koneensuunnittelun laitos. 46s.