

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Kemiantekniikan osasto

Prosessitekniikan laboratorio

TURVALLISUUSANALYYSI

KORKEAJÄNNITESÄHKÖNPURKAUSLAITTEISTOLLE

Työn ohjaaja    Assistentti, TkT Terhi Virkki-Hatakka

Työn tarkastaja    Assistentti, TkT Terhi Virkki-Hatakka

Lappeenrannassa 21.2.2008

Pauliina Ryyänen

Kaivosuonkatu 6 a 12

53850 Lappeenranta

## TIIVISTELMÄ

Tekijä: Pauliina Ryyänen

Työn nimi: Turvallisuusanalyysi korkeajännitesähkönpurkauslaitteistolle

Osasto: Kemianteekniikka

Kandidaatintyö Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kemianteekniikan osasto, Lappeenranta, 2008, 39 sivua, 11 kuvaa ja 3 taulukkoa.

Tarkastaja Assistentti, TkT Terhi Virkki-Hatakka

Hakusanat: Turvallisuusanalyysi, riskianalyysi, pulsed dielectrick barrier discharge

Työssä tehtiin turvallisuusanalyysi Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimuskäyttöön tarkoitetulle korkeajännitesähkönpurkauslaitteistolle. Sähkönpurkauslaite on uutta teknologiaa jätevedenkäsittelyyn.

Työssä tutkittiin useita eri analyysimenetelmiä turvallisuusanalyysin tekemiseen, jotta löydetäisiin sopiva menetelmä korkeajännitesähkönpurkauslaitteistolle. Tutustuttiin lähemmin kolmeen analyysimenetelmään, jotka olivat Dow's Fire And Explosion Index, HAZOP-poikkeamatarkastelu ja vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN. Lopullinen turvallisuusanalyysi tehtiin HAZSCAN-turvallisuusanalyysimenetelmän avulla. HAZSCAN valittiin koska se oli vaihtoehdoista joustavin ja sen avulla oli mahdollista tutkia kaikkia turvallisuuden osa-alueita. Suurimmaksi turvallisuusriskiksi havaittiin korkeajännitesähkönpurkauslaitteiston kennoston kuumeneminen. Riskien vähyys johtuu lähinnä siitä, että tutkimuskäytössä oleva laite on pienessä mittakaavassa.

Tehty turvallisuusanalyysi ei itsessään parantanut laboratoriomittakaavassa olevan laitteen turvallisuutta, sillä toistaiseksi muutosten täytäntöönpanosta ei ole tehty päätöstä.

Turvallisuusanalyysi ei sovellu suoraan käytettäväksi teollisuudessa, sillä se on tehty tutkimuskäytössä olevalle korkeajännitesähkönpurkauslaitteistolle. Se toimii kuitenkin hyvänä pohjana jatkossa tehtäville turvallisuusanalyysille.

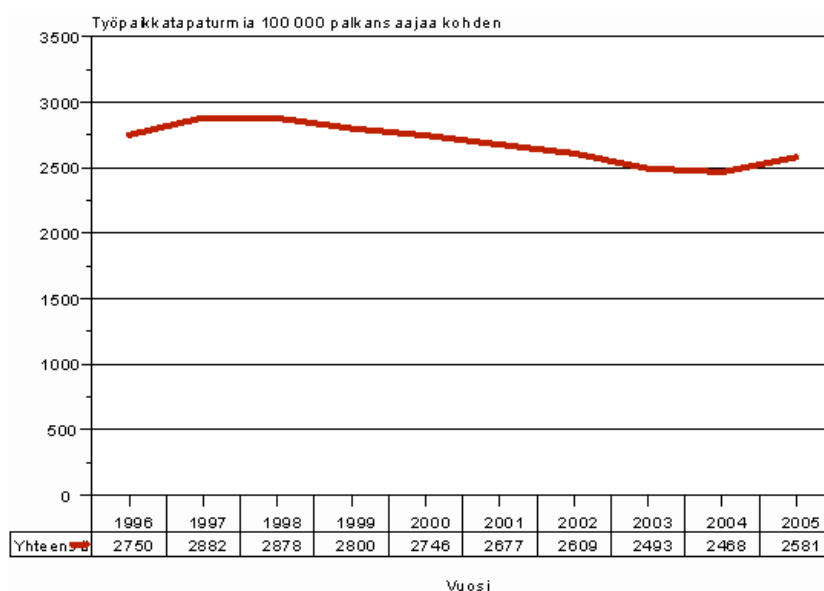
# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	2
2	Yleistä turvallisuusanalyysistä.....	4
3	Sähköpurkauslaitteiston toimintaperiaate .....	6
4	Turvallisuusanalyysimenetelmät .....	7
4.1	Eri analyysimenetelmien vertailu .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.2	Dow's fire and explosion index .....	10
4.2.1	Palo- ja räjähdysindeksi .....	10
4.2.2	Palo- ja räjähdysindeksin tekeminen .....	11
4.2.3	Materiaalikerroin (Material Factor, MF) .....	13
4.2.4	Yleinen prosessin vaarakerroin (General Process Hazards Factor), $F_1$ .....	14
4.2.5	Erityinen prosessin vaarakerroin (Special process hazards factor), $F_2$ .....	15
4.2.6	Prosessiyksikön vaarakerroin (Process Unit Hazard Factor), $F_3$ .....	16
4.2.7	Palo- ja räjähdysindeksin laskeminen (Determination of fire and explosion index), $F&EI$ .....	16
4.2.8	Hyvityskerroin (Loss control credit factor), $C$ .....	17
4.2.9	Riskianalyysin yhteenveto .....	17
4.2.10	Johtopäätöksiä .....	18
4.3	HAZOP-poikkeamatarkastelu .....	18
4.3.1	HAZOP-poikkeamatarkastelun toteuttaminen .....	19
4.3.2	HAZOP-poikkeamatarkastelun periaatteet.....	20
4.3.3	HAZOP-poikkeamatarkastelun ajoitus .....	22
4.4	Vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN.....	23
4.4.1	Analyysin käyttö .....	23
4.4.2	Aktiviteetti- ja prosessimalli.....	24
4.4.3	Analyysin kulku .....	24
5	Korkeajännitesähköpurkauslaitteistolle tehty HAZSCAN-turvallisuusanalyysi 25	
6	Johtopäätökset.....	28
	Lähteet.....	31

