

# **Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi**

## **Esitutkimus**

Juha Forsström



ISBN 951-38-6615-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 2000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026



|  |  |                        |
|--|--|------------------------|
| Tekijä(t)<br>Forsström, Juha   |  |                        |
| Nimeke<br><b>Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi</b><br><b>Esitutkimus</b>  |  |                        |
| Tiivistelmä<br>Työssä esitellään riskianalyysin perusteet ja sovelletaan niitä suomalaisen ydinjätehuoltoympäristöön. Ydinvoimayhtiöt ovat vastuussa kaikista ydinjätehuollon kustannuksista ydinjätteiden loppusijoitus mukaan lukien. Ydinvoimayhtiöt laativat vuosittain ydinjätehuollon kustannusarviot eli jätehuoltokaaviot taloudellista varautumista koskevien päätösten pohjaksi. Kaavioissa oletetaan, että laitokset jouduttaisiin purkamaan kyseisen vuoden lopussa, joten kustannustaso määritetään ko. vuoden kustannustason mukaan.<br><br>Projektissa laadittiin ydinjätehuollon kustannusriskien analysointiin soveltuva Monte Carlo -simulointimalli, jolla laskettiin alustavia tuloksia. Epävarmuuden kuvaukseen eli osakustannusten vaihteluvälin arviointiin käytetty lähtötietoaineisto muodostettiin kaavamaisesti nykykäytännön mukaisen aineiston epävarmuuskertoimista. Näin saatiin oikeantyyppisiä lähtöarvoja, joiden lukuarvot eivät välttämättä vastaa kustannusten todellista vaihteluväliä. Sen vuoksi tulosten numeroarvotkaan eivät sovellu varautumispäätelmien tekoon. Tarkoitus oli demonstroida, millaisia tuloksia on saatavissa. Sen perusteella voidaan tehdä päätös hankkeen jatkosta.<br><br>Saatujen kokemusten mukaan jatkotyössä tulee keskittyä ensinäkin lähtötietoaineiston luontiin ja toiseksi epävarmuuksien keskinäisten vuorovaikutusten identifiointiin ja niiden huomiointiin (eliminointiin) laskentamallissa. Mallin tulisi olla sellainen, että vuosittain päivitettävää jätehuoltokaaviota muokattaisiin ohjelmallisesti varsinaisen riskianalyysin lähtötietoaineistoksi. Osakustannusten vaihteluvälistä on tehtävä erillinen arvio, joka täytyy päivittää aina silloin, kun ko. toimenpiteen suorittamisen suunnitelma muuttuu. Tässä työssä kehitetty vaihteluvälin muodostamistapa voi soveltua viimeistellynkin mallin pohjaksi, mutta asian varmistaminen edellyttää osakustannusten tarkkaa läpikäyntiä. Se on mahdollista vain yhteistyössä voimayhtiöiden ja Posiva Oy:n kanssa. |  |                        |
| Avainsanat<br>nuclear power plants, nuclear waste management, radioactive wastes, nuclear waste disposal, spent fuels, risk analysis, costs, simulation models, Monte Carlo simulation, waste disposal systems   |  |                        |
| ISBN<br>951-38-6615-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )  |  |                        |
| Avainnimeke ja ISSN<br>VTT Working Papers<br>1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )   |  | Projektinumero<br>4336 |
| Julkaisuaika<br>Joulukuu 2006  | Kieli<br>Suomi, engl. tiiv.  | Sivuja<br>51 s.        |
| Projektin nimi<br>TEPE_MC  | Toimeksiantaja(t)<br>Kansallisen ydinjätehuollon ohjelma KYT                       |                        |
| Yhteystiedot<br>VTT<br>Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT<br>Puh. vaihde 020 722 111<br>Faksi 020 722 7026   | Julkaisija<br>VTT<br>PL 1000, 02044 VTT<br>Puh. 020 722 4404<br>Faksi 020 722 4374 |                        |

Published by



Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 64  
VTT-WORK-64

|   |   |                        |
|---|---|------------------------|
| Author(s)<br>Forsström, Juha  |   |                        |
| Title<br><b>Cost risk analysis of radioactive waste management<br/>Preliminary study</b>  |   |                        |
| Abstract<br><p>This work begins with exposition of the basics of risk analysis. These basics are then applied to the Finnish radioactive waste disposal environment in which the nuclear power companies are responsible for all costs of radioactive waste management including long-term disposal of spent fuel. Nuclear power companies prepare cost estimates of the waste disposal on a yearly basis to support the decision making on accumulation of resources to the nuclear waste disposal fund. These cost estimates are based on the cost level of the ongoing year.</p> <p>A Monte Carlo simulation model of the costs of the waste disposal system was defined and it was used to produce preliminary results of its cost risk characteristics. Input data was synthesised by modifying the original coefficients of cost uncertainty to define a cost range for each cost item. This is a suitable method for demonstrating results obtainable by the model but it is not accurate enough for supporting decision making.</p> <p>Two key areas of further development were identified: the input data preparation and identifying and handling of (i.e. eliminating or merging) interacting cost elements in the simulation model. Further development in both of the mentioned areas can be carried out by co-operating with the power companies as they are the sources of the original data.</p> |   |                        |
| Keywords<br>nuclear power plants, nuclear waste management, radioactive wastes, nuclear waste disposal, spent fuels, risk analysis, costs, simulation models, Monte Carlo simulation, waste disposal systems  |   |                        |
| ISBN<br>951-38-6615-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )   |   |                        |
| Series title and ISSN<br>VTT Working Papers<br>1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )  |   | Project number<br>4336 |
| Date<br>December 2006   | Language<br>Finnish, Engl. abstr.   | Pages<br>51 p.         |
| Name of project<br>TEPE_MC  | Commissioned by<br>Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management (KYT-programme)   |                        |
| Contact<br>VTT Technical Research Centre of Finland<br>Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland<br>Phone internat. +358 20 722 111<br>Fax +358 20 722 7026  | Publisher<br>VTT Technical Research Centre of Finland<br>P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland<br>Phone internat. +358 20 722 4404<br>Fax +358 20 722 4374 |                        |

# Alkusanat

Voimayhtiöt toimittavat ydinjätehuollon kustannusarviot eli jätehuoltokaaviot vuosittain kauppa- ja teollisuusministeriölle (KTM) taloudellista varautumista koskevien päätösten pohjaksi. KTM pyrkii varmistamaan voimayhtiöiden tekemien laskelmien luotettavuuden pyytämällä asiantuntijalausunnot vuosittain sekä Säteilyturvakeskukselta että VTT:ltä.

Olen osallistunut tähän vuosittaiseen tarkistusprosessiin useita kertoja. Tämän työn idea on syntynyt halusta tarkastella kustannusepävarmuuden ongelmaa nykyisestä poikkeavalla tavalla tavoitteen ollessa kokonaiskustannusten vaihteluvälin arviointi. Lähestymällä ongelmaa kustannusriskin näkökulmasta on mahdollista tarkastella kustannuksia ja riskiä yhtä aikaa. Tällöin voidaan vastata esimerkiksi siihen kysymykseen, kuinka suurella todennäköisyydellä kustannukset ylittävät jonkin tietyn kustannustason. Nykykäytännön mukaisen vain yhden kustannusluvun tuottavan menetelmän avulla tällainen kysymys jää avoimeksi.

Tämä työ on esitutkimustyyppinen, eikä tässä ole sen vuoksi ollut mahdollisuutta paneutua yksittäisten kustannuserien vaihteluvälien määrittämiseen sillä tarkkuudella, kuin se varsinaisessa analyysissä on tehtävä. Sen vuoksi vaihteluvälit on muodostettu kaavamaisesti nykyisten jätehuoltokaavioiden epävarmuuskertoimien perusteella. Näin menetellen oli mahdollista tuottaa varsinaisen analyysin kaltaisia tuloksia, joiden perusteella voidaan päättää hankkeen jatkosta.

Tämä työ on rahoitettu Kansallisen ydinjätehuollon tutkimusohjelman varoista.

Espoo 21.11.2006

Juha Forsström

# Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| Alkusanat.....   | 5  |
| 1. Johdanto .....  | 8  |
| 2. Riskianalyysin taustaa.....                                       | 10 |
| 2.1 Projektin kustannusriskianalyysin tavoitteet.....                | 10 |
| 2.2 Riskin määritelmä.....   | 10 |
| 2.3 Riskiluokat.....   | 11 |
| 2.4 Riskianalyysin rakenne.....                                      | 11 |
| 2.5 Kustannusarviot eri suunnitteluvaiheissa .....                   | 12 |
| 2.6 Epävarmuus kustannusarvioissa.....                               | 12 |
| 2.6.1 Monte Carlo -simuloinnin piirteitä.....                        | 15 |
| 2.6.2 Epävarmuuden kuvaus .....                                      | 15 |
| 2.7 Todennäköisyysperusteisen riskianalyysin keskeiset tulokset..... | 18 |
| 2.7.1 Kumulatiivinen todennäköisyysjakauma .....                     | 18 |
| 2.7.2 Riskipuskurit .....  | 19 |
| 2.7.3 Keskeiset riskitekijät .....                                   | 20 |
| 3. Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi .....                      | 21 |
| 3.1 Suomalainen lainsäädäntö ydinjätehuollon kustannuksista.....     | 21 |
| 3.2 Valtion ydinjätehuoltorahasto .....                              | 22 |
| 3.3 Jätehuoltokaavio riskitarkastelun lähtökohtana.....              | 23 |
| 3.3.1 Kustannusepävarmuus.....                                       | 23 |
| 3.3.2 Diskonttaus.....   | 25 |
| 3.4 Laskentaan liittyviä tekijöitä .....                             | 25 |
| 3.4.1 Epävarmuuskertoimesta kolmipistemääritykseen.....              | 25 |
| 3.4.2 Kustannusten jako .....  | 27 |
| 3.4.3 Kustannuserien riippumattomuus.....                            | 27 |
| 3.4.4 Epävarmoina huomioitavat kustannustekijät .....                | 28 |
| 3.5 Tulokset.....  | 28 |
| 3.5.1 TVO.....   | 29 |
| 3.5.2 Fortum.....  | 31 |
| 3.5.3 Jakauman tyypin vaikutus .....                                 | 33 |
| 3.6 Päätelmät .....  | 34 |
| 4. Lichtenbergin menetelmä.....                                      | 35 |
| 4.1 Menetelmän perusteita.....                                       | 35 |
| 4.1.1 Kvalitatiivinen vaihe .....                                    | 36 |

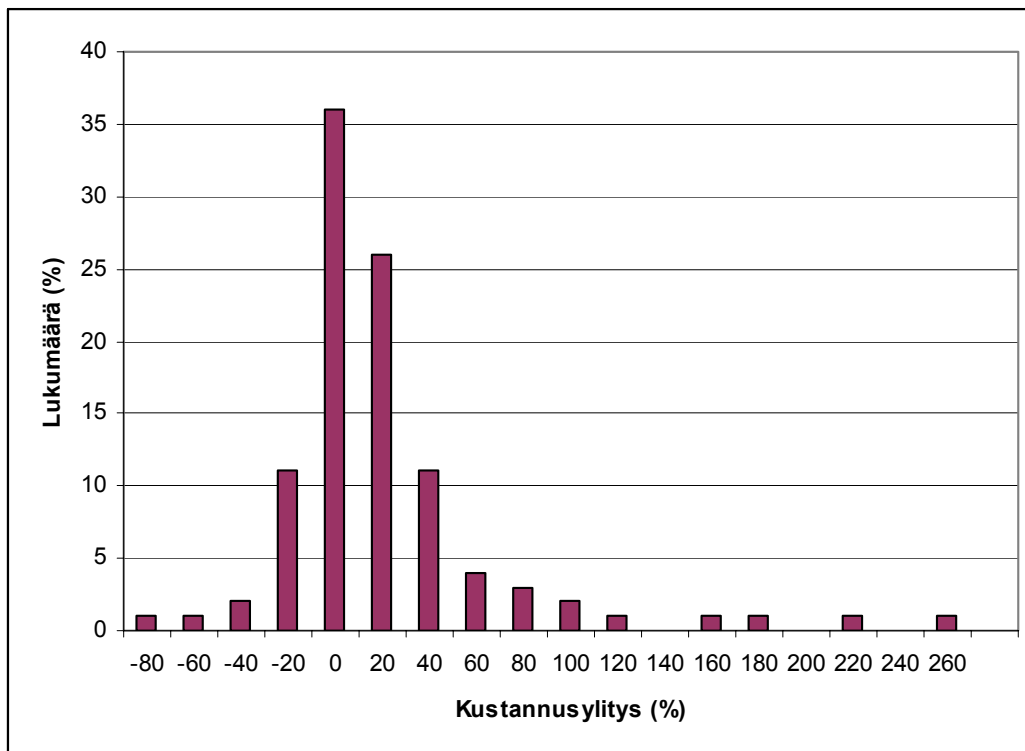
|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 4.1.2 | Kvantitatiivinen vaihe .....       | 37 |
| 4.2   | Sovellusesimerkki.....             | 40 |
| 4.2.1 | Epävarmuuksien tunnistaminen ..... | 40 |
| 4.2.2 | Lopullinen rakenne.....            | 42 |
| 4.2.3 | Korjaustermien laskenta.....       | 45 |
| 4.2.4 | Tulos ja epävarmuustekijät .....   | 46 |
| 4.3   | Päätelmiä .....                    | 47 |
| 5.    | Yhteenveto .....                   | 49 |
|       | Lähdeluettelo .....                | 50 |

# 1. Johdanto

Kansainvälisissä selvityksissä, joissa on verrattu ennen toteutusta tehtyjä projektien kustannusarvioita toteutuneisiin kustannuksiin, on todettu, että kustannusylitykset ovat tavallisia.

Laajassa vertailututkimuksessa, jossa oli mukana kaikkiaan 258 liikenteen infrastruktuuri-investointihanketta 20 eri maasta /14/, verrattiin toteutuneita kustannuksia kustannusarvioihin, jotka oli tehty ennen projektin hyväksymispäätöstä. Hankkeiden koko yhteensä (vuoden 1995 taso) oli yli 90 miljardia US\$. Tulokseksi saatiin, että keskimääräinen kustannusylitys rautatiehankkeissa oli 45 %, tunneleiden ja siltojen rakentamisessa 34 % ja tiehankkeissa 20 %. Kustannusylitykset osoittautuivat olevan globaali ilmiö.

Lopputuloksena tutkimusryhmä totesi, että päätöksenteon pohjana käytettävät kustannusarviot ovat harhaanjohtavia. Suuret kustannusylitykset yhdistettynä suureen kustannusten hajontaan johtavat vakaviin rahoitusriskeihin. Sellaiset riskit jätetään tyypillisesti huomiotta tai niitä vähätellään päätöksenteossa. Kuva 1 havainnollistaa kustannusylitysten jakaumaa. Siinä näkyy selvästi ”oikealle venyvä” ylitysten todennäköisyysjakauma, joka on ominainen kustannusten todennäköisyysfunktion jakauman muoto.



Kuva 1. Liikenneinfrastruktuuri-investointien toteutuneiden kustannusten ja kustannusarvion vertailu /14/.



Toisessa vastaavanlaisessa selvityksessä RAND-yhtymä tutki vuonna 1988 52 Yhdysvaltojen siviilihallinnon hanketta, joiden koko vaihteli 500 milj. US\$ ja 10 miljardin US\$ välillä /3/. Yksityiskohtaisen kustannusbudjetin keskimääräinen ylitys oli 88 %. Mainittuja syitä kustannusylityksille olivat sellaiset projektitoiminnan sisäiset tekijät kuten aikataulut, sopimukset, kustannusvalvonta ja ulkoiset tekijät, kuten inflaatio ja teknologinen epävarmuus. Lisäksi mainittiin keskeisinä budjettilylysten syinä institutionaaliset ongelmat, mm. ympäristömääräykset ja yleinen vastustus, terveyteen ja turvallisuuteen liittyvät määräykset, työntekijöiden hankinnan ja työn suorittamisen käytännöt.

Kirjoittajat antavat seuraavat neljä keskeistä syytä siihen, miksi suuret budjettilylykset ovat pikemminkin sääntö kuin poikkeus:

1. Kustannusarviot tehdään yleensä ympäristössä, joka suosii pienen kustannusarvion optimistisia ”kyllä onnistuu” -tyyppisiä suunnitelmia;
2. Kustannusarviot heijastavat sitä, mitä järkevien kustannusten tulisi olla, ei sitä, mitä ne voivat olla, kun kaikki asiaan vaikuttavat epävarmuudet huomioidaan;
3. Epävarmuudet huomioidaan lisäämällä riskipuskureita, tyypillisesti 20–50 % pääomakustannuksista. Nämä lisäerät eivät juuri koskaan huomioi harvoin esiintyviä tapahtumia, kuten merkittäviä teknisiä ongelmia tai sääntelyyn liittyviä muutoksia;
4. Epävarmuuksien huomiointi kustannusarviossa on usein vääristynyt inhimillisistä syistä.

Työryhmä identifioi neljä keskeistä seikkaa kustannusriskin analysoinnissa. Ne ovat: i) miten käsitellä kustannuskomponenttien välisiä korrelaatioita; ii) miten yhdistetään asiantuntijoiden erilaiset käsitykset; iii) miten hallita kommunikointi ja informaation jako asiantuntijoiden välillä; iv) mikä on sopiva diskonttokorko.

Yllä olevaan neljään kohtaan tiivistyvät kustannusriskianalyysin keskeiset ongelmakohdat yleisestikin.

## 2. Riskianalyysin taustaa

Riski on väistämätön osa jokaista projektia. Hankkeen toteutuksen aikana esiintyvien yllättävien kustannusten varalle on tapana varata tietty puskurirahasto. Kustannusten arvioinnin näkökulmasta riskit näyttäytyvät juuri näinä ennakoimattomiin kustannuksiin kohdennettuina määrärahoina.

### 2.1 Projektin kustannusriskianalyysin tavoitteet

Kustannusriskianalyysi täydentää perinteistä kustannusten arviointimenetelmää vastaamalla kysymyksiin, jotka ovat sen ulottumattomissa. Näitä kysymyksiä ovat mm. seuraavat:

- Mitkä ovat todennäköisimmät kustannukset?
- Kuinka todennäköistä on kustannusarvion ylitys?
- Kuinka suuret kustannuspoikkeamat ovat mahdollisia?
- Mitkä osa-alueet lisäävät eniten koko projektin riskiä?
- Mihin tekijöihin on kiinnitettävä huomiota, kun halutaan riskiä pienentää?

Kustannusriskien analyysillä voidaan kokonaisriski arvioida ja merkittävimmät riskitekijät tunnistaa. Analyysi itsessään on vasta ensimmäinen askel. Sen pohjalta tehtävät päätelmät ja käynnistettävät toimenpiteet ovat riskien hallinnan kannalta keskeisiä.

### 2.2 Riskin määritelmä

Termit riski ja epävarmuus voidaan määritellä monella tavalla. Tässä julkaisussa epävarmuus tarkoittaa puuttuvaa tietoa. Riski määritellään seuraavasti: *Riski on mahdollinen (epävarma) tapahtuma, joka tapahtuessaan vaikuttaa projektin tavoitteiden saavuttamiseen* /11/. Riskiä kuvataan useimmiten kielteisesti. Kun sitä luonnehditaan myönteisesti, sitä kutsutaan mahdollisuudeksi.

Riskiin liittyy siis kaksi ulottuvuutta: epävarmuus ja vaikutus. Tapahtuman esiintymisen todennäköisyys liittyy epävarmuuteen ja poikkeama tavoitteesta kuvaa sen vaikutusta. Riskien oikeanlainen arviointi edellyttää sekä todennäköisyyden että vaikutuksen arviointia. Tapahtuman vaikutus tavoitteeseen on usein suhteellisen suoraviivainen arviointitehtävä, mutta esiintymistodennäköisyyden arviointi on hankalaa.

## 2.3 Riskiluokat

Riskit voidaan luokitella esimerkiksi seuraavasti /5/:

1. **Tekninen riski.** Suunnitteluun, kehittämiseen, rakentamiseen ja käyttöön vaikuttavat tekijät, jotka aiheuttavat poikkeaman aiotun ja toteutuvan toiminnan laadun välillä.
2. **Kustannusriski.** Riski, että projektin kustannukset poikkeavat suunnitellusta. Kustannusriskiin vaikuttaa merkittävimmin (1) Suunniteltujen toimintojen kustannusarvion perinpohjaisuus ja tarkkuus; (2) *Teknisen riskin* hallinnan epäonnistuminen, jonka takia toiminnalle asetettuja tavoitteita ei saavuteta.
3. **Aikatauluriski.** Aika ei riitä tavoitteiden saavuttamiseen. Kaksi keskeistä tekijää ovat: (1) Suunnitellut toiminnot eivät ehdi valmistua, koska suunnitelmat eivät ole järkeviä tai riittävän huoliteltuja; ja (2) Toteutus ei saavuta asetettuja aikataavoitteita *teknisen riskin* toteutumisen takia.

Ydinjätehuollossa kaksi ensimmäistä kohtaa ovat ehkä keskeisimmät: Uutta tekniikkaa tullaan soveltamaan monessa eri kohdassa, koska vastaavia hankkeita ei aiemmin ole toteutettu. Kustannusriski on todellinen etenkin teknisen riskin takia. Kun diskonttausta ei suomalaisessa rahastointimallissa käsitellä, ei ajoitus ole suoraan kustannusongelma. Kuitenkin viive suunnittelun ja toteutuksen välillä luo epävarmuutta kustannuksiin ja tätä voi myös kutsua aikatauluriskiksi /15/.

## 2.4 Riskianalyysin rakenne

Epävarmojen tapahtumien todennäköisyyden huolellinen arviointi on vaikeaa, mutta erityisen tärkeää riskianalyysin kannalta. Jos riskin todennäköisyyden arviointi on virheellistä, niin eri riskitekijöiden tärkeysjärjestys voi muuttua, mikä johtaa huomion kohdistumiseen väärin asioihin ja seurauksena on vääriä päätöksiä. Jos arviointi on taas oikeaan osuvaa, niin tällöin ymmärrys kunkin riskitekijän vaikutuksesta kasvaa, mikä puolestaan antaa mahdollisuuden riskien hallinnan onnistumiselle.

Useimmissa tapauksissa kustannusarviot ovat yksittäisiä lukuja, piste-estimaatteja, jotka perustuvat kustannuserien todennäköisimpiin arvoihin. Niissä ei riskiä ole näkyvällä tavalla huomioitu lainkaan. Riskittömiä projekteja ei kuitenkaan ole, joten riskit on arvioitava erikseen ja sisällytettävä kustannusarvioon. Riskianalyysin tulisi siis edetä yhtä jalkaa kustannusarvion laadinnan kanssa.

Riskianalyysin ensimmäinen vaihe on riskien identifiointi, niiden tunnistaminen. Tarkoitus on löytää kaikki ne tekijät, jotka voivat vaikuttaa projektin toimintaan, kustannuksiin tai aikatauluun. Tämä on tärkeä vaihe riskien hallinnassa, sillä havaitsematta

jääneet riskit voivat kaataa koko hankkeen olipa havaittujen riskien hallinta miten hyvää tahansa.

Riskianalyysin toinen vaihe on arvioida kunkin riskin vaikutus ja antaa sille lukuarvo. Tämän vaiheen tarkoitus on kuvata riskin suuruus kustannuksena. Sen edellytyksenä on edellisessä kohdassa havaitun tapahtuman esiintymisen todennäköisyyden ja tapahtuman seurauksen määrittely. Näin tehdään kullekin riskin osatekijälle. Riskianalyysi jatkuu tästä riskien hallinnalla (johon riskianalyysi monesti lasketaan yhtenä osana). Se tarkoittaa riskiä vähentävien toimien kartoittamista, täytäntöönpanoa ja seurantaa, mutta nämä vaiheet eivät enää kuulu tämän työn piiriin.

## 2.5 Kustannusarviot eri suunnitteluvaiheissa

Eri organisaatiot ovat luoneet erilaisia kustannusarvion tarkkuus- ja luokittelujärjestelmiä. Mitä pidemmälle ja tarkemmin projekti on suunniteltu, sitä pienempi vaihteluväli kustannuksille sallitaan /2/. Kustannusepävarmuus vähenee suunnittelun edetessä, sillä suuremmat kokonaisuudet pilkkoutuvat pienemmiksi ja yhä enemmän asioita kiinnitetään. Epävarmuudet kohdistuvat yhä pienempiin kokonaisuuksiin ja kustannusarviot kustakin osasta tarkentuvat.

Suoraviivaisin tapa vähentää kustannusepävarmuutta (estimaatin hajontaa) on jakaa suuri kokonaisuus riippumattomiin osiin ja arvioida kunkin osan epävarmuutta erikseen. Vaikka jokaisen osan hajonta olisi suhteellisesti alkuperäisen suuruinen, niin näin muodostetun kokonaisuuden hajonta on alkuperäistä pienempi. Tämä toteutuu sillä oletuksella, että osat ovat riippumattomia.

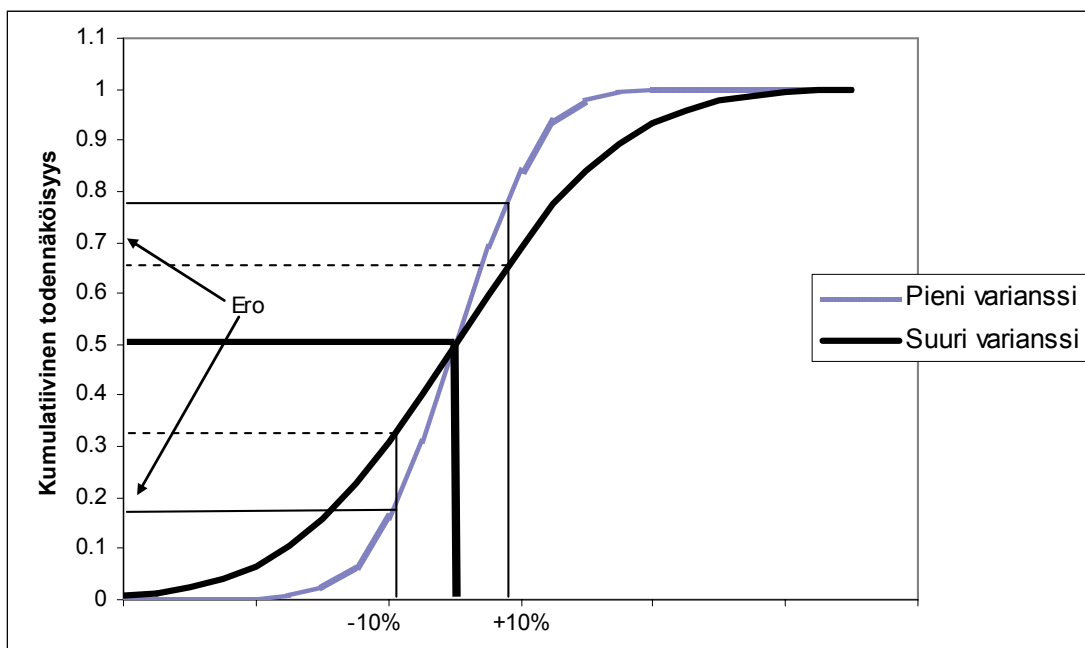
Osittamisen kautta saavutettu riskin väheneminen pätee tiettyyn rajaan saakka ja se pätee erityisesti silloin, kun mitään aidosti uutta, ennen kokeilematonta ei projektiin sisälly. Osittamista ei kannata eikä sitä voikaan jatkaa loputtomiin – joku määrä epävarmuutta jää aina jäljelle.

## 2.6 Epävarmuus kustannusarvioissa

**Perinteisin** menetelmä kustannusepävarmuuden huomiointiin on lisätä kustannuksiin erityinen erä ennakoimattomien menojen kattamiseksi. Tätä lisäkustannusta voidaan kutsua vaikkapa riskipuskuriksi (kontingenssiksi). Tyypillisesti se on 5–10 % viimeistellyn suunnitelman kokonaiskustannuksen loppusummasta. Tavoitteena on varmistaa, että projektin budjetti riittää ennalta aavistamattomien kuluerien maksamiseen. Tämä on sama asia kuin kertoa loppusumma riski- (tai epävarmuus-) kertoimella, jonka tyypillinen arvo on siis 1,05–1,10.

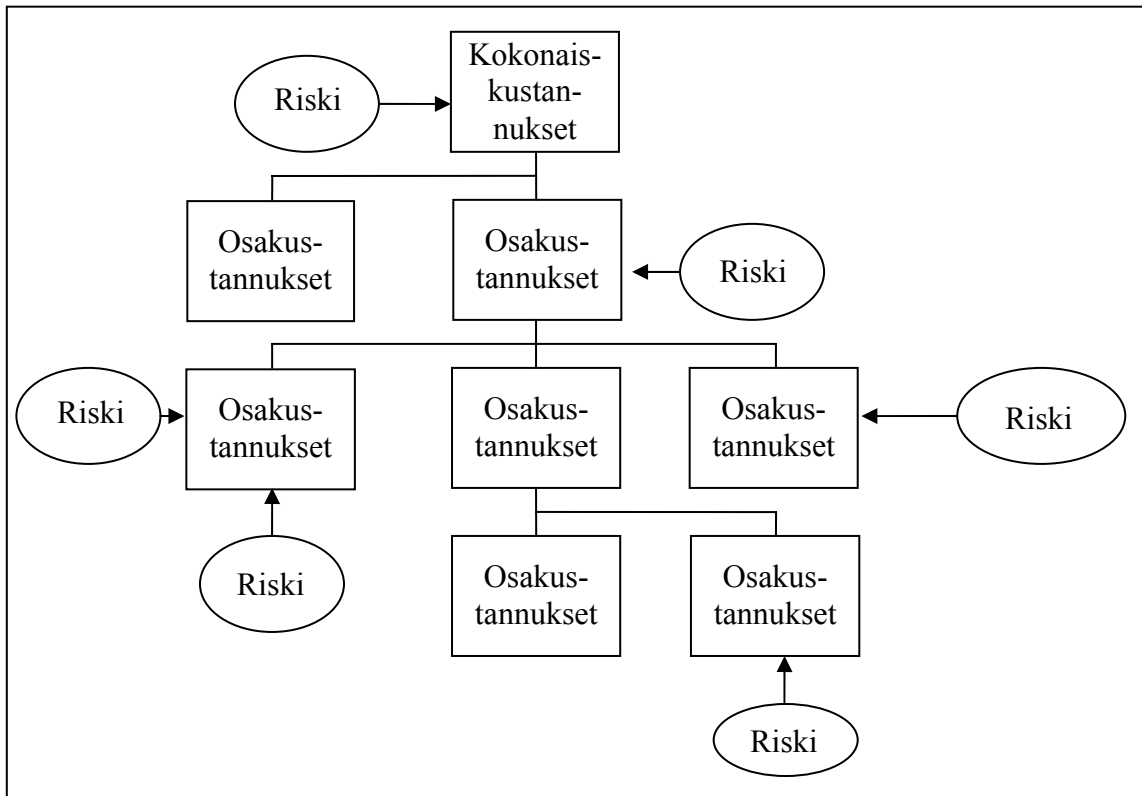
Tämä on kuitenkin subjektiivinen menetelmä, joka perustuu näppituntumaan ja intuitioon. Menetelmässä on useita heikkouksia /1,10/. Ensinnäkin, se on liioitellun yksinkertainen ja se perustuu arvioijan luottamukseen omaan kokemukseensa; toiseksi, prosenttilisä on mitä todennäköisimmin mielivaltaisesti valittu, eikä sen sopivuus juuri käsiteltävään kustannukseen ole mitenkään varmistettu; kolmanneksi, menetelmässä on vaara riskin huomioimiseen kahdesti, sillä joissain osakustannuksissa saattaa olla sisällä jo vastaavanlainen riskilisäkerroin; neljänneksi, menetelmä tuottaa yksittäisen luvun kustannusarvioksi. Se ikään kuin luo varmuuden vaikutelman, mikä ei kuitenkaan ole perusteltu.

Samansuuruisen prosentuaalisen lisäyksen vaikutus vaihtelee sen mukaan, kuinka suuri kustannusarvion hajonta on. Jos epävarmuus on suuri, eli kustannusten hajonta on suuri, niin 10 % kustannuslisä tuo huomattavasti vähemmän lisävarmuutta kuin tapauksessa, jossa käsitys kustannuksista on hyvin varmallalla pohjalla, jolloin kustannuksen hajonta on pieni. Kuva 2 selventää asiaa.



Kuva 2. Riskikertoimen käyttö vaikuttaa eri tavalla sen mukaan, kuinka suuri kustannusestimaatin varianssi on.

**Toinen** menetelmä, joka suuresti muistuttaa yllä kuvattua, on sellainen, jossa riskilisäprosentti lisätään kuhunkin kustannuserään (eikä vain kokonaiskustannukseen), kun kokonaiskustannukset on jaettu soveltuviin osiin. Tämä menetelmä on edellistä yksityiskohtaisempi, mutta sillä on samat heikkoudet kuin edelliselläkin menetelmällä.



Kuva 3. Kustannusjaon perustalle laadittu Monte Carlo -simulointimalli.

**Kolmannen** menetelmän lähtökohtana on edellisen kohdan mukainen kustannuksen osittaminen, mutta nyt kukin kustannuserä kuvataan satunnaismuuttujana, jolle annetaan todennäköisyysfunktio, kuva 3. Menetelmän kehittyneempi muoto on **Monte Carlo -simulointi**. Se on todennäköisyyspohjainen menetelmä, jossa laskenta toistetaan tuhansia kertoja eri alkuarvoin. Alkuarvot otetaan satunnaisesti jakaumista, jotka näille suureille on määritelty. Jokainen laskentakerta on *yksi mahdollinen tulevaisuus*. Tulokseksi saadaan tarkasteltavan suureen jakauma, ei yhtä lukua.

Kaikkia tekijöitä ei ole syytä tarkastella satunnaismuuttujina. Tämä käsittely varataan vain oleellisille muuttujille. Mutta mitkä tekijät ovat oleellisia? Muuttujan tärkeys päätellään sen mukaan, kuinka paljon vaikutusta yhdellä tekijällä on projektin kokonaistalouteen. Kokemuksen mukaan 1/6, 8/ hyväksi havaittu menettely on seuraava: Jos yhden osan kustannukset voivat poiketa alustavassa arvioissa yli 0,5 % koko loppusummasta tai yksityiskohtaisessa arvioissa 0,2 % loppusummasta, niin silloin ko. tekijä on huomioitava merkittävänä epävarmuutta tuovana tekijänä laskennassa. Tulopuolella, jos tavoitefunktio kuvaa voittoa eikä kustannuksia, vastaavat rajat ovat 5 % ja 2 %. Tärkeä tekijä on siis sellainen, jonka toteutuva arvo voi poiketa tavoitearvosta niin paljon, että vaikutus kokonaistalouteen ylittää tärkeän tekijän rajan. Suuri kustannusosuus ei sinänsä ole tärkeä riskianalyysin kannalta. Vain kustannuksen mahdollisen vaihtelun suuruus on tärkeää.

### 2.6.1 Monte Carlo -simuloinnin piirteitä

Luvussa 3 tehdään esimerkkilaskenta Monte Carlo -simulointiin (MCS) perustuen, joten lyhyt menetelmäesittely on tässä paikallaan.

MCS koostuu seuraavista askeleista:

1. Keskeisten epävarmojen tekijöiden valinta;
2. Epävarmuuden tilastollinen kuvaus todennäköisyysjakaumalla;
3. Epävarmuutta sisältävien tekijöiden keskinäisen riippuvuuden identifiointi ja määrittäminen;
4. Tulosten laskenta;
5. Tulosten esittäminen todennäköisyysjakaumana.

MCS:n tulokset syntyvät tuhansien toistettavien laskentakierrosten perusteella. Laskenta perustuu satunnaisesti valittuihin muuttujien arvoihin niille määritellyistä jakaumista. Jokainen yksittäinen tulos edustaa yhtä mahdollista tulevaisuutta. Tulokset kootaan jakaumiksi, jotka approksimoivat todellisia jakaumia, sitä tarkemmin, mitä useampia kertoja laskenta toistetaan. MCS:n suurin etu on sen kyky käsitellä tilanteita, joissa suora matemaattinen lähestymistapa ei ole käytännöllinen.

MCS:n antamat vastaukset ovat hyödyllisiä, koska MCS:n avulla epävarmuudesta tulee hallittavaa: Laaditulla mallilla voidaan tehdä kokeita, joiden avulla opitaan mallilla kuvatun järjestelmän luonteesta ja ominaisuuksista jotain uutta. Kun mallin määrittely, valitut parametrit ja ulkoiset syötteet ovat kohdallaan, ovat myös tulokset luotettavia. Tosin sanoen, myös MCS-mallien kohdalla pätee samat mallien käyttöön liittyvät edut ja ongelmat kuin mallien käyttöön yleensäkin.

Menetelmän soveltamisen erityiset ongelmakohdat kytkeytyvät luonnollisesti satunnaisuuteen, sillä juuri epävarmuuden käsittely erottaa MCS-mallit muista malleista. Keskeisin malliin liittyvästä ongelmista ovat vaikeus arvioida muuttujien todennäköisyysjakaumia ja satunnaismuuttujien välisiä yhteyksiä. Viimemainittuun ongelmaan voidaan hakea ratkaisua joko määrittelemällä malli siten, että tietyt yhteydet huomioidaan mallin rakenteessa, tai sitten niin, että generoitavat satunnaisarvot ovat tilastollisesti sopivasti korreloituneet. Tähän modernit mallitusympäristöt antavat mahdollisuuden. Lähtökohteisesti pyritään satunnaisuutta sisältävät mallin osat määrittelemään siten, että niiden satunnaisuudet muodostavat riippumattomia kokonaisuuksia.