# 1 Johdanto

Työntekijöiden turvallisuuteen alettiin kiinnittää huomiota Yhdysvalloissa jo 1600-luvun puolivälin jälkeen, kun yli 500 ihmistä kuoli ja lähes 2000 ihmistä vammautui vuosittain antrasiittikaivoksissa. 1600-luvun puolivälistä kesti kuitenkin yli kaksisataa vuotta ennen kuin ensimmäinen turvallisuuslaki tuli voimaan Yhdysvalloissa vuonna 1860 (Petersen<sup>1</sup>). Samoihin aikoihin myös Suomessa alettiin kiinnittää huomiota työntekijöiden turvallisuuteen. Jo silloin Suomessa pidettiin työn suojelua tärkeänä, sillä jos esimerkiksi sahalla hyvä sahuri menetti kätensä, tiesi se tappiota sahalle. Kuitenkin vasta 1930–1940-luvuilla alkoi varsinainen työsuojelu. Tällöin saatiin ensimmäiset varsinaiset työsuojelulait (Kuronen<sup>2</sup>). 1970-luku oli muutosten aikaa työturvallisuuden kannalta katsottuna. Silloin Euroopan Yhteisön maat alkoivat valmistella Seveso-direktiiviä, Englantilainen Imperial Chemical Industries (ICI) julkaisi HAZOP-poikkeamatarkastelun ja Suomessa työsuojeluorganisaatiot tulivat pakollisiksi yrityksiin (Kalliokoski<sup>3</sup>, Hyppönen ja Saloranta<sup>4</sup>, s. 5, Malmén *et al.*<sup>5</sup>). Seveso-direktiivi tuli Euroopassa voimaan 1980-luvulla (Malmén *et al.*<sup>5</sup>). Samaan aikaan suomalaiset yritykset alkoivat kansainvälistyä. Kansainvälistymisen seurauksena alettiin suomalaisissakin yhtiöissä perehtyä enemmän yritysturvallisuuteen ja turvallisuusjohtamiseen. 1980-luvulla otettiin teollisuudessa käyttöön kahden vuoden välein tehtävät riskikartoitukset ja poikkeamatarkastelut varsinkin suurten hankkeiden yhteydessä (Kerko<sup>6</sup>). Vuonna 1993 säädettiin Suomessa ensimmäinen laki turvallisuusjohtamisesta yrityksissä. Vuonna 1996 astui voimaan uudistettu Seveso-direktiivi, joka sai nimekseen Seveso-II-direktiivi<sup>7</sup>. Kerkon<sup>6</sup> mukaan työsuojelu on ollut kansainvälisestikin katsottuna Suomessa korkealla tasolla 1960-luvulta lähtien. Ongelmana kuitenkin on, etteivät yritysjohtajat ajattele työsuojelua ja yritysturvallisuutta investointina, joka hyvin hoidettuna tuottaa yritykselle voittoa ja on hyvä kilpailukeino.

Tilastokeskuksen<sup>8</sup> tekemien tutkimusten mukaan työntekijöiden turvallisuus Suomessa vuosina 1996–2005 on parantunut noin viidenneksen. Tilastokeskus tutki sattuneita tapaturmia kahdella eri jaksolla. Ensimmäinen jakso oli vuosina 1996–2000 ja toinen jakso 2001–2005. Ensimmäisellä jaksolla palkansaajille sattui noin 2,6 työkuolemaa 100 000 palkansaajaa kohden, kun taas toisella jaksolla 100 000 palkansaajaa kohden sattui 2,1 työkuolemaa. Kuten kuvasta 1 voidaan päätellä, on työpaikkatapaturmien lukumäärä laskenut vuodesta 1990 vuoteen 2004 asti. Vuonna 2005 työpaikkatapaturmien määrä on kuitenkin hieman kasvanut. Tämä johtunee vuoden 2005 alussa käyttöön otetusta sairaanhoidon täyskustannusvastuujärjestelmästä. Sairaanhoidon täyskustannusvastuujärjestelmän käyttöönoton jälkeen hoitolaitosten täytyy tehdä aina ilmoitus vakuutusyhtiöön työtapaturmapotilaan hoidosta. Lakimuutos on lisännyt etenkin lievien eli alle 4 päivän työkyvyttömyyteen johtaneiden työtapaturmien määrää. Osa lievistä tapaturmista jäi aiemmin ilmoittamatta vakuutusyhtiöön (Tilastokeskus<sup>8</sup>).

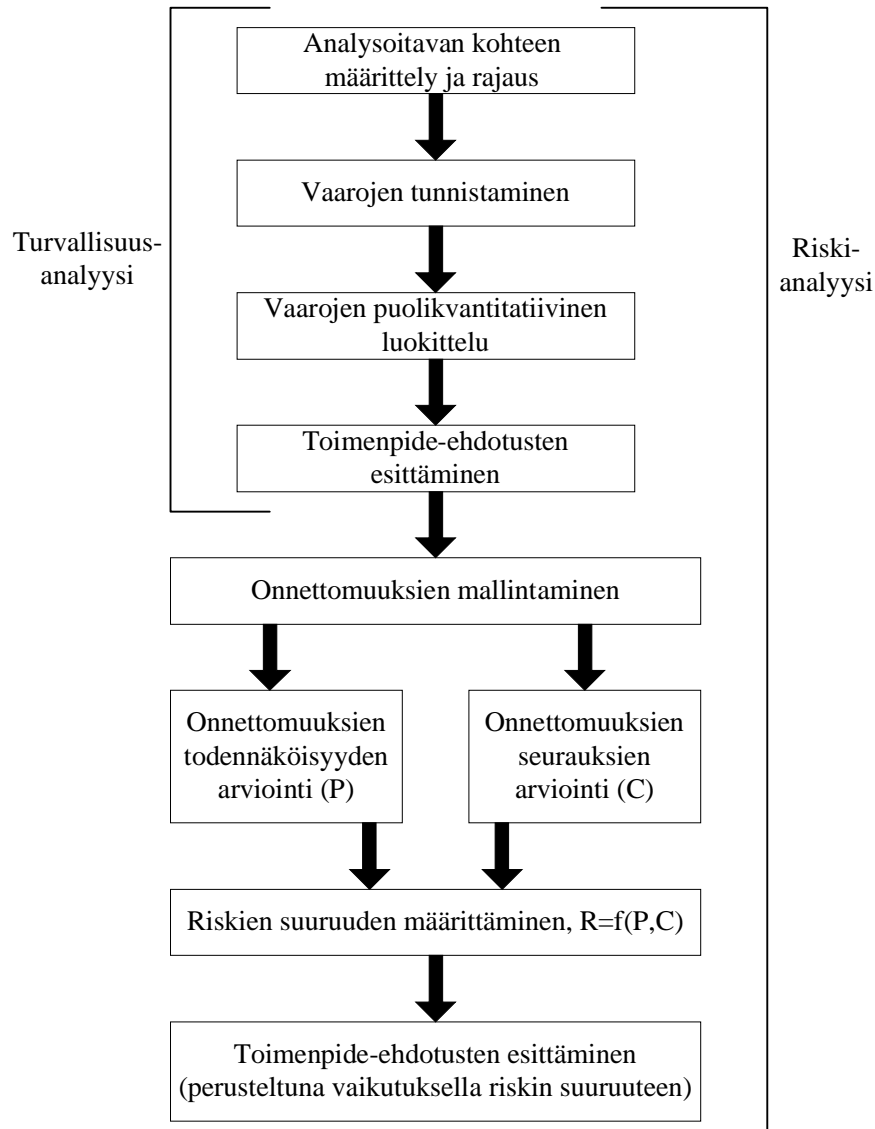


Kuva 1. Työtapaturmien määrät vuosittain vuosien 1996 - 2005 välisenä aikana

Korkeajännitesähköpurkauslaitteistoon tehtiin turvallisuusanalyysi, sillä se on aivan uutta teknologiaa, eikä itse laitteistosta tai sen toiminnasta ole julkaistu vielä yhtäkään turvallisuusanalyysiä. Korkeajännitesähköpurkauslaitteiston toiminnasta ei myöskään ole vielä pitkäaikaista käytännön kokemusta eikä sen piileviä vaaroja tiedetä. Turvallisuusanalyysin tekeminen uudelle laitteelle oli tärkeää senkin vuoksi, että samoissa tiloissa laitteiston kanssa työskentelee myös sekä opiskelijoita että tutkijoita. Turvallisuusanalyysin tekeminen tutkimuskäytössä olevalle laitteelle ei ole standarditoimenpide, joten jo sen vuoksi tämä oli harvinainen kokemus.

## **2 Yleistä turvallisuusanalyyseistä**

Monesti turvallisuusanalyysin ja riskianalyysin merkitykset menevät sekaisin. Varsinkin puhekielessä ne sekoitetaan, mutta niillä on kuitenkin hienoinen ero. Turvallisuusanalyysin avulla pyritään etsimään ja tunnistamaan teknisistä laitteista, ihmisen toiminnasta ja ympäristöolosuhteista turvallisuutta heikentävät tekijät sekä etsimään edullisimmat toimenpiteet. Riskianalyysissä riskien vaikutus liiketoimintaan pyritään kartoittamaan perustellummin. Riskianalyysissä onnettomuudet mallinnetaan ja niille lasketaan todennäköisyydet sekä arvioidaan seuraukset. Näiden tietojen avulla riskianalyysissä voidaan määrittää riskin suuruus. Myös riskianalyysi loppuu toimenpide-ehdotusten esittämiseen, mutta tällöin toimenpide-ehdotukset perustuvat laskettuun riskin suuruuteen. Kuvassa 2 on esitetty riski- ja turvallisuusanalyysien erot (Yritysturvallisuus<sup>9</sup>).



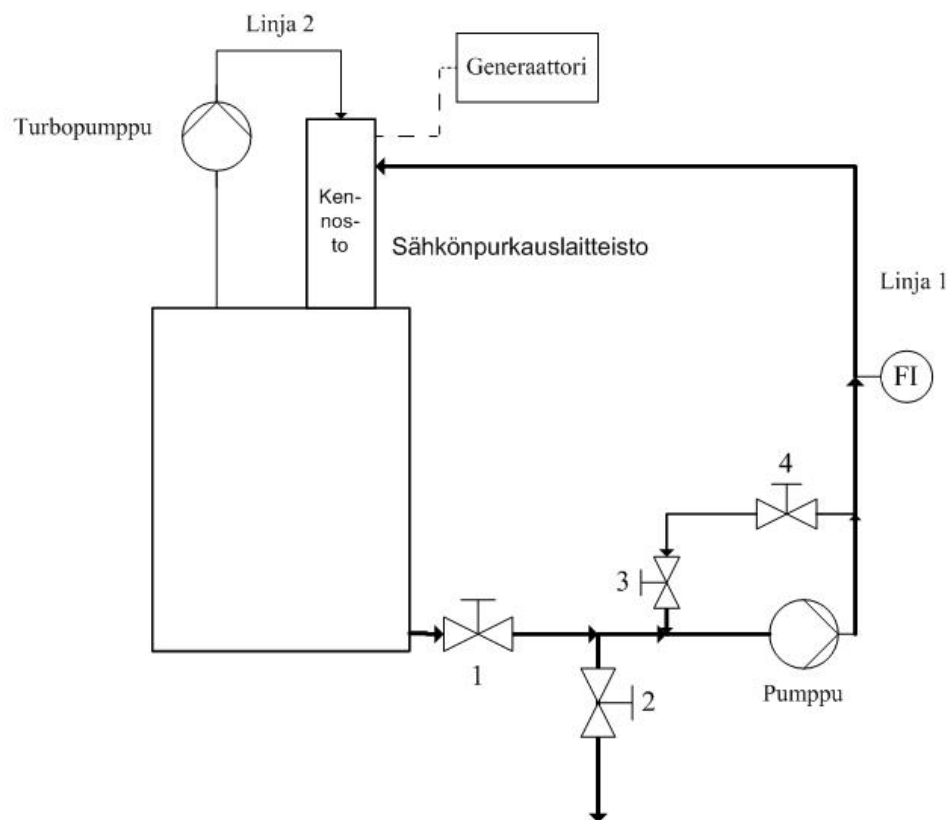
Kuva 2. Turvallisuus- ja riskianalyysin ero (Yritysturvallisuus<sup>9</sup>)

Usein mietitään, minkälaisen yrityksen kannattaisi tehdä turvallisuus- tai riskianalyysi. Osaltaan jo laki määrää sen tehtäväksi. Analyysin tekeminen on suositeltavaa myös jos yrityksen ala on riskialtis, tapaturmataajuus on suuri tai sattuneet tapaturmat ovat vakavia sekä kun hankitaan uutta laitteistoa tai päivitetään käyttöohjeita eri laitteille. Hyvin hoidetusta turvallisuustyöstä on myös monenlaista hyötyä yritykselle. Yrityksen tulisikin miettiä yritysturvallisuutta panostuksena tulevaisuuteen enemmän kuin vain pakollisena menona. Hyvin hoidettu turvallisuus vähentää työpaikoilla olevaa reiviirajattelua, kun työntekijät eri osastoilta joutuvat

olemaan toistensa kanssa tekemisissä turvallisuusasioiden myötä. Turvallisuusajattelun ansiosta myös tuotantotalous paranee, sillä työmenetelmät, käyttövarmuus ja häiriötilanteiden hoito kehittyvät (Kuronen<sup>10</sup>).

### 3 Sähköpurkauslaitteiston toimintaperiaate

Sähköpurkauslaitteen yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuvassa 3.



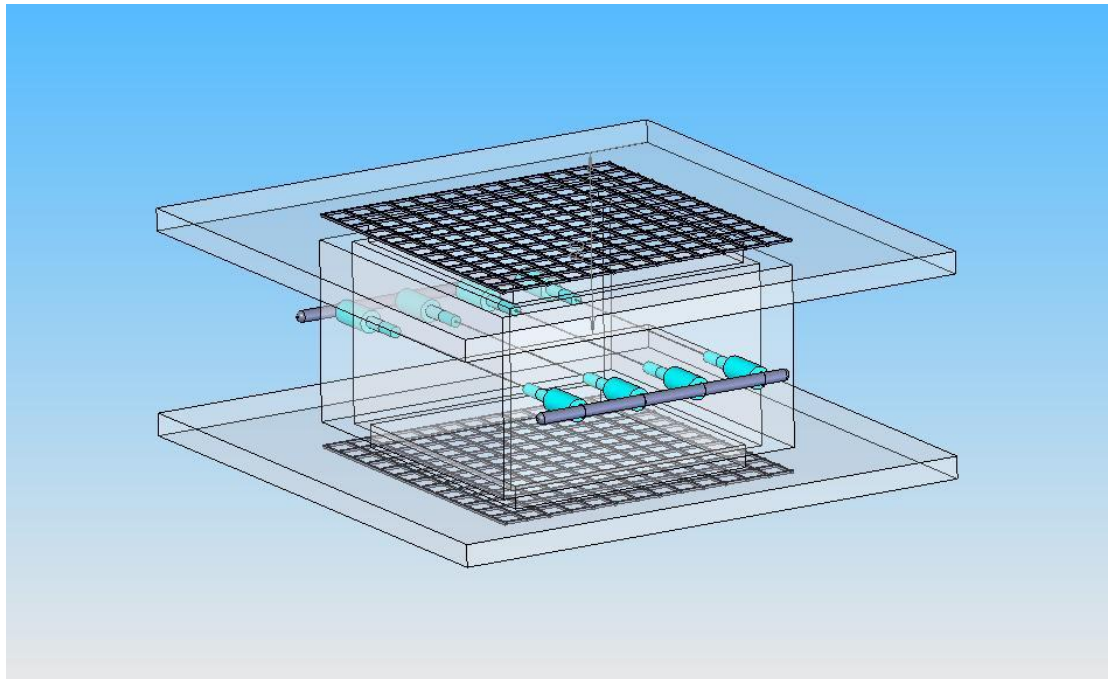
Kuva 3. Korkeajännitesähköpurkauslaitteiston yksinkertaistettu virtauskaavio