### 2.6.2 Epävarmuuden kuvaus

Todennäköisyysjakauman määrittelyssä voidaan tehdä ero subjektiivisen ja objektiivisen todennäköisyyden välillä. Objektiivinen todennäköisyys viittaa tilanteeseen, jossa

muuttujalla on ominaisuuksiltaan tunnettu, mitattu, todennäköisyysjakauma. Kaikista asiaan vaikuttavista seikoista ei kuitenkaan ole mittaustuloksia olemassa. Subjektiiiviset todennäköisyydet taas eivät perustu vastaavaan havaintoaineistoon, vaan määrittelijän näkemykseen: valitaan jakauman tyyppi ja sen ”muotoparametrit” näkemyksen mukaan. Subjektiiivisuuteen liittyvää yksipuolisuutta ja suuntautuneisuutta voidaan vähentää valjastamalla sopivasti valittu ryhmä satunnaisuuden laatua ja määrää arvioimaan. Ihmisillä on taipumus juuttua suppeaan tarkastelunäkökulmaan /21/, mutta hyvin organisoidulla ryhmätyöllä päästään parempiin tuloksiin /10,12/.

Yleisesti käytetään epävarmuuden mittana epävarman suureen ajateltavissa olevien arvojen vaihteluväliä. Se määritellään kolmella suurella (kolmipistemääritys), jotka ovat:

- **Alin mahdollinen kustannusarvio.** Tämä vastaa sellaista kustannustasoa, jonka alittamisen todennäköisyys on 1 % (tai 10 %).
- **Ylin mahdollinen kustannusarvio.** Tämä vastaa sellaista kustannustasoa, jonka ylittämisen todennäköisyys on 1 % (tai 10 %).
- **Todennäköisin kustannusarvio.** On suuri houkutus olettaa, että tämä olisi perinteisin laskentamenetelmin laskettu kustannusarvio. Usein perusuran estimaatti on tahdon ilmaus, joka on tehty myönteisen asiakasvaikutuksen saamiseksi. Arvio voi olla niin optimistinen, ettei sitä voi saavuttaa kuin hyvällä tuurilla – ja mahdollisesti suurella määrällä palkattomia ylityötunteja.

Ylä- ja alarajat muodostavat vaihteluvälin rajat. Mitä suurempi on epävarmuus, sitä suurempi on vaihteluväli. Rajat määritellään siis siten, että ne vastaavat yhden prosentin todennäköisyyttä alitukselle ja ylitykselle. Rajojen väliin jää siten 98 % kaikista mahdollisista tapahtumista. 99 % kaikista mahdollisista kustannustoteutumisista jää ylärajan alapuolelle ja vastaavasti alarajan ylittää 99 % tapauksista.

Vaihteluväliä arvioitaessa tulee huomioida kaikki ennalta arvioitavissa olevat olosuhteet. Vaihteluväli on subjektiivinen (tai ryhmätyön tuloksena syntynyt kompromissi), mutta silti arvokkaampi kuin yksittäinen luku /10/. ”Vaihteluväliä käytettäessä ollaan suunnitteen oikeassa, mutta vain tavoitearvoa käytettäessä ollaan täsmällisesti väärässä” /4/.

Epävarman tekijän todennäköisyysjakauman valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. seuraavat:

- Jakauman antaman arvon on oltava aina positiivinen, koska kustannukset eivät ole koskaan negatiiviset;
- Kustannusylitykset ovat tavallisempia kuin alitukset;
- Lopulliset kustannukset ovat usein arvioitua korkeammat;
- Kokemuksen mukaan epäsymmetrinen jakauma on realistisempi kuin symmetrinen.



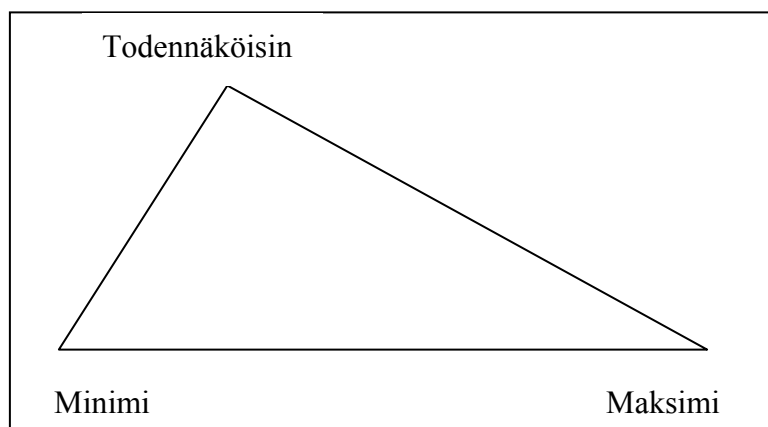
Usein käytetään kolmiojakaumaa (kuva 4) sen yksinkertaisuuden vuoksi, mutta muitakin mahdollisuuksia on, esim. betajakauma, gammajakauma ja log-normaalijakauma. Kolmiojakaumaa käytetään sen yksinkertaisuuden ja helpon ymmärrettävyyden vuoksi. Kolmiojakauman mukaisesti käyttäytyviä suureita ei esiinny luonnossa, mutta sillä on kuitenkin lukuisia houkuttelevia piirteitä:

- Kolmiojakauma voidaan kuvata täydellisesti kolmipiste-estimaatilla. Osallistujien on helpompaa antaa nämä kolme lukua kuin kuvata jakauman luonne.
- Kolmiojakauman tunnuslukuja on helppo laskea ja ymmärtää. Esimerkiksi kustannusten odotusarvo on yksikertaisesti

$$\text{Odotusarvo} = \frac{1}{3}[\text{Yläraja} + \text{Alaraja} + \text{Todennäköisin arvo}]$$

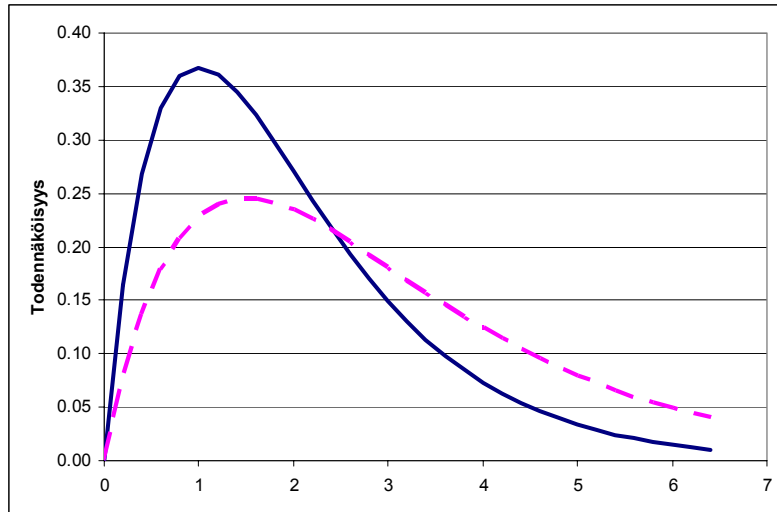
- Jos taas valitaan jakaumaksi Erlang-jakauma /12/ (erikoistapaus Gamma-jakaumasta), niin vastaavalla kolmipistemäärityksellä lasketaan (likimääräinen) odotusarvo seuraavasti

$$\text{Odotusarvo} = \frac{1}{5}[\text{Yläraja} + \text{Alaraja} + 3 \times \text{Todennäköisin arvo}]$$



*Kuva 4. Kolmiojakauma.*

Yleisesti on tunnettua, että arvioijat antavat yläraja-arvoksi melko alhaisia lukuja. Sen vuoksi voidaan käyttää esimerkiksi oikealle pitkälle jatkuvaa gamma-jakaumaa, kuva 5, tai log-normaali-jakaumaa. Oikealle pitkään jatkuvien jakaumien käytöllä pyritään huomioimaan suurenkin kustannusylityksen mahdollisuus.

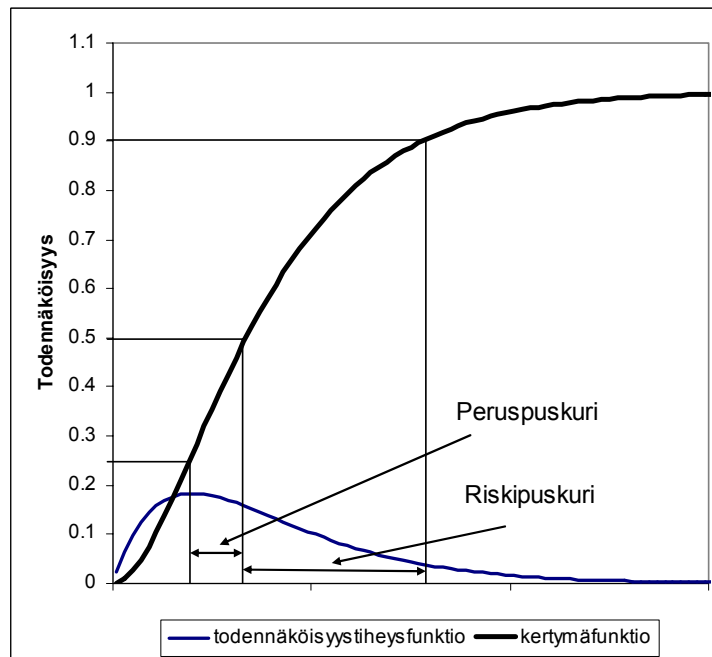


Kuva 5. Gamma-jakaumia (muotoparametrit erilaisia).

## 2.7 Todennäköisyysperusteisen riskianalyysin keskeiset tulokset

### 2.7.1 Kumulatiivinen todennäköisyysjakauma

Monte Carlo -simuloinnin tuloksena saadaan kokonaiskustannuksen jakauma. Se kannattaa esittää kertymäfunktion muodossa, sillä sen avulla tulosten tulkinta on havainnollisempaa.



Kuva 6. Analyysin perustulosteet, jotka ovat kumulatiivinen todennäköisyysjakauma (kertymäfunktio) ja puskurirahastojen koot.

Kuvaajasta on helppo todeta, tuottaako malli järkeenkäyviä tuloksia. Jos jakauma on vino odottamattomalla tavalla tai odotuksista poikkeavalla määrällä, tai jos käyrässä on kumpareita tai muita poikkeavuuksia, on malli tarkistettava ja tarvittaessa korjattava. On pidettävä mielessä mallinlaatijan perussääntö: Jos malli antaa intuition vastaisia tuloksia, se on virheellinen. Vasta mallin huolellisen läpikäynnin jälkeen, voidaan aluksi oudoilta vaikuttaneet tulokset hyväksyä. (Kuva 6.)

### 2.7.2 Riskipuskurit

Kumulatiivisen todennäköisyysjakauman avulla selviää suoraan kustannusarvion mukaisen kustannustason saavuttamisen todennäköisyys. Kuvasta on myös mahdollista määrittää tarvittavien puskurirahastojen koko. Puskurirahastot ovat vain nimi sille rahamäärälle, joka tehtyjen kustannusoletusten mukaan täytyy kustannusarvion lisäksi hankkeeseen varata halutun kustannusvarmuuden saavuttamiseksi. Niiden tarve heijastaa yksittäisistä kustannuseristä tehtyjä oletuksia ja kuvauksia.

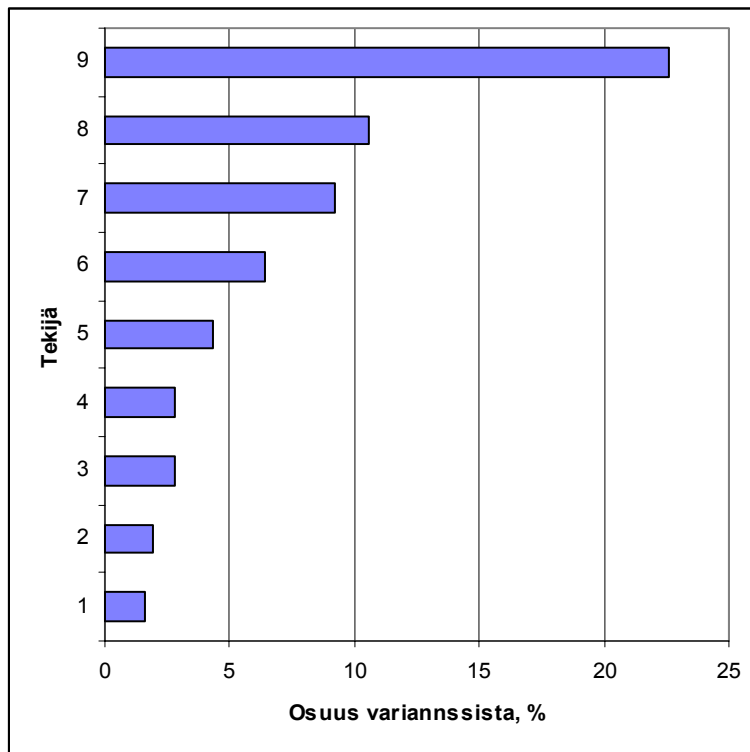
**Peruspuskuri** tarkoittaa sitä rahamäärää, joka tarvitaan projektin kokonaiskustannusten saattamiseksi vastaamaan arvioitujen kumulatiivisen kokonaiskustannusten jakauman odotusarvoa. Kustannusten todennäköisyysjakaumathan ovat sillä tavalla vinoja, että todennäköisyydeltään suurin kustannus (moodi) ei ole sama kuin keskiarvo, koska kustannusylytykset ovat huomattavasti yleisempiä kuin alitukset. Jakauma jatkuu keskiarvosta oikealle paljon pidemmälle kuin vasemmalle, pienimpien kustannusten suuntaan.

**Riskipuskuri** tarkoittaa sitä rahamäärää, joka tarvitaan kustannusten odotusarvon päälle alentamaan todennäköisyys kustannusylytyksistä hyväksyttävälle tasolle. Hyväksyttävä taso voi olla esimerkiksi 90 %. Siis todennäköisyys, että kustannukset ylittävät tämän tason, on 10 %. Tämän puskurin avulla voidaan kattaa kaikki odottamattomat kustannuserät, ”järkevyyden rajoissa”.

Näitä puskureita ei sinänsä tarvitse erotella. Ne voidaan summata yhteen ja puhua vain riskipuskurista. Puskureita ei voi määrittää osakustannuksittain, ne ovat kokonaiskustannuksen ominaisuus. Satunnaismuuttujien (osakustannusten) odotusarvot voidaan laskea yhteen, mutta esim. kaikkien kustannuserien yläraja-arvioiden summaaminen ei ole järkevää: on häviävän pieni todennäköisyys, että kaikki riippumattomat kustannuserät saavuttaisivat suurimman ajateltavissa olevan arvonsa projektin toteutuessa. Simulointi tuottaa annettujen lähtötietojen mukaisen arvion siitä, kuinka todennäköistä tämä on.

### 2.7.3 Keskeiset riskitekijät

Analyysin tarkoitus on paljastaa ne tekijät, joiden muutoksilla on suurin vaikutus lopputulokseen. Ne ovat samalla ne kustannusten osa-alueet, joiden oikeellisuuteen ja suunnittelun laatuun on erityisesti kiinnitettävä huomiota. Tulokset esitetään tyypillisesti ”tornado-kuvana”, kuva 7. Nimi seuraa kuvan pyörremyrskyä muistuttavasta muodosta.



Kuva 7. Tornado-kuva tekijöistä, jotka eniten vaikuttavat kokonaiskustannuksen varianssiin (riskiin).

Kuvan tuloksista selviää, mitkä tekijät aiheuttavat eniten tavoitefunktion vaihtelua. Ne ovat niitä tekijöitä, joihin riskien hallinnan toimenpiteet tulee kohdistaa.

## 3. Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi

### 3.1 Suomalainen lainsäädäntö ydinjätehuollon kustannuksista

Ydinenergialaissa säädetään varautumisesta ydinjätehuollon kustannuksiin /16/. Ydinvoimayhtiöiden tulee huolehtia ydinjätehuollosta ja vastata siitä aiheutuvista kustannuksista siihen saakka, kunnes ydinjätteet on loppusijoitettu pysyvällä tavalla. Lain mukaan valtion ydinjätehuoltorahasto säilyttää ja turvaavasti sijoittaa ne ydinvoimayhtiöiltä keräämänsä varat, jotka tulevaisuudessa tarvitaan ydinjätteistä huolehtimiseksi.

Alan käsitteistössä on neljä keskeistä termiä. Ne ovat seuraavat:

1. *Vastuumäärä*, jolla tarkoitetaan jätehuoltovelvollisen tuottamien ydinjätteiden ydinjätehuollosta tulevaisuudessa aiheutuvien menojen arvioitua määrää;
2. *Rahastotavoite*, jolla tarkoitetaan sitä varojen määrää, jonka jätehuoltovelvollisten rahasto-osuuden on kunakin kalenterivuonna saavutettava;
3. *Rahasto-osuus* on se varojen määrä, jonka valtion ydinjätehuoltorahasto vahvistaa jätehuoltovelvollisella kulloinkin rahastossa olevan;
4. *Ydinjätehuoltomaksu* tarkoittaa sitä vuosittain vahvistettavaa maksua, joka jätehuoltovelvollisen on maksettava valtion ydinjätehuoltorahastolle rahasto-osuuden nostamiseksi rahastotavoitteen suuruiseksi.

Suomen ydinjätehuollon lähtökohtana on integroitu lähestymistapa, jossa ydinjätehuoltoa ja sen kustannuksia tarkastellaan kokonaisuutena jätehuoltokaavion avulla. Kaavio on jaettu alakohtiin jotka ovat:

1. Käytetyn polttoaineen (KPA) välivarastointi
2. KPA:n kuljetukset
3. KPA:n loppusijoitus
4. Voimalaitosjätteen loppusijoitus
5. Voimalaitosten käytöstäpoisto
6. Tutkimus, kehitys ja hallinto
7. Muut kulut, sisältäen viranomais- ja valvontakustannukset sekä verot.

Käytöstäpoisto ei käsitä koko laitoksen purkamista ja laitospaikan maisemointia. Jäljelläjääviä voimalaitosrakenteita voidaan käyttää teolliseen toimintaan.

Ydinjätehuoltovelvolliset eli voimayhtiöt toimittavat kustannusarviot eli jätehuoltokaaviot vuosittain Kauppa- ja teollisuusministeriölle (KTM) taloudellista varautumista koskevien päätösten pohjaksi. Kaavioissa oletetaan, että laitokset jouduttaisiin purkamaan

kyseisen vuoden lopussa, joten kustannustaso määritetään kyseisen vuoden kustannustason mukaan.

Kustannusarvion perustuminen ko. vuoden lopun tilanteeseen tarkoittaa, että vastuumäärän tulee kattaa vain siihen mennessä kertyneiden jätteiden aiheuttamat kustannukset. Jos toimenpiteitä on jo tehty varautuen koko laitoksen käyttöaikana kertyviin jättemääriin (esim. voimalaitosjätteiden loppusijoitustilojen louhinta), voidaan arvioissa hyödyntää varatut tilat itse laitoksen käytöstäpoistoon, mikä alentaa kustannuksia verrattuna koko käyttöiän päättyessä suoritettavan käytöstäpoiston kustannuksiin.