Korkeajännitesähköpurkauslaitteiston mittauksissa käytetään raaka-aineena fenolivesi -seosta, jonka konsentraatio on  $100 \frac{mg}{l}$  (Preis<sup>11</sup>). Fenolipitoinen raaka-aine kulkee linjaa 1 pitkin pumpulle, josta se pumpataan edelleen linjaa 1 pitkin ja ruiskutetaan korkeajännitesähköpurkauslaitteistoon kennojen yläpuolelle. Samaan aikaan linjaa 2 pitkin kierrätetään ilman ja otsonin seosta. Otsoni syntyy sivutuotteena



puhdistuksen yhteydessä ja parantaa hieman puhdistustehokkuutta. Ilma-otsonikierron päätarkoitus on synnyttää turbulenti virtaus korkeajännitesähköpurkauslaitteiston kennostoalueella. Mikäli turbulenti virtausta ei ole, pisarat muodostavat kalvon kennoston päälle ja vesi valuu reunoja pitkin alas puhdistumattomana (Hatakka<sup>12</sup>).

Kennosto koostuu neljästä päällekkäisestä tasosta. Yksi näistä tasoista on esitetty kuvassa 4. Kullakin tasolla on viisi kupari- tai teräslankaa, lankojen ylä- ja alapuolella on teräsverkkoa (Hatakka<sup>12</sup>). Chenin *et al.*<sup>13</sup> mukaan pisarat törmäävät teräsverkkoon ja kuparilankoihin ja rikkoutuvat pienemmiksi tai muuttavat muotoaan. Generaattori tuottaa lyhytkestoisen impulssin, jonka seurauksena syntyy salama. Salama kulkee pisanan pintaa pitkin ja aiheuttaa pisanan pinnalle radikaaleja, jotka puhdistavat vettä.

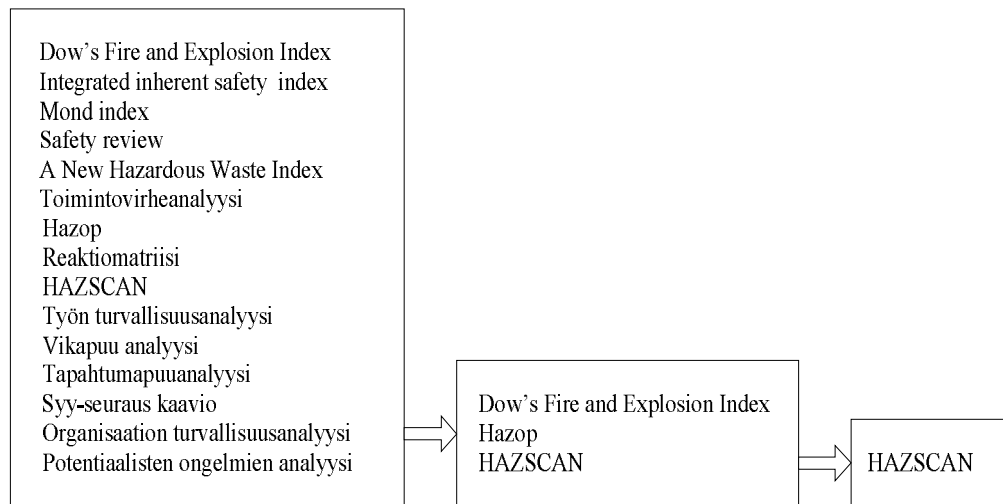


Kuva 4. Kennoston yksi taso<sup>14</sup>

## 4 Turvallisuusanalyysimenetelmät

Työn alkuvaiheessa tutustuttiin mahdollisimman moneen turvallisuus- ja riskianalyysimenetelmään. Tämän jälkeen turvallisuusanalyysien tutkiminen jaettiin

kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kaikista tutkituista menetelmistä kolme valittiin tutkittavaksi tarkemmin. Toisessa vaiheessa näistä kolmesta analyysimenetelmästä valittiin yksi, jolla turvallisuusanalyysi tehdään. Työn vaiheittainen eteneminen on havainnollistettu kuvassa 5. Lähempään tarkasteluun valittiin Dow's Fire and Explosion Index, HAZOP-poikkeamatarkastelu sekä Vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN.



Kuva 5. Analyysimenetelmävaihtoehtojen valinnan kolme vaihetta

Dow's Fire and Explosion Index, suomeksi Dow:n palo- ja räjähdysindeksi valittiin, koska se on erittäin käytetty analyysimenetelmä kemianteeniikassa. Dow:n palo- ja räjähdysindeksi on myös erittäin tunnettu ja arvostettu maailmalla. Siitä on paljon tietoa saatavilla, eli jos turvallisuusanalyysi olisi tehty palo- ja räjähdysindeksin avulla, kaikki tarvittava tieto olisi ollut saatavilla. Dow:n palo- ja räjähdysindeksi on myös sopiva pilot-plant mittakaavassa oleville laitteille<sup>15</sup> ja se on toteuttamisperiaatteiltaan hyvin erilainen verrattuna kahteen muuhun valittuun analyysimenetelmään.

HAZOP valittiin tutkittavaksi osittain samoista syistä kuin Dow:n palo- ja räjähdysindeksi. Myös se on maailmalla erittäin tunnettu ja arvostettu analyysimenetelmä. Sen avulla voidaan tehdä turvallisuusanalyysi myös pilot-plant -mittakaavassa oleville laitteille ja siitä on paljon tietoa saatavilla. Jos

turvallisuusanalyysi olisi tehty HAZOPin avulla, sen rinnalle olisi otettu ihmisen toiminnan tutkimista varten toimintovirheanalyysi.

Vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN valittiin, koska se oli pääperiaatteiltaan täysin erilainen palo- ja räjähdysindeksin kanssa ja hieman erilainen HAZOPin kanssa. Vertailuun haluttiin myös ottaa yksi suomalainen menetelmä.

Analyysimenetelmien tutkinnan toisessa vaiheessa Dow:n palo- ja räjähdysindeksi päätettiin jättää pois, sillä se on suunniteltu ennemminkin koko tehdasalueen turvallisuusanalyysimenetelmäksi kuin osajärjestelmien tutkimiseen. Jotta turvallisuusanalyysi olisi ollut kannattava tehdä Dow:n palo- ja räjähdysindeksimenetelmällä, tulisi palo- tai räjähdysherkkää ainetta olla vähintään 454 kg (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s 2). Sähköpurkauslaitteistossa tällä hetkellä käytettävät ainemäärät eivät ole edellä mainitun kokoisia, eivätkä käytettävät aineet ja reaktiot ole palo- tai räjähdysherkkiä. Dow:n palo- ja räjähdysindeksin tekemiseen tarvitaan myös erittäin yksityiskohtaista tietoa ja paljon koedataa. Tällaista tietoa ei ollut saatavilla, eikä työn tarkoitus alunperinkään ollut alkaa tehdä kokeita sähköpurkauslaitteella. Tämän takia tätä analyysimenetelmää ei voitu käyttää sähköpurkauslaitteiston turvallisuusanalyysimenetelmänä. Dow:n palo- ja räjähdysindeksin hyvänä puolena on, että se on mahdollista toteuttaa yksin (AIChE<sup>16</sup>, s 2-11). Tällöin analyysin tekijällä on kuitenkin oltava vankka sekä kemiallisen että kaupallisen alan tuntemus.