Yllättävien tilanteiden esilletulo huomioidaan Suomen lainsäädännössä siten, että ennalta arvaamattomien ydinjätehuollon menojen varalta määrätään kunkin vuoden vastuumäärän ja rahastotavoitteen erotuksen kattamaan luovutettavien vakuuksien arvo korkeintaan 10 % laskettua suuremmaksi /16/.

Viiden vuoden välein ydinjätehuoltovelvolliset toimittavat laajemman raportin, jolloin suunnitelmat saatetaan ajan tasalle. Viiden vuoden jakson ns. välivuosina kustannustiedot päivitetään pääasiallisesti käyttämällä kertoimia, joiden käytöstä on sovittu KTM:n kanssa. Kerroin on ansiotaso- ja rakennuskustannusindeksien muutoksesta laskettu keskiarvo, jolloin molemmilla indekseillä on siis painokertoimena 50 %. Vuosittaiset jätehuoltokaaviot laaditaan keskitetysti Posiva Oy:ssä.

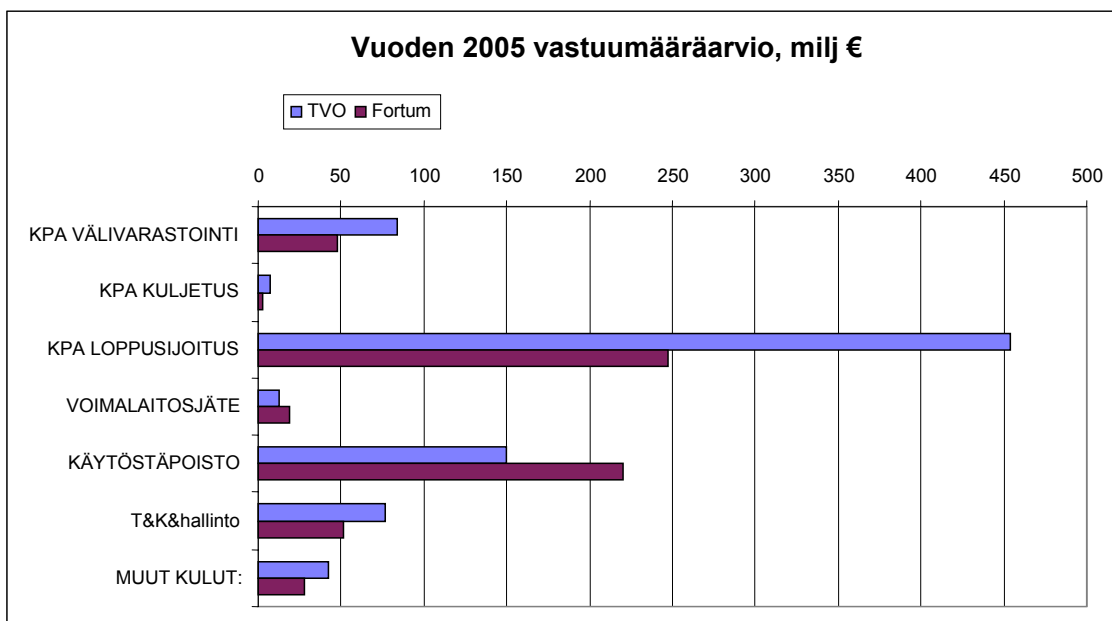
### **3.2 Valtion ydinjätehuoltorahasto**

Valtion ydinjätehuoltorahasto on Kauppa- ja teollisuusministeriön alainen elin, joka on valtion talousarvion ulkopuolella. Sen tehtävänä on kerätä kauppa- ja teollisuusministeriön vuosittain vahvistama rahastotavoitteen mukainen määrä varoja ydinjätehuoltovelvollisilta ydinlaitoksen hyötykäytön aikana ydinjätehuollon tulevia kustannuksia varten.

Valtiontalouden tarkastusvirasto on raportissaan /22/ kiinnittänyt huomiota siihen, että ydinjätehuoltorahaston eräänä toiminnallisena ja taloudellisena riskinä on se, että ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen pohjautuu ydinjätehuoltovelvollisten omiin arviointeihin ydinjätehuollon kustannuksista ja vastuumääristä. Riskiä lieventävinä tekijöinä virasto on todennut sen, että rahasto on pyytännyt esitettyjen toimenpiteiden turvallisuudesta ja kustannuslaskelmista lausunnot niin Säteilyturvakeskukselta kuin Valtion teknilliseltä tutkimuskeskukseltakin.

### 3.3 Jätehuoltokaavio riskitarkastelun lähtökohtana

Jätehuoltokaavioksi kutsuttu laskentamalli kokoaa kaikki erillisselvitykset yhdeksi kokonaisesitykseksi ydinjätehuollon kustannuksista. Sen perusteella määritetään ydinjätehuoltovelvollisten vastuumäärät. Vuoden 2005 kaavion mukaiset kustannukset pääluokittain ja yhtiöittäin on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Vastuumääräarvio luokittain ja yhtiöittäin.

Käytetyn polttoaineen loppusijoitus ja voimalaitosten käytöstäpoisto muodostavat suurimmat kustannuskertymät. Yhtiöiden välillä on kuitenkin huomattavat erot kustannusjakauksissa. Polttoaineen loppusijoituskustannusten eroon vaikuttaa eniten syntyneen jätteen määrä, mikä heijastaa tuotetun sähkön määrää. Käytöstäpoiston erot johtuvat sovellettavan purkutavan erilaisuudesta.

#### 3.3.1 Kustannusepävarmuus

Jätehuoltokaaviossa kustannusten epävarmuus on huomioitu epävarmuuskertoimeksi nimetyllä ykköistä suuremmalla luvulla. Epävarmuuskerroin on määritelty kullekin osakustannukselle läpi koko jätehuoltokaavion. Tällä kertoimella kerrotaan kustannusarvion mukainen luku (tavoitekustannukset), jolloin päädytään kustannuksiin, joiden ylitystodennäköisyys on ”pieni”. Summaamalla yhteen nämä riskillä korjatut osakustannukset päädytään kokonaiskustannusarvioon.

Vuoden 2005 tilannetta vastaavat vastuumääräarviot jätehuoltokaavion mukaan olivat seuraavat: Fortum Oy 618 milj. € ja Teollisuuden Voima Oy (TVO) 827 milj. €. Kustannusarvion mukaiset luvut olivat vastaavasti 540 milj. € ja 688 milj. €. Riskien puskurointiin on Fortum varannut 14 % ja TVO 20 % kustannusarvion mukaisista määristä. Epävarmuuskertoimien arvot yhtiöittäin olivat siis keskimäärin 1,14 (Fortum) ja 1,20 (TVO).

Ydinjätehuoltoon liittyy kaikki normaalit suuriin hankkeisiin liittyvät riskit ja sen lisäksi projektien erityisluonteesta johtuen erityisiä riskejä. Näitä erityisiä riskejä ovat hankkeen uutuus: mitään tällaista ei ole ennen tehty, mistä syystä on sovellettava uutta tekniikkaa. On yleisesti tunnettua, että tällaisissa tapauksissa kustannusarvion ylitykset ovat erityisen mahdollisia. Suunnitellut ratkaisut eivät välttämättä olekaan toteuttamiskelpoisia johtuen syistä, joita ei osata ennakoida /14/. Esimerkiksi kapselien suurimittaisen valmistuksen tiellä nykyisen suunnitelman mukaan voi olla kannen ja rungon kiinnittämisen mahdollinen ongelma /17/.

Toinen erityispiirre on suunnittelun ja toteutuksen välissä oleva pitkä viive. Ydinjätteiden loppusijoitus toteutuu 2020-luvulla ja voimalaitosten purku Fortumin osalta on suunniteltu toteutettavaksi välittömästi, mutta TVO:n osalta noudatettaisiin viivästettyä suunnitelmaa, jonka mukaan purku alkaisi 2030-luvulla. Pitkät viiveet ovat mahdollisia ongelmien aiheuttajia siinä mielessä, että ennen toteutusta voi nousta esiin jotain sellaista, jolla on vaikutusta suunnitelmien toimeenpanoon.

Oman epävarmuuden lajinsa muodostavat tapahtumat, joiden jälkeen on valittava uusi ratkaisu. Nämä ovat 0 / 1 -tyyppisiä tapahtumia. Se tarkoittaa, että joudutaan keksimään täysin uudenlainen ratkaisu johonkin eteen tulevaan ongelmaan. Esimerkki tästä voisi olla se, että Olkiluodon kalliooperä ei sovellukaan lopulliseksi jäteluolaksi. Vasta, kun luolasto todella rakennetaan, varmistuu lopullisesti kalliooperän sopivuus suunniteltuun käyttöön. Kaikki teknistaloudellisesti mahdollinen varmasti tehdään kallioluolaston parantamiseksi, jotta jätteet voitaisiin kuitenkin sijoittaa valitulle paikalle. Tämä venyttää nykyisen luolaston todennäköisyysjakaumaa suurempien kustannusten suuntaan. On kuitenkin mahdollista, että alkuperäinen suunnitelma on hylättävä ja valittava jokin toinen loppusijoituspaikka. Jos tämä vaihtoehto toteutuu, niin tällöin uuden luolan sijainnin valinta, rakentaminen ja käytetyn polttoaineen kuljetuskustannukset muuttuvat nyt arvioiduista. Tämä tapahtuman todennäköisyys on pieni, mutta se mahdollisuus on kuitenkin olemassa. Tapausta ei voi suoraan yhdistää nyt suunnitellun luolaston kustannuskuvaukseen, vaan se vaatisi erillisen käsittelyn. Tämä ja mahdolliset muut vastaavat tekijät jätetään kuitenkin jatkotyön aiheeksi.



### 3.3.2 Diskonttaus

Nykylaskelmissa ei huomioida lainkaan diskonttausta, eli kaukana tulevaisuudessa syntyvien kustannusten nykyarvoistamista. Se tarkoittaa, että todellisuudessa peräkkäisinä ajanhetkinä toteutuvat toimenpiteet ja kustannukset ajatellaan laskennassa tapahtuvaksi rinnakkaisina tapahtumina. Tällöin kustannukset ovat laskennan kannalta kuluvan vuoden aikana syntyneitä kustannuksia.

## 3.4 Laskentaan liittyviä tekijöitä

Seuraavassa kuvattava malli on toteutettu Crystal Ball<sup>®</sup>-nimisellä Excel-liitännäisohjelmalla. Se on työkalu, joka on suunniteltu todennäköisyyspohjaiseen simulointiin. Koska jätehuoltokaaviokin on tekniseltä toteutukseltaan taulukkolaskentapohjainen järjestelmä, on sen soveltaminen tähän tehtävään teknisesti suoraviivaista. Jätehuoltokaavio muodostaa riskianalyysin perustan, joten siihen tehdään vain tarvittavat täydennykset itse kaavion pysyessä muuttumattomana.

### 3.4.1 Epävarmuuskertoimesta kolmipistemäärittämiseen

Monte Carlo -simulointia sovellettaessa luovutaan epävarmuuskertoimista. Ne korvataan kunkin kustannuserän kolmipistemärittäyksellä. Se tarkoittaa, että määritellään alin, todennäköisin ja suurin mahdollinen kustannus, jolla ko. toiminto voidaan toteuttaa. Todennäköisin kustannus vastaa kustannusarvion mukaista kustannusta (tavoitekustannus). Alin mahdollinen kustannus on optimistisin kustannusarvio, joka voi toteutua. Suurin ajateltavissa oleva kustannus toteutuu, kun kaikki kustannuksia lisäävät epävarmuudet toteutuvat kustannuksia lisäävällä tavalla.

Epävarmuuskertoimelle  $k$  on annettu jätehuoltokaaviossa lukuarvoja välillä 1,10–1,30. Tätä kerrointa muokkaamalla luodaan kustannukselle vaihteluvälin ylä- ja alarajakerroin,  $k^i$ ,  $i = \{alaraja, yläraja\}$ . Alarajaksi määritellään 80 % annetusta kustannuksesta ja yläraja lasketaan vähentämällä kertoimen arvosta ykkönen ja saatu tulos kerrotaan kymmenellä:

$$k^i = \begin{cases} k^{alaraja} = 0,8 \\ k^{yläraja} = [k - 1] * 10 \end{cases}$$

Osakustannuksen vaihteluvälin ala- ja ylärajat lasketaan nyt suoraviivaisesti

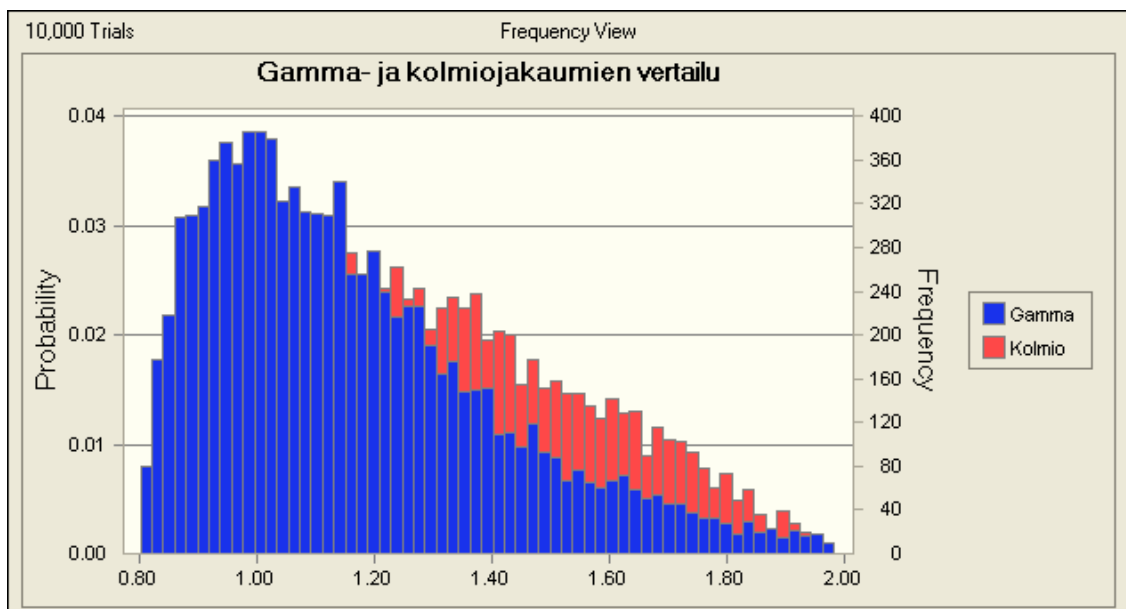
$$K^i = k^i * K_0,$$

missä  $K_0$  on jätehuoltokaavion mukainen tavoitekustannus.

Esimerkiksi epävarmuuskerroin  $k = 1,20$  muuntuu suhteelliseksi ylärajaksi  $2,0 [= (1,20-1) \times 10]$ . Tämä  $2,0$  tulkitaan vaihteluvälin skaalatuksi ylärajaksi. Kustannusvaihtelun yläraja on tällöin kaksi kertaa tavoitekustannus. Koska  $1,1$  muuntuu yo. kaavalla vain ykköseksi ja koska se on kaiken kaikkiaan hämmästyttävän pieni luku tässä yhteydessä, on näiden kustannuserien suhteelliseksi ylärajaksi määritelty  $1,5$ .

Alustavassa laskennassa on käytetty alimpana mahdollisena kustannuksena  $80\%$  kustannusarvion mukaisesta kustannuksesta. Todennäköisimmäksi kustannukseksi on valittu kustannusarvion mukainen kustannus.

Jakaumaksi oletetaan ensi kolmion muotoinen todennäköisyysjakauma. Toisena vaihtoehtona on kokeiltu samoin kustannusrajoin Lichtenbergin /12/ innoittamana Gamma-jakaumaa. Oheinen kuva 9 selventää jakaumien eroa.



*Kuva 9. Gamma-jakauman ja kolmiojakauman vertailu 10 000 näytteen perusteella.*

Kolmiojakauma johtaa kuvan mukaisesti suurempien kustannusten todennäköisempään toteutumiseen kuin Gamma-jakaumaa käytettäessä. Gamma-jakaumassa taas painottuvat enemmän lähellä tavoitekustannusta olevat arvot. (Käyrien rajoittaman pinta-ala on luonnollisesti sama, yksi.) Kokonaiskustannukset muodostuvat kuitenkin useiden kustannuserien summana. Mitä useampia riippumattomia satunnaistekijöitä summataan, sitä varmemmin summan jakauma lähestyy normaalijakaumaa.

Kahden jakauman käytöllä on tarkoitus selvittää, miten oletus osakustannuksen jakaumasta vaikuttaa lopputulokseen.

### 3.4.2 Kustannusten jako

Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi ja sijoitus luolastoon tapahtuu yhdessä yhteisessä laitoksessa, jonka kulut jaetaan ydinvoimayhtiöille ydinjätteen määrän mukaisessa suhteessa. Käytetyn ydinpolttoaineen kuljetuskustannukset laitokselta loppusijoituspaikkakunnalle kuuluvat myös yhtiöiden jakamiin kustannuksiin. Jo ennen kuin loppusijoitusluolan paikka oli valittu, yhtiöt sopivat keskenään kuljetuskustannusten jakoperiaatteesta. Kummallakaan yhtiölle ei näin ole taloudellista intressiä puolustaa omaa laitospaikkaansa loppusijoituspaikaksi. Mitä lähempänä voimalalaitospaikkaa (molemmat yhtiöt huomioiden) loppusijoituspaikka on, sitä parempi molemmille yhtiöille.

Tutkimus-, kehitys- ja viranomaiskulut jaetaan kuljetuskustannusten tavoin yhtiöiden kesken sovituin kertoimin. Täysin yhtiökohtaisia kustannuseriä ovat yhtiöiden omiin ydinvoimalaitoksiin liittyvät kulut. Näitä eriä ovat laitosten purku, käytöstäpoisto ja syntyneen voimalaitosjätteen loppusijoituksesta syntyvät kustannukset.

Mallissa jaettujen kustannuserien kustannusepävarmuus huomioidaan ”prosessilähtöisesti” siten, että ensin lasketaan toiminnan (satunnais-)kustannukset, jotka sitten jaetaan sovit-  
tuja osuuskertoimia käyttäen yhtiöille. Lähestymistapa on tässä siis toiminnasta lähtevä. Toinen tapa olisi tarkastella yhtiöitä täysin erillisinä ja tarkastella jaettujakin kustannuseriä yhtiölle lankeavina satunnaiserinä. Prosessilähtöisyys on kuitenkin luontevampi käsittelytapa, koska se kuvaa sitä, mitä todella tapahtuu, ja siksi sitä sovelletaan tässä.

### 3.4.3 Kustannuserien riippumattomuus

Eräs keskeinen ongelma-alue kustannusepävarmuuden vaikutusten arvioinnissa on kustannuserien keskinäinen riippuvuus. Peruslähtökohta Monte Carlo -simuloinnissa on se, että kokonaiskustannukset jaotellaan siten, että osat ovat toisistaan riippumattomia. Jos ne todellisuudessa ovatkin toisistaan riippuvia siten, että niiden välillä on positiivinen korrelaatio, niin tehty oletus johtaa kokonaiskustannusten vaihteluvälin aliarviointiin. Tämän vuoksi kustannuserien riippuvuudet tulisi ottaa jatkossa tarkemman selvityksen kohteeksi.

Eräs kaikkia käyttökustannuksia yhdistävä seikka on työvoimakustannukset. Ne muodostuvat palkan ja tarvittavan työpanoksen määrän tulona. Ydinenergialain mukaan kustannuksia arvioidaan kuitenkin tarkasteluhetken tilanteessa (vaikka toiminnot toteutetaisiin vuosikymmenten kuluttua), joten palkkatason epävarmuutta ei juuri ole. Siten vain työvoimatarpeen määrästä johtuva epävarmuus jää työvoimakustannusten epävarmuudesta jäljelle. Se on erilainen kussakin osakustannuksessa ja riippumaton muiden osakustannusten epävarmuudesta. Mitään positiivista korrelaatiota eri osakustannusten

välille ei palkkakuluista siten synny. Loppusijoituspaikkakunnalle maksettavat kiinteistöverot määräytyvät taas sen mukaan, kuinka suuria investointeja tehdään käytetyn polttoaineen loppusijoituksen vaatimiin rakenteisiin. Sen mukaan käytetyn polttoaineen kustannusten ja ”muiden kustannusten” välillä on riippuvuus. Kaikki tämänkaltaiset riippuvuudet on riskianalyysiä varten laskentakaaviosta identifioitava ja mukautettava Monte Carlo -analyysin suorittamista varten, ettei epävarmuus tule aliarvioitua.

Yleisiä kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on listattu lähteissä /19, 20/ ja esimerkkejä näistä on Lichtenbergin menetelmää kuvaavassa luvussa.

#### **3.4.4 Epävarmoina huomioitavat kustannustekijät**

Laskennassa noudatetaan vaihteluvälin arvioinnin (range estimation) mukaista periaatetta, jossa epävarmuus huomioidaan vain niissä tekijöissä, joiden tavoitekustannuksen (kustannusarvion) ja arvioidun suurimman, tai pienimmän, kustannuksen välinen ero ylittää 0,5 % kokonaiskustannuksen määrästä. Kokonaiskustannukset lasketaan tässä tavoitekustannusten (jätehuoltokaavioissa kustannusarvion) mukaisina kustannuksina. Kokonaiskustannuksia on kahta luokkaa: koko ydinjätehuoltoa koskevat kustannukset ja yhtiökohtaiset kokonaiskustannukset. Yhtiökohtaisesti vaihtelun merkittävyyttä arvioidaan niissä kustannuksissa, jotka lankeavat jommankumman yhtiön yksin maksettavaksi.

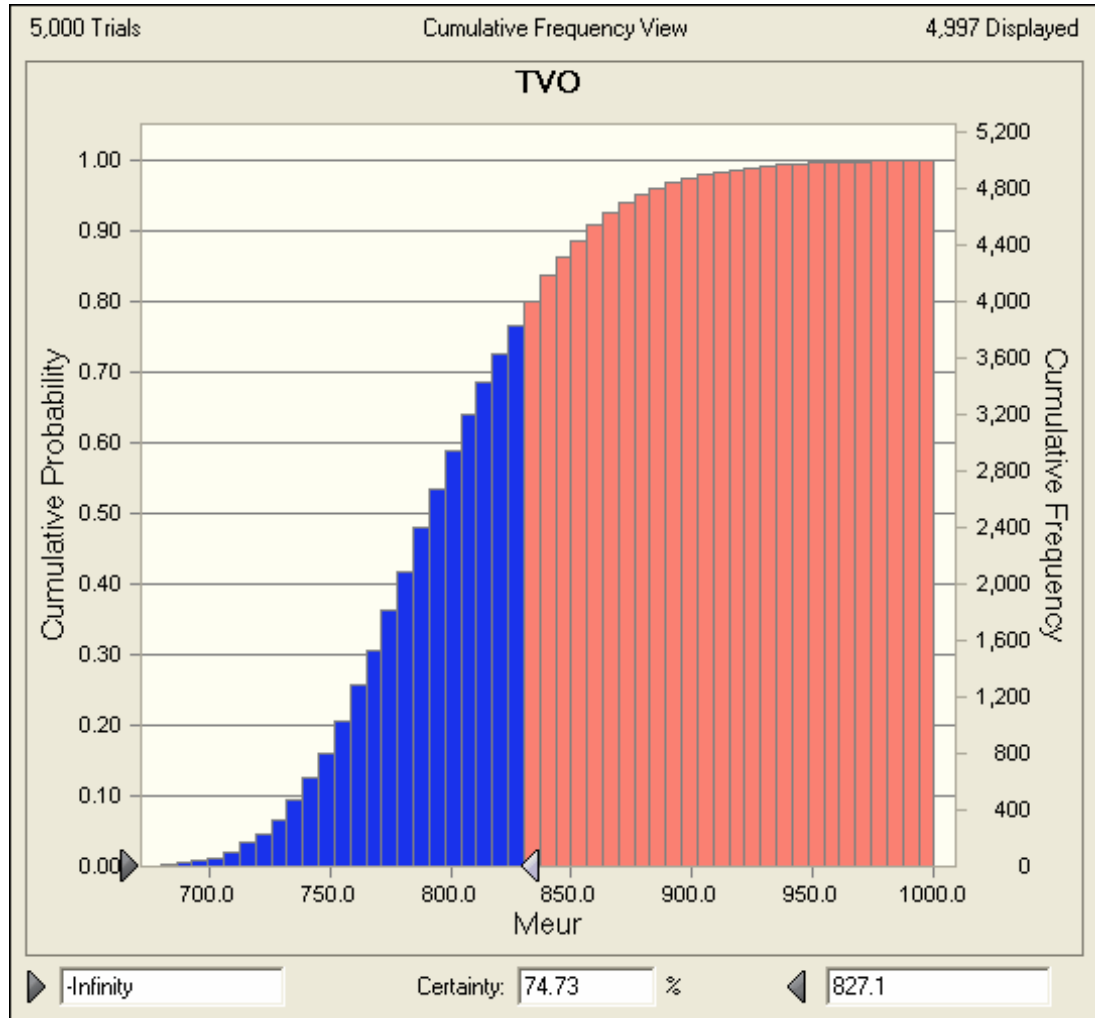
Jätehuoltokaaviossa on kaikkiaan seitsemän pääkohtaa. Ne jakautuvat ensin alakohtiin, jotka edelleen jakautuvat toimenpiteisiin. Kustannusriskianalyysin kannalta alakohtatarkkuus on riittävä. Näitä alakohtia on kaaviossa kaikkiaan 32 kappaletta. Näistä vain kolme kohdan vaihteluväli on aiemmin kuvatulla tavalla muodostetuista vaihteluväleistä niin pieniä, että ne eivät ylitä 0,5 % osuutta kokonaiskustannuksista. Epävarmoja simuloitavia kustannuseriä on siis 29 kappaletta.

### **3.5 Tulokset**

Tuloksia tarkastellaan yhtiökohtaisesti. Ensin esitellään TVO:n tulokset ja sitten Fortumin.

### 3.5.1 TVO

TVOn kustannusten kertymäfunktion kuvaaja esitetään kuvassa 10.



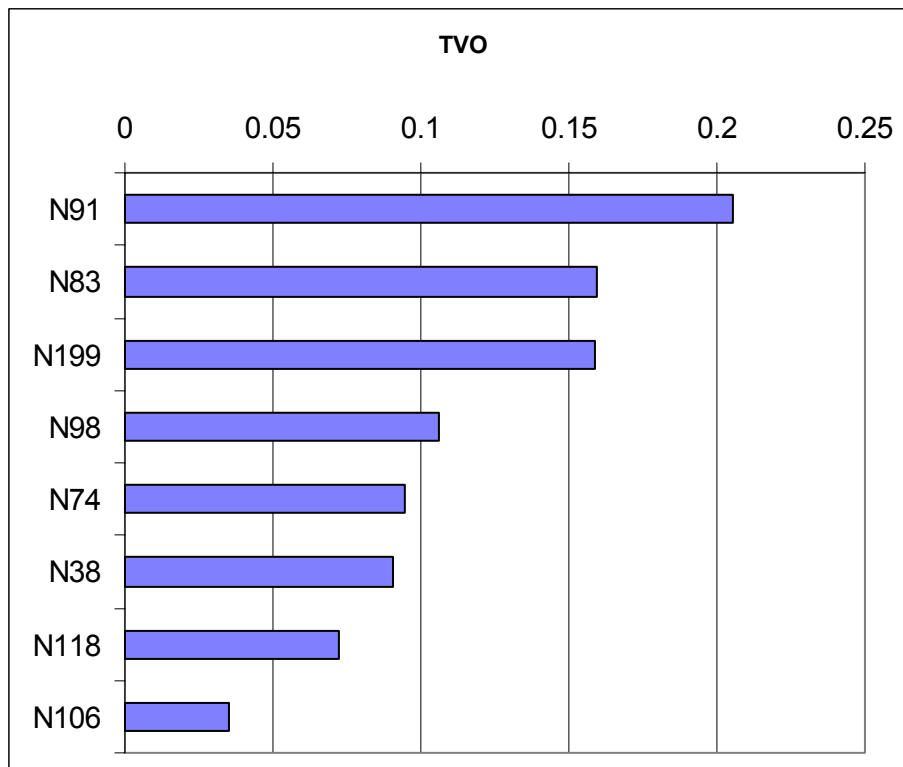
Kuva 10. TVO:n kustannusten kertymäfunktio. Tumma alue kuvaa vuoden 2005 vastuumääräarviota.

Vuoden 2005 vastuuarvion mukainen rahastomäärän riittävyys (tummalla merkitty osa) vastaa lähes 75 % todennäköisyyttä tehdyin oletuksin. Noin 40 M€ lisämääräraha ( $827 + 40 = 867$  M€) nostaisi todennäköisyyden jo 90 %:iin. Se vastaa vajaata 5 % vuoden 225 vastuumääräarviosta.

Kustannusarvio sellaisenaan ilman epävarmuuskertoimia päättyy loppusummaan 688 M€. TVOn kokonaiskustannusten odotusarvo on kuvan mukaan noin 800 M€. Sen mukaisesti peruspuskurin koko on  $(800 - 688) / 688 \times 100 \% = 16 \%$  kustannusarviosta. 90 % varmuus edellyttäisi lisäksi reilun 60 M€ lisämäärärahaa ( $800 + 60 = 860$  M€), mikä vastaa 9 % kustannusarviosta.

Tulokset seuraavat luonnollisesti tehdyistä oletuksista, eli kustannuserien todennäköisyysjakaumista. Kaikille erille oletettiin alarajaksi 80 % kustannusarviosta ja yläraja laskettiin aiemmin kuvatulla menetelmällä epävarmuuskertoimista. Menettely on kaavamainen, eikä sellaisenaan riittävä. Arvion tarkentaminen on keskeinen jatkohankkeen aihe.

Merkittävimmät riskitekijät selviävät kuvasta 11.



Kuva 11. TVOn kokonaiskustannuksiin eniten vaikuttavat epävarmuuden lähteet.

*N91 = Kapselit*

*N83 = Loppusijoitustilojen rakentaminen*

*N199 = Tutkimus ja kehitys sekä hallinto*

*N98 = Kapselilaitoksen käyttö*

*N74 = Kapselilaitoksen rakentaminen*

*N38 = Olkiluodon varaston käyttö (käytetyn polttoaineen välivarastointi)*

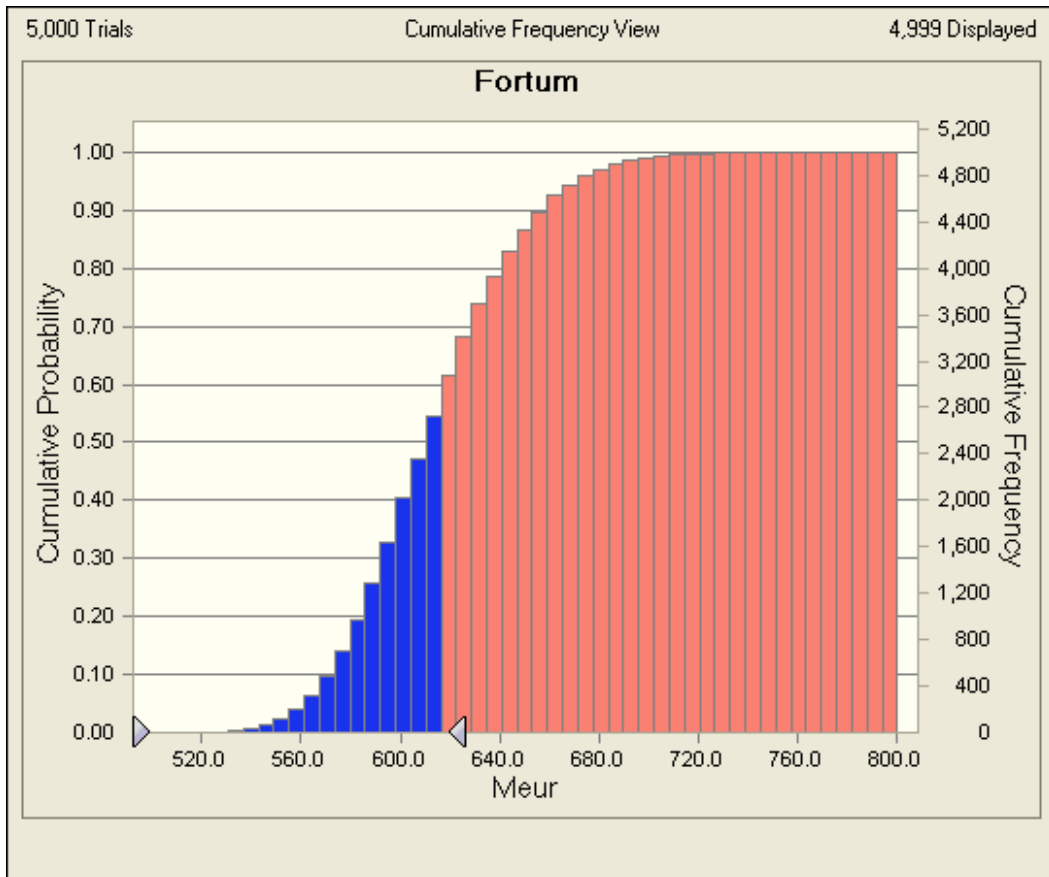
*N118 = Loppusijoitustilojen sulkeminen*

*N106 = Loppusijoitustilojen käyttö.*

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus kattaa kohdat N74–N123. Vain N199 ja N38 kuuluvat joihinkin muihin kustannuspääloukkuihin. Tämän laskelman mukaisesti riskin vähentämisen ponnistukset tulisi suunnata ydinpolttoaineen loppusijoitukseen ja tutkimus, kehitys ja hallintotoimenpiteiden analyysiin ja ennakointiin.

### 3.5.2 Fortum

Fortumin vastuumäärän kertymäfunktion kuvaaja on esitetty kuvassa 12.

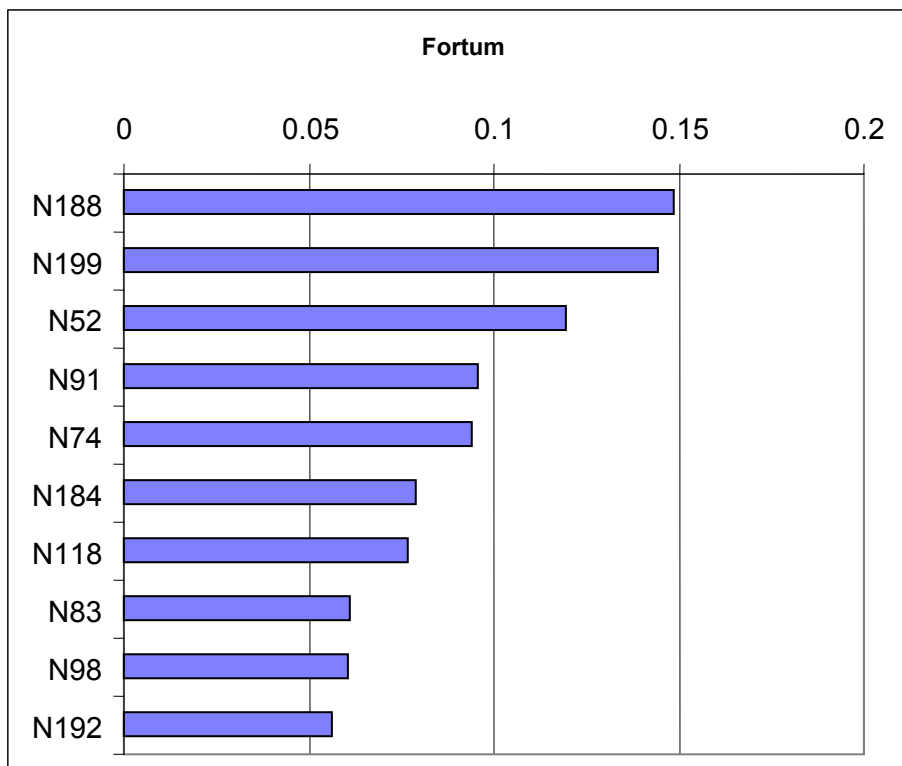


Kuva 12. Fortumin vastuumääräarvion kumulatiivinen arvo.

Tummalla merkitty alue edustaa vuoden 2005 vastuumäärää 618 M€. Se kattaa reilun 50 % todennäköisyydellä arvioidut kustannukset. Tämä osuus on alhaisempi kuin TVOn tapauksessa ja keskeinen syy on siinä, että ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston kustannusten yläraja-arviota nostettiin, koska käytetty algoritmi ei anna mielekästä tulosta niin alhaisella epävarmuuskertoimella, mitä jätehuoltokaaviossa on käytetty. Vertailuajo (tuloksia ei raportoida tässä) ajettiin yläraja-arvolla 1,25 (1,5 sijaan), jolloin vuoden 2005 vastuumääräarvio riitti 80 % todennäköisyydellä. Vertailuajon yläraja-arvo 1,25 vastaa epävarmuuskerrointa 1,125, kun jätehuoltokaaviossa on käytetty arvoa 1,10.

Kuvan mukaan noin 660 M€ riittää 90 % varmuudella syntyvien kustannusten peittämiseksi. Lisäystä vuoden 2005 vastuumääräarvioon tarvittaisiin siis 40 M€, mikä vastaa 6,5 %. Kustannusarvio ilman riskilisiä on 540 M€ ja kustannusten odotusarvo on vajaa 620 M€. Peruspuskuri on siis  $(620 - 540) / 540 \times 100 \% = 15 \%$  ja riskipuskuri tämän lisäksi 7 % (tavoitekustannuksesta). Laskelman perusteisiin pätee sama toteamus kuin TVO:nkin yhteydessä.