HAZOP-turvallisuusanalyysi jätettiin pois, sillä sen pääperiaatteena on ryhmätyöskentely. Eri alojen asiantuntijat näkevät kokonaisuuden yhdessä paremmin ja pääsevät parempiin tuloksiin työskennellessään yhdessä kuin kukin yksinään. HAZOPin vahvuus on juuri siinä, että analyysiryhmään kootaan eri alojen asiantuntijoita, jotka kukin tuovat oman panoksensa analyysin tekemiseen. Tällöin tieto on erittäin yksityiskohtaista ja saattaa jopa synnyttää kokonaan uusia ideoita esimerkiksi prosessin parantamiseen (AIChE<sup>16</sup>, s 2-14). HAZOPin tekemiseen vaadittiin myös erittäin paljon yksityiskohtaista tietoa, mitä ei ollut saatavilla.

HAZSCAN analyysimenetelmä valittiin, koska se on erittäin joustava. Analyysi suositellaan tehtäväksi ryhmätyönä, mutta sen tekeminen onnistuu yksinkin. Ennen analyysin aloittamista ja sen aikana tarvittiin oikeastaan vain hieman kokeellisia testejä ja asiantuntija-arvioita, jotka olivat kaikki saatavissa. HAZSCAN on pääasiassa suunniteltu kokonaisten tehtaiden tutkimiseen, mutta myös osajärjestelmien tutkiminen oli sen avulla mahdollista. HAZSCAN on myös kokonaisvaltainen analyysimenetelmä eli toista menetelmää ei tarvittu sen rinnalle. Tulevaisuutta ajatellen HAZSCAN on hyvä valinta siinäkin mielessä, että se toimii hyvänä perustana muille analyysimenetelmille. (VTT<sup>17</sup>)

## **4.1 Dow's fire and explosion index**

Dow:n palo- ja räjähdysindeksin on kehittänyt kemikaaliyhtiö nimeltään The Dow Chemical Company. Ensimmäinen painos tehtiin jo vuonna 1964, ja toistaiseksi viimeinen eli seitsemäs painos julkaistiin vuonna 1994. Palo- ja räjähdysindeksin avulla voidaan määrittää todelliset palo- ja räjähdysriskit sekä niiden seuraukset tehdasalueella. Dow:n palo- ja räjähdysindeksin päätarkoitus on tarjota valikoima tulipalon ja räjähdysriskien torjuntamekanismeja. Kemianteollisuudessa Dow:n palo- ja räjähdysindeksi on yksi käytetyimmistä riskianalyysimenetelmistä. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 1)

### **4.1.1 Palo- ja räjähdysindeksi**

Palo- ja räjähdysindeksin laskennassa käytettävät menetelmät perustuvat onnettomuuksista kertoviin tilastoihin sekä materiaalien ja aineiden tutkimukseen. Palo- ja räjähdysindeksillä on kolme päätarkoitusta. Ensimmäinen on arvioida odotettavan vahingon laajuus realistisesti tulipalon tai räjähdysriskin sattuessa. Toinen tarkoitus on määrittää, mitkä asiat suurimmalla todennäköisyydellä aiheuttavat tulipaloon tai räjähdysriskiin johtavan häiriön. Kolmas tavoite on saada yrityksen johdolle tieto tulipalon tai räjähdysriskin riskistä. Palo- ja räjähdysindeksi toimii myös insinöörien apuna uusien tehdasalueiden suunnittelussa. Palo- ja räjähdysindeksi on tehty sopivaksi mille tahansa operaatiolle, jossa syttyvää, palavaa tai reaktiivista materiaalia käsitellään, varastoidaan tai prosessoidaan. (AIChE<sup>16</sup>, kappale 2, s. 8)

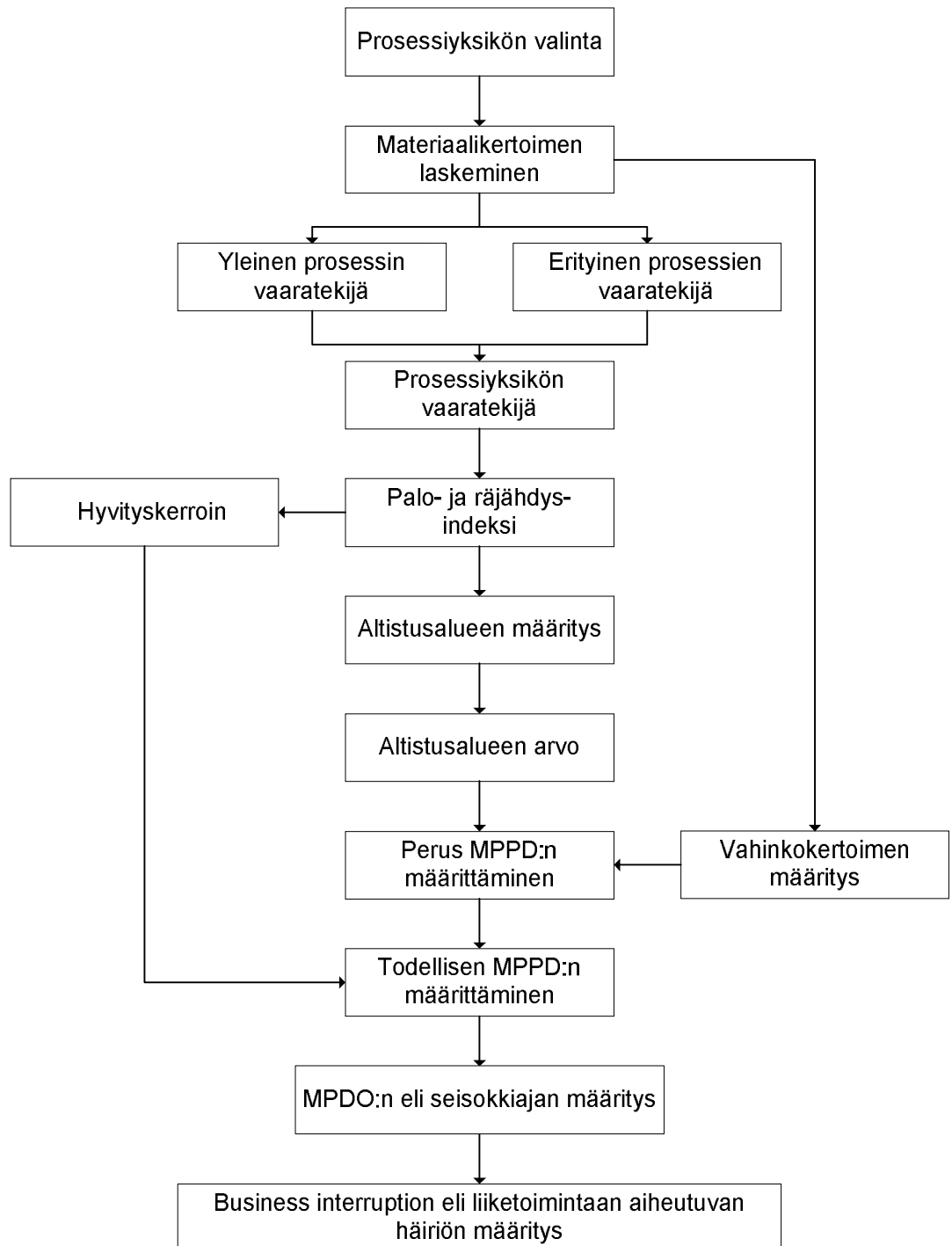
#### 4.1.2 Palo- ja räjähdysindeksin tekeminen