Fortumin riskilähteet paljastuvat kuvasta 13.



Kuva 13. Fortumin kokonaiskustannuksiin eniten vaikuttavat epävarmuuden lähteet.

- N188 = Kontaminoituneen materiaalin käsittely (voimalaitoksen käytöstäpoisto)
- N199 = Tutkimus ja kehitys sekä hallinto
- N52 = Loviisan varaston käyttökustannukset (KPA välivarastointi)
- N91 = Kapselit
- N74 = Kapselilaitoksen rakentaminen
- N184 = Voimalaitoksen käytöstäpoisto (voimalaitoksen käytöstäpoisto)
- N118 = Loppusijoitustilojen sulkeminen
- N98 = Kapselilaitoksen käyttö
- N83 = Loppusijoitustilojen rakentaminen
- N192 = Käytöstäpoistovaiheen käyttökustannukset (voimalaitoksen käytöstä poisto).

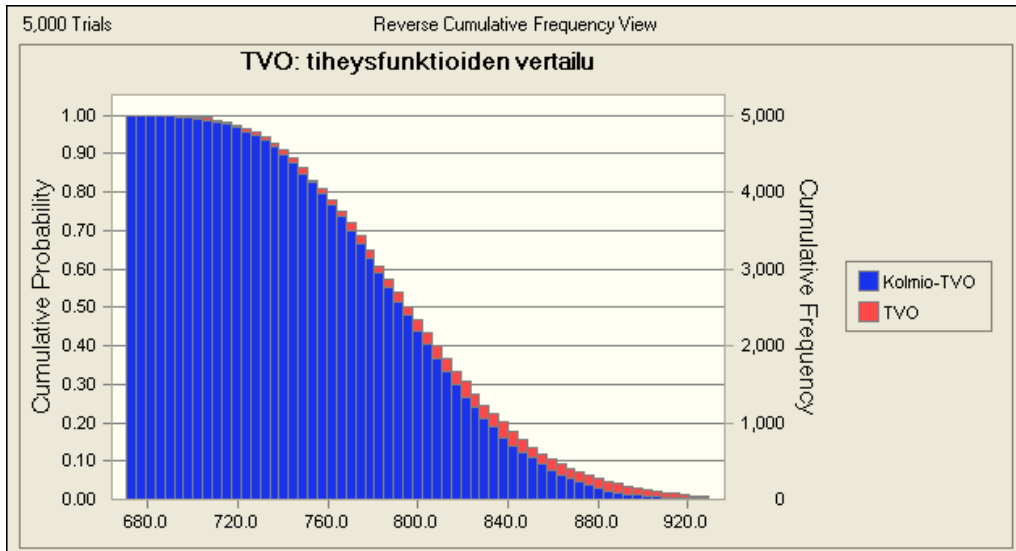
Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoisto (N184–N192) ja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus muodostavat kaksi suurta riskiryhmää. Molemmille yhtiöille on yhteistä tutkimus ym. toimintojen sijoitus korkealle epävarmuuksien luokittelussa.

Riskilähteet painottuvat hieman eri tavalla yhtiöiden välillä. Loviisan laitoksen välitön käytöstäpoisto Olkiluodon viivästettyyn verrattuna on merkittävä ero yhtiöiden valitsemien ratkaisujen välillä. Nämä erot näkyvät jo vastuumääräarvioissa, kuva 8.



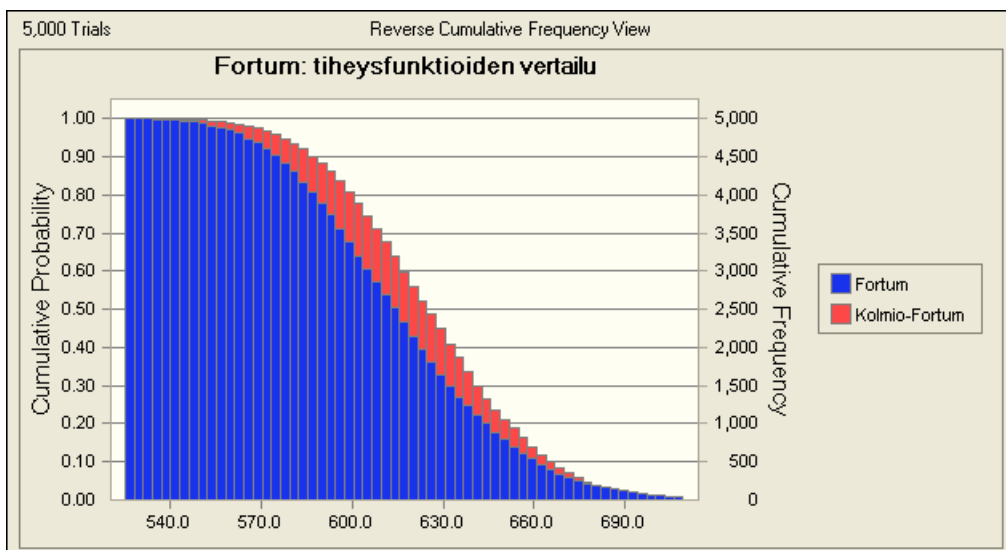
### 3.5.3 Jakauman tyypin vaikutus

Tulosten muuttuminen kustannuserien todennäköisyystiheysfunktion valinnasta selviää kuvista 14 ja 15.



Kuva 14. Tiheysfunktion vaikutus kustannuskertymään. ”Kolmio-TVO” viittaa kolmion muotoiseen tiheysfunktioon ja ”TVO” Gamma-funktion mukaiseen tiheysfunktioon.

TVO:n tapauksessa kuvaajat ovat hämmästyttävällä tarkkuudella samanlaiset. Gamma-jakaumaa käytettäessä tarvittava rahamäärä on aavistuksen suurempi – mitään todellista eroa tapausten välillä ei ole. Oletukset yksittäisten epävarmuuksien jakautumisesta vaikuttavat Fortumin tapauksessa tuloksiin TVOta enemmän, kuten kuvasta 15 nähdään.



Kuva 15. Jakauman muodon vaikutus lopputulokseen. ”Kolmio-Fortum” viittaa osakustannusten kolmion muotoiseen tiheysfunktioon ja ”Fortum” Gamma-funktion käyttöön.

Kuvan 15 esittämät erot johtuvat perimmältään siitä, että jätehuoltokaaviossa esitetty kustannus- ja riskirakenteet yhtiöiden välillä poikkeavat toisistaan: vain yhtä yhtiötä koskevat epävarmuuden lähteet on TVO:n tapauksessa jaettu useampaan luokkaan kuin Fortumilla. Tämän johdosta jakauman tyypillä on Fortumin tapauksessa enemmän vaikutusta lopputulokseen. Gamma-jakaumassa suuret kustannukset esiintyvät pienemmällä todennäköisyydellä kuin kolmiojakaumassa, vaikka jakauma jatkuukin pidemmälle suurten kustannusten suuntaan kuin kolmiojakaumassa. Kun tähän yhdistyy suhteellisen pieni summattavien muuttujien määrä, suurten kustannusten esiintymisen todennäköisyys on suurempi kuin tapauksessa, missä summattavia satunnaismuuttujia on enemmän. Mitä useampia riippumattomia satunnaissuureita lasketaan yhteen, sitä enemmän summajakauma muistuttaa normaalijakaumaa.

### 3.6 Päätelmät

Simulointimallin avulla voi oppia uutta järjestelmän vuorovaikutuksista sen antaessa mahdollisuuden tutkia tuloksen herkkyyttä eri tekijöille. Mallilaskelmien avulla voidaan myös valita ne osa-alueet, joihin hallintaan kannattaa erityisesti paneutua riskien vähentämiseksi. Kustannusten ja riskien suhteesta ja merkittävimmistä epävarmuuksista simulointi kertoo oleellisesti seikkaperäisemmin kuin pelkkä yhteen lukuun päätyvä kustannusarvio.

Laskelmat ovat vain esimerkkejä siitä, millaisia tuloksia tällä menetelmällä voi saada. Koska lähtötiedot on muodostettu kaavamaisesti käytössä olleista tiedoista, eivät lopputuloksetkaan voi olla lukuarvoiltaan luotettavia. Mutta tarkoitus olikin demonstroida riskianalyysillä saatavia tuloksia. Se oli mahdollista vain siten, että käytettävissä olleet lähtötiedot muunnettiin epävarmuutta sisältäviksi vaihteluväleiksi. Varsinaisen riskianalyysin tarvitsemat lähtötiedot on laadittava yhteistyössä voimayhtiöiden, Posivan ja analytiikan kesken. Näin varmistetaan niiden luotettavuus.

Jätehuoltokaavion mukainen laskentakehikko, jota on sovellettu tässä alustavassa mallissa, ei ole suoraan sovellettavissa varsinaiseen riskianalyysiin. Se johtuu siitä, että kustannusalalajien välillä on riippuvuuksia. Esimerkiksi käytetyn polttoaineen käsittelylaitosten ja kiinteistöveron määrä ”muut kustannukset” -osakustannuksissa ovat suoraan kytköksissä toisiinsa, sillä kustannusten suuruus on veron määräytymisperuste.

Monte Carlo -simuloinnissa kuitenkin oletetaan, että satunnaissuureet ovat riippumattomia. Sen vuoksi kaikki vastaavat kustannusosien väliset riippuvuudet tulee identifioida ja mahdollisuuksien mukaan poistaa tai muulla tavoin huomioida luotettavien tulosten saamiseksi. Tämä on toinen keskeinen kehityskohde.

## 4. Lichtenbergin menetelmä

Tätä menetelmää kutsutaan myös nimellä successive principle /12,13/, jonka voi tässä suomentaa vaikkapa osittamisperiaatteeksi. Se on tanskalaisen Steen Lichtenbergin kehittämä riskien analysoinnin ja epävarmuuksiin sisältyvien mahdollisuuksien hyödyntämisen menetelmä. Tämä menetelmä esitetään tässä kahdesta syystä: Ensiksi, sitä on käytetty Ruotsissa ydinjätteiden loppusijoitusten viranomaiskustannusten arvioinnissa /18, 19, 20/. Toiseksi, se ei perustu Monte Carlo -simulointiin, vaikka se onkin laskennallinen analysointitapa. Näin se antaa toisenlaisen näkökulman myös laskennalliseen analyysiin.

Lichtenbergin menetelmässä erityinen paino on hankkeen toteuttamisorganisaatiosta valittavan ryhmän toiminnan suunnittelu ja toteutus siten, että siihen valittujen jäsenten tieto ja kokemus saadaan esiin ja käyttöön. Tässä on oleellista myönteisen ja vapaan ilmapiirin luonti. Menetelmä on kehittynyt erilaisissa käytännön hankkeiden arvioinnissa vuosikymmenten aikana.

### 4.1 Menetelmän perusteita

Lichtenbergin menetelmä perustuu subjektiiviseen, Bayesilaiseen todennäköisyysteoriaan. Sen mukaan subjektiiviset numeeriset arviot hyväksytään lähtökohdaksi ja niitä käsitellään normaalien tilastollisten laskentamenetelmien tapaan.

Vuosikymmenten kokemus on johtanut seuraavien viiden peruseriaatteen formulointiin: Laadittavien (kustannus-)arvioiden realistisuus ja järkevyyttä edellyttää ...

1. ... todellisten ongelma-alueiden monimutkaisuuden ja epävarmuuden kannalta tasapainoisesti valittujen **keskeisten henkilöiden muodostaman analyysiryhmän jäsenten yhteistyötä**;
2. ... **kaikkien mahdollisesti merkittävien seikkojen huomioimista**, ei pelkästään fyysisten ja muodollisten seikkojen mukaan ottamista, vaan myös epämääräisten ja ”herkkien” asioiden käsittelyä avoimen luottamuksellisessa hengessä;
3. ... kaikkien relevanttien, niin subjektiivisten kuin objektiivisten, **lukujen arviointia neutraalisti ja korrektisti**;
4. ... epävarmuuden käsittelyä **todennäköisyyslakien mukaisesti** ja epävarmuuden synnyttämien mahdollisuuksien pohtimista. Laskelmien tulee olla kuitenkin yksinkertaisia ja ymmärrettäviä.

5. ... **kokonaisuudesta osiin** etenevän lähestymistavan soveltamista (top-down). Se sallii analyysiryhmän edetä systemaattisesti ja nopeasti kiinnittäen huomiota vain oleellisiin seikkoihin.

Menetelmän sovellukset alkavat laadullisella vaiheella ja ne jatkuvat laskennalliseen vaiheeseen. Lopuksi laaditaan tulosten perusteella toimenpidesuosituksia.

#### 4.1.1 Kvalitatiivinen vaihe

Kvalitatiivinen vaihe jakautuu kahteen pääkohtaan, jotka ovat analyysiryhmän muodostaminen ja epävarmuuden lähteiden tunnistaminen.

##### Analyysiryhmän muodostaminen

Keskeisten yksilöiden muodostama tasapainoinen analyysiryhmä valitaan ongelman mukaan. Tämä ryhmä toteuttaa alla kuvattavan analyysin. Ryhmän ensimmäinen tehtävä on perusteellinen keskustelu hankkeesta, sen tavoitteista, laajuudesta jne. Ryhmässä pitää olla erilaisia ihmisiä edustettuina, jotta näkemysten kirjo on riittävä. Näin voidaan varmistaa erityyppisten riskien ja mahdollisuuksien huomioiminen analyysivaiheessa.

##### Epävarmuuden yleiset lähteet

Valittu analyysiryhmä pyrkii tunnistamaan kaikki mahdolliset yleiset tai kaikenkattavat epävarmuuden lähteet. Nämä ”Yleiset syyt” sisältävät paitsi tekniset ja taloudelliset tekijät myös yhteiskunnalliset ja organisatoriset seikat. Jotta kaikki projektin onnistumisen kannalta oleelliset tekijät tulisivat esille, kuten ”ylimmän johdon tuki” tai ”projektipäällikön ammattitaito”, pitää ryhmän ilmapiirin olla avoin.

Tunnistetut yleiset epävarmuuden lähteet, ”**Yleiset syyt**”, kootaan 8–15 toisistaan riippumattomaan ”**Yleisvaikutusten**” ryhmään. Kustakin Yleisvaikutusten ryhmästä laaditaan lyhyt kuvaus, joka sisältää epävarmuuden primäärisen syyn. Näistä tekijöistä muodostuu analyysin kannalta tärkeät **Korjaustekijät**. Ne huomioivat eri tekijöiden väliset riippuvuudet ja ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat hankkeen kustannuksiin. Näitä ovat esimerkiksi aikatauluepävarmuus, korkotason epävarmuus, kansainvälinen tilanne jne. Nämä ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat kustannustasoon yleisesti, mutta ei välttämättä mihinkään kohtaan erityisesti. Korjaustekijöitä lisätään tarpeen mukaan analyysin eri tasoille.

Jokaiselle ryhmälle määritellään perustilanne ja käytännössä odotettavissa oleva tilanne. Näiden kahden tilanteen määrittely on oleellisen tärkeä seikka kokonaisarvion teossa. Niillä tarkoitetaan seuraavaa:

1. **Perustilanne.** Perustilanne määrittelee selkeän tilan jokaiselle Yleisvaikutukselle, minkä johdosta jäljelle jäävä epävarmuus rajoittuu paikalliseksi epävarmuudeksi (koska tekijöiden keskinäiset riippuvuustekijät vakioituvat Yleisvaikutusten määrittelyn myötä).
2. **Odotettavissa oleva tosiasiallinen tilanne.** Tämä määrittely, tai pikemminkin kuvaus, pitää sisällään kaikki luontaiset syyt poikkeamiin Perustilanteesta. Kuvaus on perustana yleisten korjaustermien arvioinnille. Nämä korjaukset muuntavat Perustilanteen mukaisen kokonaisarvion realistiseksi loppusummaksi.

Perustilanteen ei tarvitse heijastaa tosiasiallista tulevaisuuden tilannetta. Sen tarkoitus on tarjota vain perusteltu vertailutilanne, jonka pohjalta ”fyysisille” tekijöille voidaan tehdä määräraurio. Perustilanteen määrittely ja käyttö kuvatulla tavalla on analoginen sille, että ensin tehdään toteutettavasta hankkeesta kustannusarvio nykyisin hinnoin. Sen jälkeen loppusummaan lisätään erillinen kustannuserä, jossa huomioidaan arvioitujen tulevaisuuden hintojen vaikutus kustannuksiin. Näin saatu kustannusarvio on lopullinen arvio.

Luvun lopussa esitetään lyhyesti valittuja kohtia em. ruotsalaisraportista. Se konkretisoi tekstissä esitettyjä ajatuksia.

#### 4.1.2 Kvantitatiivinen vaihe

Laskennallinen vaihe etenee askeleittain tarkentuen niin pitkään, kuin osittamisesta saadaan hyötyä. Analyysin tuloksia käytetään lopuksi toimintasuunnitelman laadintaan. Neljä keskeistä osa-aluetta ovat:

- Keskeisten osien vuorovaikutuksen kuvaus eli perusrakenteen luonti
- Alustavan tuloksen laskenta
- Rakenteen systemaattinen ositus
- Toimintasuunnitelman luominen.

#### Perusrakenteen kuvaus

Analyysi alkaa kohdejärjestelmän keskeisten tekijöiden tai toimintojen joukon valinnalla ja kuvauksella. Lähtökohtaisesti rakenteen kuvaus lähtee ylätasolta ja etenee askeleittain kohti yksityiskohtia. Toisin sanoen, kyse on top-down-prosessista. Toisen tason osakoko-

naisuuksia on tyypillisesti 5–20. Tämä vaihe on hyvin tapauskohtainen. Osakokonaisuuksien valintaa rajoittaa vain se, että eri osien tulee olla suhteellisen riippumattomia toisistaan. Jos riippuvuus on voimakasta, osien on kuuluttava samaan kokonaisuuteen.

Osakokonaisuuksien numeeriset arvot määritetään kolmipistemenetelmällä, johon koko ryhmä osallistuu tätä tarkoitusta varten kehitetyllä tavalla. Tunnistetut kokonaisuudet sisältävät myös korjaustekijät, jotka heijastavat yleisten epävarmuutta aiheuttavien lähteiden vaikutuksen.

”Fyysisten” osien lisäksi huomioidaan korjaustekijät, jotka valitaan aiemmin listatuista Yleisvaikutusten ryhmästä. Ne sijoittuvat puumaisessa hankerakenteessa tyypillisesti hyvin ylös, mutta ei pelkästään sinne, kuten myöhemmin esitettävästä esimerkkikaavioista käy ilmi.

### **Ensimmäinen arvio**

Kukin osakokonaisuuden kolmipistearvio tehdään sillä ehdolla, että muut tekijät ovat perustilanteen mukaisessa arvossa. Subjekttiivisen todennäköisyysteorian mukaan kolmipistearvioinnilla määritetty suure voidaan tulkita stokastiseksi muuttujaksi, jota voidaan käsitellä normaalein laskusäännöin.

Numeeriset arviot annetaan keskiarvona ja paikallisena (vain tarkasteltavaan tekijään liittyvänä) epävarmuutena. Keskiarvon vaihtelu tai epävarmuus kuvataan vaihteluvälinä. Vaihteluvälin neliötä kutsutaan ”**Prioriteettiluvuksi**” (Priority Figure), sillä ne kuvaavat tekijän suhteellista merkittävyyttä kokonaistuloksen kannalta. Se on varianssiin verrattavissa oleva suure. Kokonaistuloksen vaihtelu vastaa riittävällä tarkkuudella prioriteettilukujen summaa. (Toisen kertaluvun vaikutukset puuttuvat).

Tilastollinen riippuvuus ja siihen liittyvät tekijät on tietoisesti eliminoitu. Se toteutetaan määrittelemällä paikallinen epävarmuus ehdolla, että muut tekijät ovat perustilanteen mukaisessa arvossa.

Ensimmäinen arvio kustannuksen keskiarvosta ja sen vaihteluvälistä lasketaan normaalein todennäköisyyslaskennan säännöin: keskiarvo on summa yli osakustannusten keskiarvojen (huomioiden myös Korjaustermit) ja hajonta saadaan prioriteettilukujen summan neliöjuurena.

Prioriteettiluku luku kertoo kustannustekijän suhteellisen merkittävyyden kokonaisarvion luottavuuteen. Prioriteettilukujen perusteella valitaan kymmenen eniten epävarmuuteen vaikuttavan tekijän lista jatkoanalyysin kohteiksi.

## **Systemaattinen osittamisprosessi**

Ensimmäinen kustannusarvio on perusaskel systemaattisessa osittamisprosessissa. Epävarmuuden kannalta tärkeimpien tekijöiden kuvausta tarkennetaan peräkkäisin kierroksin. Jos esimerkiksi tarkasteltavan tekijän epävarmuuden osuus kokonaisepävarmuudesta on vaikkapa kaksi prosenttia, niin kokonaisestimaatin epävarmuus ei juuri parane, vaikka tämän tekijän epävarmuus vähenisi oleellisesti. Eteneminen perustuukin sen vuoksi Prioriteettiluokuihin, jotka indikoivat kunkin tekijän suhteellisen vaikutuksen kokonaistuloksen epävarmuuteen. Näiden avulla huomio voidaan keskittää vain muutamaankin tärkeimpään seikkaan 20 / 80 -säännön mukaisesti.

Tehokas tapa vähentää epävarmuutta on jakaa tekijä useaksi osatekijäksi. Joka kerta, kun tällainen osajako tehdään, täytyy tilannetta tarkastella syntyvien osien vuorovaikutuksen kannalta. Jos riippuvuutta on, niin silloin on määriteltävä vastaava korjaustekijä, joka tämän riippuvuuden huomioi.

Tarkennuskierroksia on tyypillisesti 5–10. Suurimman epävarmuuden tekijät jaetaan osatekijöihin, ja niitä arvioidaan vastaavanlaisella kolmipistemenetelmällä. Tämä sama prosessi ulotetaan koskemaan tarvittavissa määrin myös Korjaustermeihin. Väistämättömät epävarmuustekijät dominoivat yhä suuremmissa määrin prosessia muutaman kierroksen jälkeen. Tämä pätee erityisesti korjaustermeihin, jotka selittävät tyypillisesti 80–90 % kokonaisepävarmuudesta. Korjaustermien epävarmuus jää yleensä korkeaksi, sillä ne ovat useimmiten koko ongelman laajuisia tekijöitä, tai ne kattavat hyvin suuren osa-alueen kokonaisuudesta. Esimerkiksi diskonttauskoron vaikutus ulottuu tyypillisesti lähes jokaiseen kustannuserään, samoin vaikuttaa esimerkiksi hankkeen toteutusaikataulun pituus.

Osittamisprosessi loppuu kun suurimmat Prioriteettiluvut kuuluvat tekijöille, joiden epävarmuutta ei voi enää vähentää. Tällöin epävarmuuden määrä on saavuttanut miniminsä, eli arvio on niin hyvä kuin se analyysin tekohetkellä on mahdollista. On huomattava, että vain analyysin kokonaistulos on luotettava, ei mikään yksittäistä ryhmää tai osa-aluetta koskeva tulos. Luotettavan tuloksen saavuttamisen edellytyksenä on prosessin oikeanlainen läpivienti pätevän vetäjän johdolla.

Ennen siirtymistä seuraavaan askeleeseen ryhmä käy vielä läpi tekijät, joilla on suurimmat prioriteettiluvut mahdollisten virheiden korjaamiseksi.

## **Toimintasuunnitelman luonti**

Analyysiryhmä keskittyy seuraavaksi epävarmuusprofiilin arviointiin. Tarkoituksena on aivoriihimäisesti ideoida toimenpiteitä, joilla hanketta voidaan parantaa. Toimenpiteet

voivat olla sellaisia, joita käyttämällä päästään hyödyntämään olemassa olevia mahdollisuuksia, suojautumaan riskeiltä tai vähentämään epävarmuutta. Toimenpiteiden laatua arvioidaan ja niistä valitaan soveliaimmat, joita ehdotetaan toteutettavaksi.

Viimeisenä vaiheena analyysiryhmä arvioi ehdotettujen toimien vaikutuksen oletuksella, että ne toteutetaan. Kvantitatiivinen dokumentti vaikutuksista antaa hyvän pohjan päätöksenteolle.

## 4.2 Sovellusesimerkki

Tämä esimerkkisovellus perustuu lähteeseen /20/. Siinä arvioidaan Ruotsin ydinjätehuollon viranomaiskustannusten tulevaa määrää.

### 4.2.1 Epävarmuuksien tunnistaminen

Yleiset epävarmuutta aiheuttavia tekijät on hankkeessa ryhmitelty kaikkiaan 15 ryhmään, jotka on esitetty määrääraioineen taulukossa 1.

*Taulukko 1. Epävarmuuden syyryhmät ja niiden kolmipistearviot. \* tarkoittaa diskonttatua määrää. mkr tarkoittaa miljoonaa Ruotsin vuoden 2005 kruunua.*

| Ryhmä                                  | Yksikkö | Min  | Todennäköinen | Max   |
|--|---------|------|---------------|-------|
| A. Poliitiikka, talous yhteiskunta*    | mkr     | -850 | +187          | +1500 |
| B. SKI/SSI, organisaatio ja johtaminen | %       | -50  | -3            | +50   |
| C. Suhteet muihin toimijoihin          | %       | -80  | -2            | +50   |
| D. Kansainvälinen tilanne*             | mkr     | -855 | +105          | +1700 |
| E. Reaalipalkka                        | %       | -50  | +1            | +43   |
| F. Tuottavuus*                         | %       | -30  | +1            | +50   |
| G1. Käyttöjakson pituus*               | mkr     | -100 | -74           | +54   |
| G2. Muu aikataulumuutos*               | mkr     | -140 | 0             | +140  |
| H. Tekniikka ja suunnittelu*           | mkr     | -300 | +158          | +1500 |
| I. Rahastoon liittyvät tekijät         | mkr     | -200 | +31           | +600  |
| L. Jäteluokittelu                      | %       | -80  | +3            | +50   |
| M. Suunnittelemattomat tapahtumat*     | mkr     | -400 | +190          | +1700 |
| N. Reaalikoron epävarmuus*             | mkr     | -274 | +1            | +563  |
| X. Perusdatan epävarmuus*              | mkr     | -200 | 0             | +200  |
| Y. Analyysitekniikan epävarmuus*       | mkr     | -600 | -105          | +300  |



Seuraavat taulukot, taulukot 2 ja 3, havainnollistavat muutamaa Yleisten syiden luokkaa. Taulukon ensimmäisessä sarakkeessa (Epävarmuuden syy) otsakkeen alle on listattu tunnistetut epävarmuuden yleiset syyt. Ryhmät vastaavat Korjaustekijöitä nimeen. Taulukon toisessa sarakkeessa (Perustilanneoletukset) määritellään Perustilanteen laskennan oletukset. Kolmas sarake (Mahdollisuudet) kuvaa nimensä mukaisesti tekijöitä, jotka voivat alentaa perustilanteen kustannuksia ja neljäs sarake (Riskit) niitä tekijöitä, jotka vastaavasti lisäävät kustannuksia perustilanteeseen verrattuna.

*Taulukko 2. Epävarmuutta aiheuttavat kansainväliset tekijät.*

| <b>Epävarmuuden syy</b>  | <b>Perustilanneoletukset</b>   | <b>Mahdollisuudet</b>   | <b>Riskit</b>  |
|--|--|---|--|
| <b>D KANSAINVÄLISET TEKIJÄT</b><br>– Jätekäytännöt ja muut kv. säännökset<br>– EU-vaikutus (raportointi, vaatimukset, lait, päätökset ym.)<br>– Globalisaatio ja kv. stabiilius<br>– Tapahtumat Ruotsin ulkopuolella<br>– Kv. kokemukset ja käytännöt<br>– Lisääntyvät vaatimukset jätevalvonnassa | – Perusdata ilman EU-vaikutusta<br>– Kv. yhteistyö ja info kuten nyt<br>– Nykyiset vaatimukset jätehuollossa<br>– Nykyinen kv. tilanne<br>– Ei huomioida ulkomaisia mahdollisia tapahtumia | – EU-vaikutus, pienemmät vaatimukset<br>– Kv. harmonisointi voi merkitä vähempiä vaatimuksia<br>– Kokemukset muista käytöstä-poistoista | – EU-vaikutus, kovemmat vaatimukset<br>– Säännökset ydinainevalvonnasta viivästyvät<br>– Tapahtumat muissa maissa<br>– Kv. harmonisointi voi kiristää vaatimuksia<br>– Kokemukset muista käytöstä-poistoista |

Taulukko 3. Aikataulumuutos korjaustekijänä.

| Epävarmuuden syy   | Perustilanneoletukset   | Mahdollisuudet   | Riskit  |
|--|---|--|---|
| <b>G1 ja G2 Aikataulut</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Käyttöajan pituus</li> <li>– Clabin ja muiden laitteistojen myöhästyminen</li> <li>– Jätteen loppusijoituspaikka ja -aikataulu</li> <li>– Resurssitoimituskatkokset</li> <li>– Ylläpitojakson pituus</li> <li>– Loppusijoituksen nopeus</li> <li>– Aikaistettu/myöhennetty käytöstäpoisto</li> <li>– Aikataulumuutokset</li> </ul> | <p>Nykyisiä voimaloita käytetään väh. 25 vuotta, keskim. 29 vuotta. Sulkemisen jälkeen aikaa kuluu seuraavasti:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– 2 v. pa:n pois-kuljetukseen</li> <li>– Ylläpitojakso max 8 v.</li> <li>– Purkamisen valmistelu 3 v.</li> <li>– Purkaminen 4 v.</li> </ul> <p>Jokainen vuosi 25 v. jälkeen tulkitaan kustannusneutraaliksi.</p> <p>Perussuunnitelmassa ohjelma loppuu 2048.</p> <p>Kustannukset vuosilta 2007–2048 huomioidaan.</p> <p>Kapselointi ja loppusijoitus toimivat jatkuvasti.</p> <p>Ei resurssivajeesta johtuvia viivästymisiä tai hinnannousuja.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aikaistaminen</li> <li>– Ajoitusmuutokset</li> <li>– Toinen purkutapa</li> <li>– Käyttö- ja ylläpito-periodi</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Myöhentäminen</li> <li>– Resurssivajeesta johtuvat tekijät</li> <li>– Ajoitusmuutokset</li> <li>– Toinen purkutapa</li> <li>– Käyttö- ja ylläpito-periodi</li> <li>– Myöhästymiset, esim. Clab</li> <li>– Loppusijoituksen nopeus</li> </ul> |

#### 4.2.2 Lopullinen rakenne

Ongelman kokonaisrakenne selviää seuraavasta listasta. Siinä on käytetty koodausta erottamaan eri tekijät toisistaan. Perustilanteen mukaiset tekijät ovat normaalitekstiä. Alleviivaus liittyy nykyarvoistamiseen (diskonttaus ja nykyarvo) ja *kursiivi* korjaustekijään. Diskonttaukselle on myös vaihteluväli, koska korkotasossa on epävarmuutta.

Odotusarvon (S01, kokonaiskustannuksen odotusarvo) laskentakaavat on kirjoitettu näkyviin. Hajonta lasketaan normaaliin tapaan summaamalla osatekijöiden prioriteettiluvut (varianssit) yhteen ja ottamalla siitä lopuksi neliöjuuri.

**Osio 01:** Kustannusten nykyarvo yhteensä, S01:

$$S01 = S02 + SG + SN$$

- 10 Summa: perusaika ja peruskorko (S02 osiosta 02)
- 20 Korjaustermi G:  $SG = Aikaepävarmuus$
- 30 Korjaustermi N:  $SN = Korkoepävarmuus$

**Osio 02:** Diskontattu summa; aika- ja korkotekijät perusarvoissaan, S02:

$$S02 = S03 + SA + SD + SH + SM + SX + SY$$

- 10 Diskontattu summa ennen ao. korjauksia (S03 osiosta 03):
- 20 Korjaustermi A:  $SA = Politiikka, Talous ja Yhteiskunta$  (diskontattu)
- 30 Korjaustermi D:  $SD = Kansainväliset suhteet$  (diskontattu)
- 40 Korjaustermi H:  $SH = Teknologia ja suunnittelu$  (diskontattu)
- 50 Korjaustermi M:  $SM = Yllättävät tapahtumat ml. Luonto$  (diskontattu)
- 60 Korjaustermi X:  $SX = Perusdatan epävarmuus$  (diskontattu)
- 70 Korjaustermi Y:  $SY = Analyysitekniset epävarmuudet$  (diskontattu)

**Osio 03:** Kustannussumma ennen yleiskorjauksia, S03:

$$S03 = S310 + S320 + S325 + S327 + S340 + S345 + S350 + SI50$$

- 10 **Diskontatut** henkilökustannukset:  $S310 = SR \times SH$ 
  - Resurssitarve (S04 osiosta 04):  $SR = S04 \times sL$ 
    - Korjaustermi L:  $sL = Jäteluokittelu$
  - Henkilökustannukset, keskiarvo (S05 osiosta 05):  $SH = S05 \times sB \times - \times sF$ 
    - Korjaustermi B:  $sB = SKI/SSI$
    - Korjaustermi C:  $sC = Suhteet muihin toimijoihin$
    - Korjaustermi E:  $sE = Reaalipalkat$
    - Korjaustermi F:  $sF = Tuottavuus$
- 20 R & D:  $S320 = Sp320 \times d320$ 
  - Perustilanne, Sp320
  - Diskonttaustekijä, d320
- 25 SSI Laboratorio ja mittausvälineistö:  $S325 = Sp325 \times d325$ 
  - Perustilanne, Sp325
  - Diskonttaustekijä, d325
- 27 SSI Valmiuskustannukset:  $S320 = Sp327 \times d327$

- Perustilanne, Sp327
- Diskonttaustekijä, d327
- 40 Muiden organisaatioiden kustannukset:  $S340 = Sp340 \times d340$ 
  - Perustilanne, Sp340
  - Diskonttaustekijä, d340
- 45 SKB allokointi:  $S345 = Sp345 \times d345$ 
  - Perustilanne, Sp345
  - Diskonttaustekijä, d345
- *50 Korjaustermi I:  $sI350 = Rahastokustannukset$*

**Osio 04:** Resurssitarve, diskontattu perustilanne, S04:

|  |
|--|
| $S04 = S410 + S420 + S430 + S440 + S450$ |
|--|

- 10 Voimalaitosvalvonta:  $S410 = Sp10 \times d410$ 
  - Perustilanne: Sp410
  - Diskonttaustekijä, d410
- 20 Valvonta, muut rak. ja ydinmateriaali:  $S420 = Sp420 \times d420$ 
  - Perustilanne: Sp420
  - Diskonttaustekijä, d420
- 30 Käytöstäpoiston valmius:  $S430 = Sp430 \times d430$ 
  - Perustilanne: Sp430
  - Diskonttaustekijä, d430
- 40 Tukitoiminnot:  $S410 = Sp440 \times d440$ 
  - Perustilanne: Sp440
  - Diskonttaustekijä, d440
- 50 Informaatio:  $S410 = Sp450 \times d450$ 
  - Perustilanne: Sp450
  - Diskonttaustekijä, d450

**Osio 05:** SKI/SSI, keskimääräiset vuosikustannukset, S05:

|                            |
|----------------------------|
| $S05 = S510 + S520 + S530$ |
|----------------------------|

- 10 Keskipalkka / vuosi: S510
- 20 Toimitilakustannukset / henkilö / vuosi: S520
- 30 Muut henkilökustannukset / vuosi: S530

### 4.2.3 Korjaustermien laskenta

Seuraavassa on lyhyt kuvaus Aikatauluun liittyvistä korjaustermeistä ja Reaalikoron kehitysvaihtoehtojen vaikutusten laskennasta.

Muutos aikataulussa aiheuttaa vain marginaalisen muutoksen lopputulokseen. Se johtuu siitä, että aikataulumuutos aiheuttaa kaksi eri suuntiin vaikuttavaa kustannusmuutosta: (a) diskonttaustekijät muuttuvat ja (b) jätemäärä ja resurssitarve muuttuvat. Koska vaikutus on vähäinen, niin karkea laskelma on riittävä. Kaksi toisistaan riippumatonta syytä aikataulumuutoksiin ovat voimalaitosten keskimääräisen käyttöajan pituuden epävarmuus ja käytön päättymisen ja purkamisen välisen ylläpitojakson pituuden epävarmuus.