Palo- ja räjähdysindeksi aloitetaan valitsemalla yksikkö. Yleensä kannattaa valita sellainen yksikkö, jonka tuhoutumisesta aiheutuisi eniten haittaa tai joka tuhoutuessaan aiheuttaisi yritykselle eniten haittaa. Ennen palo- ja räjähdysindeksin tekemistä tutkittavasta alueesta on hankittava ainakin seuraavanlaiset tiedot:

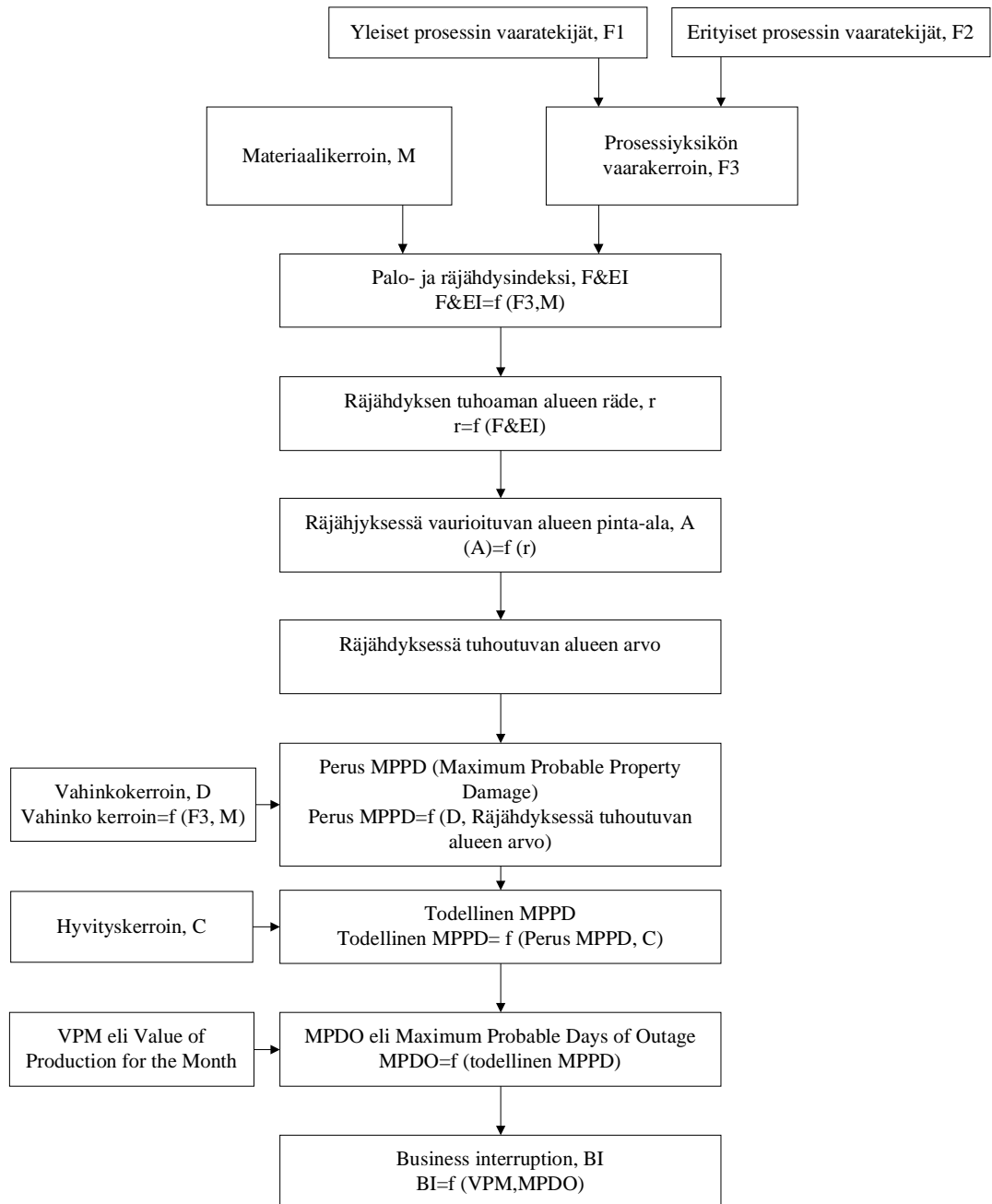
1. Tehdasalueen asemapiirros
2. Prosessin virtauskaavio
3. Dow:n palo- ja räjähdysindeksin ohjeet
4. Kaikki Dow:n palo- ja räjähdysindeksin kaavakkeet
5. Arvioitavan kohteen kaikki materiaalikustannukset

Kohteen valitsemisen jälkeen lasketaan sekä yleinen että erityinen prosessin vaarakerroin. Näiden avulla saadaan laskettua prosessiyksikön vaarakerroin. Prosessiyksikön vaarakertoimen ja materiaalikertoimen avulla määritetään palo- ja räjähdysindeksi.

Palo- ja räjähdysindeksin määrittämisen jälkeen lasketaan mahdollisen palon tai räjähdysen tuhoaman alueen pinta-ala ja kuinka paljon sen korjaaminen tulee maksamaan. Vahinkokerroin voidaan määrittää prosessiyksikön vaarakertoimen ja materiaalikertoimen avulla. Vahinkokertoimen avulla taas saadaan laskettua, kuinka paljon palo- ja räjähdysalueen välineiden arvo on ja kuinka paljon palo- ja räjähdysalueen todellinen arvo on. Näiden avulla saadaan laskettua mahdollisen seisokin kesto sekä se, kuinka paljon yritys kärsii vahingosta rahallisesti. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty Dow:n palo- ja räjähdysindeksin tekemisen periaatteet. Kuvat eivät eroa toisistaan paljon, mutta kuvan 7 avulla on helpompi hahmottaa, miten määritettävät asiat liittyvät toisiinsa ja missä vaiheessa analyysin tekemistä kutakin arvoa tarvitaan. (The Dow Chemical Company <sup>15</sup>, s. 2-3)



Kuva 6. DOW:n palo- ja räjähdysindeksin tekemisen pääkohdat (The Dow Chemical Company <sup>15</sup>, s. 4)



Kuva 7. Dow:n palo- ja räjähdysanalyysin tekeminen vaihe vaiheelta

### 4.1.3 Materiaalikerroin (Material Factor, MF)

Materiaalikerrointa käytetään laskettaessa palo- ja räjähdysindeksiä. Materiaalikerroimen avulla määritetään, kuinka paljon energiaa vapautuu palon tai räjähdysyhteydessä. Materiaalikerroimen määrittäminen voi olla vaikeaa

varsinkin eri aineiden seoksille panosreaktioissa. Panosreaktiossa erityisen vaikeaa materiaalikerroimen määrittämisestä tekee se, että aineet saattavat olla reaktion aikana monessa eri faasissa. Seosten materiaalitekijää laskettaessa luotettavimman tuloksen saa, mikäli materiaalikerroin voidaan määrittää koedatasta. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 10–14)

#### **4.1.4 Yleinen prosessin vaarakerroin (General Process Hazards Factor),**

$$F_1$$

Yleisen prosessin vaarakertoimen avulla määritetään mahdollisten menetysten suuruus vahingon tapahtuessa. Yleinen prosessin vaarakerroin määritellään kuuden eri kohdan avulla. Nämä kuusi kohtaa ovat sellaisia, jotka sopivat moniin prosesseihin ja ne ovat eniten aiheuttaneet tulipaloja ja räjähdyksiä tehdasalueilla, sekä yleisesti olleet suurin syy vahingoille. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 16)

Kullekin kohdalle annetaan rangaistuskerroin ja lopullinen vaarakerroin saadaan laskemalla eri rangaistuskerrointen arvot yhteen. Pääperiaattena on, että mitä suurempi on vaarakertoimen arvo, sitä suurempi tulee menetys olemaan. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 17–19).