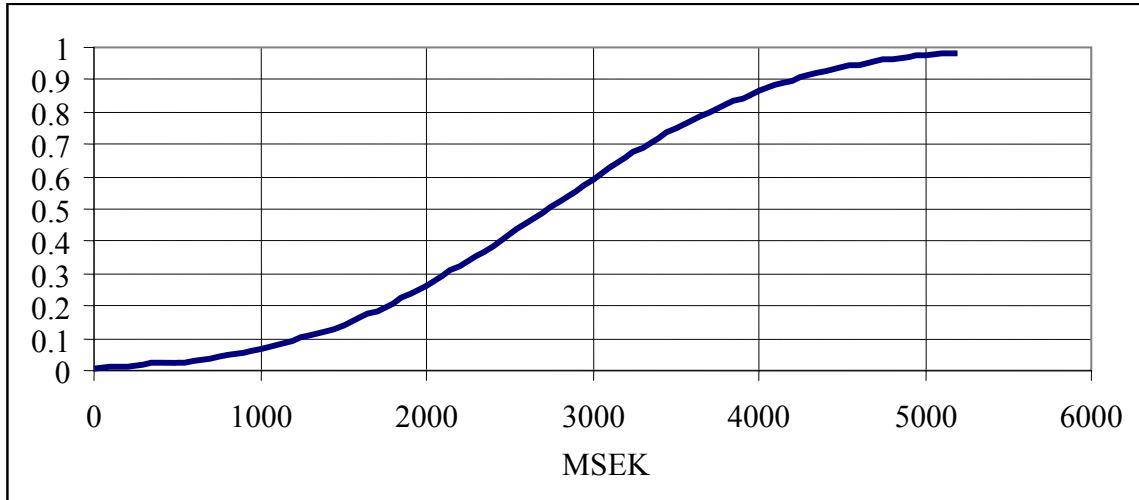
Ensin mainitun tekijän lähtökohtana on ydinvoimalaitoksen keskimääräinen 29 vuoden käyttöaika. On arvioitu, että se voi lyhentyä enintään keskimäärin 3 vuotta. Käyttöajan pidentäminen arvioidaan enintään 25 vuodeksi. Todennäköisimpänä lukuna pidetään 20 vuoden pidennystä. Tarkasteltavat muutokset perustilanteeseen verrattuna ovat siis (-3 v. / 20 v. / 29 v.). Kolmen vuoden käytöstäpoiston aikaistamisen arvioitiin nostavan kustannusten nykyarvoa 134 miljoonalla kruunulla. Pienentynyt jätemäärä merkitsee pienempiä kustannuksia. On arvioitu, että tästä aiheutuu noin 80 mkr kustannusalenema. Nettovaikutus on siis  $134 - 80 = 54$  mkr. Tämä on suurin kustannuslisäys (käyttöään lyhennys aiheuttaa suurimmat kustannukset; käytön pidentäminen pienentää kustannuksia). Kun vastaavalla tavalla arvioidaan käyttöään todennäköinen ja maksimaalinen pidennys, päädytään seuraavaan vaihteluvälin kolmipistearvioon (min/tod.näk./max) (-100 mkr / -74 mkr / +54 mkr). Tämä on korjaustekijä 20 G1 laskentaosiossa 01.

Ylläpitojakson (voimalan pysäytyksen ja purkamisen aloittamisen välillä) arvellaan vaihtelevan 5 ja 15 vuoden välillä, kun suunnitteluarvo on 10 vuotta. Vaihtelu on siis +/- 5 vuotta nollan ollessa todennäköisin arvo. Laskelma perustuu 11,5 henkilötyövuoden per vuosi muutokseen työvoima-arvioissa kullekin neljälle voimalaitokselle. Se määrä työtä joko tulee lisää tai poistuu, sen mukaan mikä vaihtoehto toteutuu. Kolmipistearvioksi tulee tällöin -140 / 0 / +140 mkr. Tämä on korjaustermi 25 G2.

Reaalikoron muutoksen vaikutus arvioitiin simuloimalla, koska koron oletettiin muuttuvan jatkuvasti ajan mukana. Saadut tulokset kokonaiskustannuksista vähennettiin perustilanteen arvosta erotuksen ollessa koron muutoksen vaikutus. Vaikutus lopputulokseen on melko vähäinen, kuten kuvasta 16 käy ilmi.

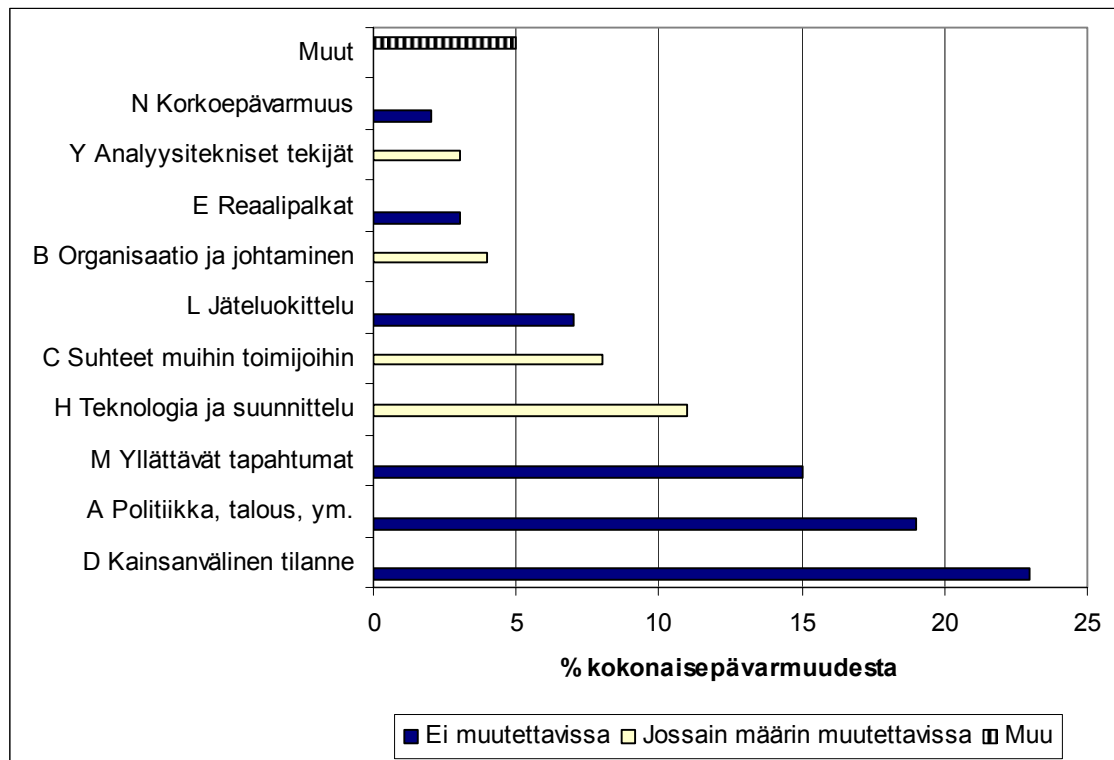
#### 4.2.4 Tulos ja epävarmuustekijät

Kokonaiskustannuksen epävarmuus on esitetty kertymäfunktio muodossa kuvassa 16. Kertymän keskiarvo on 2 700 mkr ja hajonta 1 153 mkr. 90 % todennäköisyydellä kustannukset jäävät alle 4 200 mkr ja vastaavalla todennäköisyydellä ylittävät 1 260 mkr.



*Kuva 16. Kustannuksen kertymäfunktio.*

Epävarmuuden lähteiden kymmenen lista on esitetty kuvassa 17. Kaikki merkittävimmät epävarmuuden syyt ovat korjaustermeissä. Se on tavanomainen tilanne.



Kuva 17. Kymmenen tärkeintä epävarmuustekijää. ”Ei muutettavissa” tarkoittaa tekijöitä, jotka ovat täysin toteuttajaorganisaatiosta riippumattomia. ”Muutettavissa” olevat tekijät ovat sellaisia, joihin toimijoiden omat toimenpiteet vaikuttavat ainakin jossain määrin, mutta suurelta osin ne ovat ulkoisista tekijöistä johtuvia epävarmuuksia.

### 4.3 Päätelmiä

Lichtenbergin menetelmän ilmeinen vahvuus on kaikkien epävarmuuden lähteiden huomioiminen todennäköisyysmatemaattisesti perustellulla ja samalla laskennallisesti yksinkertaisella tavalla. Menetelmän soveltaminen etenee siten, että muodostetaan perustilanne ja tutkitaan poikkeamien vaikutusta tähän perustilanteeseen. Tässä sovelletaan ehdollisen todennäköisyyden käsitettä, eli muut tekijät ovat perustilannearvoissaan ja vain tarkastelun kohteena oleva tekijä muuttuu. Epävarmojen tekijöiden numeroarvojen harhaisuus vältetään sillä, että arvot eivät ole jonkin yksittäisen henkilön arvioita, vaan ryhmäarvioinnin tulos. Tällä on kokemuksen mukaan arvioita huomattavasti parantava vaikutus.

Tässä raportissa tehtyyn Monte Carlo -simulointiin verrattuna on Lichtenbergin menetelmä toteutustavaltaan seikkaperäisempi ja raskaampi, mutta sen sisäänrakennetut toteutusmekanismit, tiedonhankinnan ryhmätyön toteutus (esitellään lähteessä /12/), kaikkien yleisten epävarmuutta aiheuttavien tekijöiden tunnistaminen ja arviointi, ja erityisesti tekijöiden keskinäisen riippuvuuden huomiointi, ovat perusteltuja ja muodostavat

vankan kokonaisuuden. Monte Carlo -simulointia soveltava Range esitimating /6, 7, 8, 9/ ja sen pohjalle kehittynyt analyysivälineistöperhe, lienee vastaava kokonaisuus. Tämä päätelmä on tehty mainittujen artikkeleiden ja ko. yhtiön verkkosivujen sisältämän kuvauksen perusteella /9/. Lichtenbergin kirjan veroista seikkaperäistä kuvausta tästä menetelmästä ei ole saatavissa.



## 5. Yhteenveto

Työssä on esitelty riskianalyysin perusteet ja sovellettu niitä suomalaiseseen ydinjätehuoltoympäristöön. Projektissa on laadittu ydinjätehuollon kustannusriskien analysointiin soveltuva alustava Monte Carlo -simulointimalli, jolla on laskettu tuloksia. Tulokset ovat alustavia, koska malli noudattaa suoraan jätehuoltokaavion rakennetta ja epävarmuuden kuvaukseen käytetty lähtötietoaineisto muodostettiin kaavamaisesti nykykäytännön mukaisesta aineistosta. Sen vuoksi tulosten numeroarvoja ei voi sellaisenaan käyttää päätelmien tekoon. Tarkoitus on ollut demonstroida, millaisia tuloksia on saatavissa.

Saatujen kokemusten mukaan jatkotyössä tulee keskittyä ensinäkin lähtötietoaineiston luontiin ja toiseksi, epävarmuuksien keskinäisten vuorovaikutusten identifiointiin ja niiden minimointiin mallin rakennetta muuttamalla. Jätehuoltokaavio on hioutunut hyvään muotoon vuosien varrella, joten mallin tulisi olla sellainen, että kaavio muodostaisi jatkossakin lähtötietoaineiston perustan. Vuosittain päivitettävää jätehuoltokaaviota vain muokattaisiin ohjelmallisesti varsinaisen riskianalyysin lähtötietoaineistoksi. Sen lisäksi tarvitaan luonnollisesti arviot epävarmuudesta valittujen epävarmuutta sisältävistä osakustannuksista. Tässä työssä käytetty voi soveltua viimeistellynkin mallin pohjaksi, mutta sen edellytyksenä on asian tarkka läpikäynti osakustannus osakustannukselta.

Lichtenbergin menetelmän soveltaminen Suomessa on myös mahdollinen etenemissuunta. Sen vahvuus on ehdottomasti epävarmuuksien välisen vuorovaikutusten huomioiminen oleellisena osana analyysin rakennetta. Toinen vahvuus on ryhmätoiminnan muotojen kehittyneisyys lähtötietojen hankinnassa ja epävarmuuksien tunnistamisessa. Tämä on myös menetelmän heikkous: se vuosittainen toteuttaminen olisi raskas prosessi. Laskennallisesti tämä menetelmä on yksinkertainen. Menetelmän soveltaminen edellyttää siihen sisätyvien työtapojen tuntemusta ja harjaantuneisuutta. Erityisesti tämä liittyy ryhmätoiminnan johtamiseen soveltamisen eri vaiheissa. Suomessa on ainakin yksi konsulttitoimisto, joka tätä menetelmää käyttää<sup>1</sup> hankearviointiin.

---

<sup>1</sup> Futura International Oy.

## Lähdeluettelo

1. Karlsen, J. T., Lereim, J. Management of Project Contingency and Allowance. *Cost Engineering*, Vol. 47, No. 9, September 2005.
2. Lorance, R., Wendling, R. Basic Techniques for Analyzing and Presentation of cost Risk Analysis. *Cost Engineering*, Vol. 43, No. 6, June 2001.
3. Dillon, R. L., John, R., von Winterfeldt, D. Assessment of cost uncertainties for large technology projects: A methodology and application. *Interfaces*, Vol. 32, No. 4, July–August 2002.
4. Hulett, D. Project cost risk analysis using Crystal Ball<sup>®</sup>. <http://www.decisionengineering.com/articles>.
5. Kindinger, J. Use of Probabilistic Cost and Schedule Analysis Results for Project Budgeting and Contingency Analysis at Los Alamos National Laboratory. *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual Management Institute 1999, Seminars & Symposium, Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 10–16, 1999.*
6. Curran, M. Range Estimating. *Cost Engineering*, Vol. 31, No. 3, March 1989.
7. Curran, K. Value-Based Risk Management (VBRM). *Cost Engineering*, Vol. 48, No. 2, February 2006.
8. Humphreys, K. Conducting Project Risk Analysis: How to Do It and How Not to Do It. *ICEC International Roundup*, April 2005. 10 p.
9. Misconceptions about Range Estimating. <http://uncertain.com>.
10. Clark, D. Monte Carlo Analysis: Ten Years of Experience. *Cost Engineering*, Vol. 43, No. 6, June 2001.
11. Hillson, D., Hulett, D. Assessing Risk Probability: Alternative Approaches. *Project Management Congress Proceedings 2004*. Prague, 2004.
12. Lichtenberg, S. *Proactive Management of Uncertainty Using the Successive Principle*. Polyteknisk Press, Copenhagen 2000.
13. Lichtenberg, S. How to avoid overruns and delays successfully – nine basic rules and an associated operable procedure. *ICEC Internet Journal*, October 2005.

14. Flyvberg, B. et al. How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, Vol. 23, No. 1, 2003.
15. Flyvberg, B. Financial Risk in Major Investment Projects. In: *Betalningsansvaret för kärnavfallet. Statens offentliga utredningar (SOU). Miljö- och samhällsbyggnasdep. SOU 2004:125.*
16. Ydinjätehuollon vastuumäärälaskelmien evaluointi / ydinvoimalaitosten käytöstäpoisto. Kauppa- ja teollisuusministeriön kertomuksia ja selvityksiä 4/2003. Energiaosasto.
17. Evaluation of the Liability Amount Calculations for the Encapsulation Plant. Ministry of Trade and Industry. MTI Financed studies 11/2005. Energy Department.
18. Lichtenberg, S. Development of an Estimating Procedure for the Annual PLAN Process. SKI Report 2003:43. January 2003.
19. Borg, L., Lichtenberg, S., Lindskog, S. Metodutveckling avseende kostnadskalkylering for programmet for avveckling och rivning ab kärntekniska anläggningar. SKI Rapport 2004:35. September 2004.
20. Borg, L., Lichtenberg, S., Lindskog, S. En probabilistisk skattning av de framtida myndighetskostnaderna. SKI Rapport 2005:50. September 2005.
21. Hammond, J., Keeney, R., Raiffa, H. The Hidden Traps in Decision Making. *Harvard Business Review*, Vol. 84, No. 1, 2006.
22. Tarkastuskertomus 80/2004. Valtion ydinjätehuoltorahasto. Valtiontalouden tarkastusvirasto.

## VTT Working papers

- 44 Saارين, Jani, Rilla, Nina, Loikkanen, Torsti, Oksanen, Juha & Alasaarela, Jaakko. Inno-vaatioympäristö tänään ja huomenna. 2006. 32 s.
- 45 Heinonen, Jaakko. Preliminary Study of Modelling Dynamic Properties of Magnetorheological Fluid Damper. 2006. 36 p.
- 46 Häkkinen, Kai & Salmela, Erno. Logistiikkapalveluyhtiömalleja Suomen metalliteollisuudessa. Havainnot vuonna 2005. SERVIISI-projektin osaraportti. 2006. 17 s.
- 47 Kurtti, Reetta & Reiman, Teemu. Organisaatiokulttuuri logistiikkapalveluorganisaatiossa. Tutki-mus viidessä palveluvarastossa. 2006. 30 s.
- 48 Soimakallio, Sampo, Perrels, Adriaan, Honkatukia, Juha, Moltmann, Sara & Höhne, Niklas. Ana-lysis and Evaluation of Triptych 6. Case Finland. 2006. 70 p. + app. 8 p.
- 49 Saارين, Jani, Rilla, Nina, Loikkanen, Torsti, Oksanen, Juha & Alasaarela, Jaakko. Innovation environment today and tomorrow. 2006. 32 p.
- 50 Törnqvist, Jouko & Talja, Asko. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. 2006. 46 s. + liitt. 33 s.
- 51 Aikio, Sanna, Grönqvist, Stina, Hakola, Liisa, Hurme, Eero, Jussila, Salme, Kaukoniemi, Otto-Ville, Kopola, Harri, Käsäkoski, Markku, Leinonen, Marika, Lippo, Sari, Mahlberg, Riitta, Peltonen, Soili, Qvintus-Leino, Pia, Rajamäki, Tiina, Ritschkoff, Anne-Christine, Smolander, Maria, Vartiainen, Jari, Viikari, Liisa & Vilkmann, Marja. Bioactive paper and fibre products. Patent and literary survey. 2006. 83 p.
- 52 Alanen, Raili & Hätönen, Hannu. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. State of art -selvitys. 2006. 84 s.
- 53 Pasonen, Markku & Hakkarainen, Toni. Kaukolämpölinjojen elinikä ja NDT. 2006. 27 s.
- 54 Hietaniemi, Jukka, Toratti, Tomi, Schnabl, Simon & Turk, Goran. Application of reliability analy-sis and fire simulation to probabilistic assessment of fire endurance of wooden structures. 2006. 97 p. + app. 23 p.
- 55 Holttinen, Hannele. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2005. 2006. 38 s. + liitt. 7 s.
- 56 Häkkinen, Kai, Hemilä, Jukka, Salmela, Erno & Happonen, Ari. Logistiikka Belgiassa. Vierailu-kokemuksia keväältä 2006. 2006. 33 s.
- 57 Kulmala, Risto. Tiehallinto ja liikenteen tietopalvelut. Selvitysmiehen muistio. 2006. 29 s. + liitt. 3 s.
- 59 Graczykowski, Cezary & Heinonen, Jaakko. Adaptive Inflatable Structures for protecting wind turbines against ship collisions. 2006. 86 p. + app. 39 p.
- 60 Käsäkoski, Markku, Kurkinen, Marika, von Weymarn, Niklas, Niemelä, Pentti, Neubauer, Peter, Juuso, Esko, Eerikäinen, Tero, Turunen, Seppo, Aho, Sirkka & Suhonen, Pirkko. Process analyti-cal technology (PAT) needs and applications in the bioprocess industry. Review. 2006. 99 p.
- 61 Välisalo, Tero, Räikkönen, Minna & Lehtinen, Erkki. Asset Management vesihuollossa. Kirjal-lisuustutkimus. 2006. 79 s. + liitt. 8 s.
- 62 Holt, Erika. Current trends in USA building research. 2006. 26 p. + app. 7 p.
- 64 Forsström, Juha. Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi. Esitutkimus. 2006. 51 p.
- 65 Talja, Asko, Törnqvist, Jouko, Kivikoski, Harri, Carpen, Leena & Nippala, Eero. Ruostumaton teräs maa- ja vesirakentamisessa. 2006. 31 s. + liitt. 5 s.