Yleisen prosessin vaarakertoimen kuusi kohtaa ovat:

- A. Eksotermiset kemialliset reaktiot (Exothermic Chemical Reactions)
- B. Endotermiset prosessit (Endothermic processes)
- C. Materiaalien hallinta ja kuljetus (Material handling and transfer)
- D. Suljetut tai sisällä toimivat prosessiyksiköt (Enclosed or indoor process units)
- E. Pääsy (Access)
- F. Kuivaus ja ylivuotokontrolli (Drainage and spill control)



**4.1.5 Erityinen prosessin vaarakerroin (Special process hazards factor),**  
 $F_2$

Erityisen prosessin vaarakertoimen avulla pyritään ennustamaan tulipalon tai räjähdysen todennäköisyyttä. Erityinen prosessin vaarakerroin sisältää 12 eri prosessiolosuhdetta, joiden on todettu aiheuttavan eniten tulipaloja ja räjähdyksiä. Nämä ovat:

- A. Myrkylliset materiaalit (Toxic materials)
- B. Alipaine (Sub-atmospheric pressure)
- C. Operointi tulivyöhykkeellä tai sen läheisyydessä (Operation in or near flammable range)
- D. Pölyräjähdys (Dust explosion)
- E. Ylipaine (Relief pressure)
- F. Alhainen lämpötila (Low temperature)
- G. Syttyvän tai epästabiilin materiaalin määrä (Quantity of flammable/unstable material)
- H. Korroosio ja eroosio (Corrosion and erosion)
- I. Halkeamasta tai ahtautumisesta johtuva vuoto (Leakage – joints and packing)
- J. Paloturvallisuuslaitteiden käyttö (Use of fired equipment)
- K. Lämmönsiirtimet, joissa käytetään kuumaa öljyä (Hot oil heat exchange system)
- L. Pyörivät osat (Rotating equipment)

Kun kunkin kohdan rangaistuskerroin on määritelty, lopullinen erityinen prosessin vaaratekijä,  $F_2$ , saadaan laskemalla jokaisen kohdan rangaistuskertoimien arvot yhteen ja lisäämällä siihen vielä yleinen tekijä. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 20–36)

#### 4.1.6 **Prosessiyksikön vaarakerroin (Process Unit Hazard Factor), $F_3$**

Prosessiyksikön vaarakerroin saadaan kertomalla yleinen ja erityinen prosessin vaarakerroin. Prosessiyksikön vaarakerrointa määritettäessä tulee ottaa huomioon, että arvioinnissa käytettävät materiaali ja rangaistuskertoimien arvot määritetään prosessin vaarallisimmassa vaiheessa, esimerkiksi prosessin käynnistyksessä ja alasajossa. Kunkin prosessiyksikön vaarakerroin on määritettävä erikseen. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 37)

#### 4.1.7 **Palo- ja räjähdysindeksin laskeminen (Determination of fire and explosion index), $F&EI$**

Palo- ja räjähdysindeksin tarkoituksena on arvioida tuhon aiheuttamat vahingot prosessialueella. Palo- ja räjähdysindeksi lasketaan kertomalla prosessiyksikön vaarakertoimen arvo materiaalikertoimella. Alla oleva taulukko selkeyttää, mitä palo- ja räjähdysindeksin arvo tarkoittaa. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 38)

Taulukko I Palo- ja räjähdysindeksin arvon ja tuhon laajuuden suhde taulukoituna (Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 38)

Palo- ja räjähdysindeksin arvo	Tuhon laajuus
1-60	Kevyt tuho
61-96	Kohtalainen tuho
97-127	Melko suuri tuho
128-158	Suuri tuho
159 ja ylöspäin	Ankara tuho

Kevyt tuho tarkoittaa esimerkiksi varastorakennuksen tuhoutumista. Tuhon vaikutus liiketoimintaan on maksimissaankin vain vähäinen eikä yhtiön liiketoiminnan jatkuvuudelle ei aiheudu vaaraa. Kohtalainen tuho tarkoittaa esimerkiksi katkoksia tuotannossa. Yhtiö pystyy kuitenkin edelleen jatkamaan liiketoimintaansa. Melko suuri tuho tarkoittaa esimerkiksi tärkeän prosessiyksikön tuhoutumista, joka johtaa tuotannon keskeytymiseen. Tuotannon keskeytymisestä aiheutuu suuria tappioita. Suuri tuho tarkoittaa, että monia tuotantoyksiköitä tuhoutuu ja tuotanto keskeytyy

pitkäksi aikaa. Tuhosta aiheutuu paljon tappioita, ja yhtiön liiketoiminnan jatkuvuus on vaakalaudalla. Ankara tuho tarkoittaa, että suurin osa tuotantoon vaikuttavista yksiköistä tuhoutuu ja tuotanto keskeytyy pitkäksi aikaa. Yhtiölle aiheutuu erittäin suuret tappiot, eikä se voi jatkaa toimintaansa.

#### **4.1.8 Hyvityskerroin (Loss control credit factor), C**

On todettu, että eräät suunnittelussa huomioonotettavat seikat vähentävät, pienentävät tai siirtävät riskiä ja sen vaikutuksia. Hyvityskertoimen avulla pyritään ottamaan huomioon nämä tekijät. Hyvityskertoimen laskeminen on jaettu kolmeen kategoriaan: prosessikontrolli, materiaalien erottelu ja tulisuojaus. Hyvityskerroin on sitä suurempi, mitä paremmin yritys on tehnyt ennaltaehkäisevää toimintaa. Esimerkiksi jos yrityksellä on prosessissa reaktio, joka tarvitsee koko ajan sekoitusta, on pidettävä huolta, että sekoitus toimii myös vaaran aikana eikä aiheuta uutta vaaraa räjähtämällä sekoituksen puuttuessa. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 39–46)

#### **4.1.9 Riskianalyysin yhteenveto**

Lopuksi tehdään kustakin prosessiyksiköstä yhteenveto. Yhteenvedon avulla voidaan määrittää, mitä tapahtuu prosessiyksikön vieressä oleville rakennuksille, kuinka paljon prosessiyksikön tuhoutuminen aiheuttaa tappioita ja kuinka paljon se tuhoaa ympärillään olevaa materiaalia sekä mitkä ovat niiden kustannukset.

Kun kustakin prosessiyksiköstä on tehty yhteenveto, voidaan koota yhteen koko tuotannon riskianalyysi, josta selviää kunkin prosessiyksikön perus ja todellinen MPPD sekä liiketoiminnan häiriö. Perus MPPD eli Base maximum probable property damage (Base MPPD) arvon avulla määritetään räjähdysalueella olevien työkalujen ja prosessiyksiköiden materiaalien arvo. Todellinen MPPD eli Actual maximum probable property damage kuvaa kaikkia menetyksiä mitä vahingosta aiheutuu. (The Dow Chemical Company<sup>15</sup>, s. 47-56)

#### **4.1.10 Johtopäätöksiä**

Yleensä mietitään, kuinka paljon todellinen MPPD saa korkeintaan olla tai kuinka pitkä katkos tuotannossa yrityksen on mahdollista kestää. Kysymyksiin ei ole yhtä oikeaa vastausta. MPPD:n arvoa on helpompi pienentää, jos palo- ja räjähdysindeksi määritetään jo suunnittelun varhaisessa vaiheessa. Silloin MPPD:n arvon pienentäminen suunnitteluteknisillä asioilla on melko helppoa. Parhaimmiksi tavoiksi pienentää MPPD:n arvoa on todettu pohjapiirroksen muuttaminen siten että varastojen, tehtaiden yms. väliset matkat ovat pidempiä tai rahallisen arvon pienentäminen räjähdysalueella. (The Dow Chemical Company <sup>15</sup>, s. 57–58)

#### **4.2 HAZOP-poikkeamatarkastelu**

HAZOP tulee sanoista Hazard and Operability Study. HAZOP kehitettiin Englannissa 1960-luvulla ja julkaistiin yleiseen käyttöön 1970-luvulla. Alun perin HAZOP:in kehitti Englantilainen yritys nimeltään Imperial Chemical industries (ICI).

HAZOPin avulla pyritään tutkimaan prosessissa tapahtuvien poikkeamien syitä ja seurauksia. Menetelmää voidaan käyttää hyvin monenlaisille prosesseille ja monessa prosessin vaiheessa aina suunnitteluvaiheesta normaalikäyttöön ja lopetukseen. HAZOPia voidaan hyödyntää muun muassa henkilö-, omaisuus-, ympäristö- ja keskeytysriskien analysointiin. (AIChE <sup>16</sup>, s. 2-15)

HAZOP-analyysissä prosessissa tapahtuvien poikkeamien tarkasteluun käytetään avainsanoja. Tällaisia avainsanoja ovat esimerkiksi no, more ja less. Näillä avainsanoilla tarkastellaan koko prosessi ja koko laitos läpi prosessin osa kerrallaan. Poikkeamien tunnistamisen jälkeen tehdään toimenpide-ehdotuksia poikkeamien estämiseksi. (Hyppönen ja Saloranta <sup>4</sup>, s. 6)

HAZOPin avulla pystytään määrittämään parhaiten itse prosessista johtuvat vaaratekijät, mutta ihmisen toiminnasta johtuvia vaaratekijöitä tällä analyysimenetelmällä ei tarkastella. Tällöin suositellaan käyttämään muuta analyysimenetelmää HAZOPin rinnalla. (Hyppönen ja Saloranta <sup>4</sup>, s. 6)

HAZOPin pääajatuksena on, että tehtaan eri osastoilla työskentelevät henkilöt kokoontuvat ja yhdessä löytävät ja ratkaisevat ongelmia paremmin kuin kukin yksinään. HAZOP-tarkastelu suositellaankin tehtävän ryhmässä, jossa on 3–5 jäsentä, yksi ryhmän vetäjä ja yksi sihteeri. (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-33)

HAZOP-tarkasteluja on monenlaisia, niistä käytetyin on avainsanojen avulla tehtävä poikkeamatarkastelu. Muita poikkeamatarkasteluja ovat tietoon perustuva tarkastelu ja tarkistuslistan avulla toteutettava poikkeamatarkastelu. Tietoon perustuva on samantyyppinen kuin avainsanojen avulla toteutettava tarkastelu, mutta siinä avainsanojen sijasta käytetään hyväksi tehtaan erityisasiantuntijoiden kokoamia avainsanoja ja tarkistuslistoja. (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-48 ja 4-49) Tarkistuslistan avulla toteutettava poikkeamatarkastelu kehitettiin lähinnä sitä varten, että se voidaan toteuttaa jo hyvin aikaisessa vaiheessa tehdasta perustettaessa. Tällöin aineluettelo saattaa olla ainoa saatavilla oleva tieto. (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-51)

#### **4.2.1 HAZOP-poikkeamatarkastelun toteuttaminen**

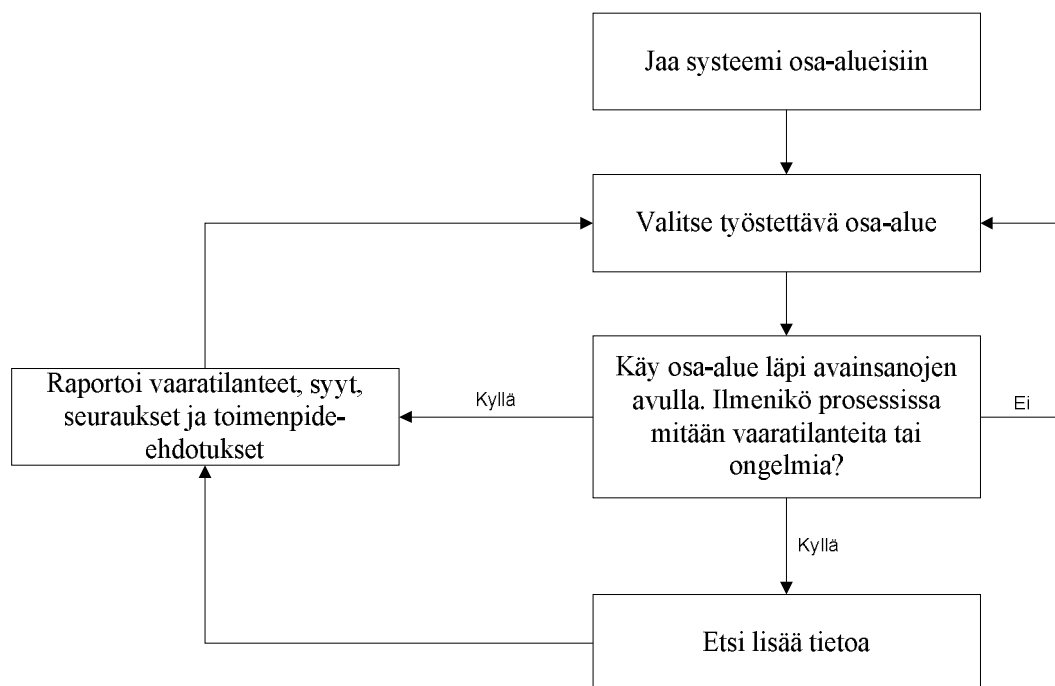
HAZOP-poikkeamatarkastelun ensimmäinen vaihe on määrittellä tavoite. Hyppösen ja Salorannan<sup>4</sup> mukaan tarkastelua voidaan käyttää esimerkiksi suunnitelmien tarkastamiseen, uuden laitoksen rakentamisen viranomaislupia varten, hankintapäätöksiin, käyttöohjeiden tarkentamiseen ja käytössä olevan laitoksen turvallisuuden parantamiseen. Tavoitteen määrittämisen jälkeen rajataan kohde, valitaan ryhmän jäsenet ja päätetään, kuinka paljon analyysiin varataan aikaa ja rahaa.

Ennen varsinaisen analyysin aloittamista on kerättävä taustatietoa analyysin toteutusta varten. HAZOP-analyysiin tulee etsiä virtaus- tai PI-kaavio, layout-piirustus, putkistokuvia ja laitteiden valmistuskuvia. Kun tarkastelu aloitetaan, noudatetaan tarkasti aikaisemmin tehtyä tutkimussuunnitelmaa. Tarkastelua tehtäessä ryhmänvetäjällä on päävastuu, sillä hän ohjaa keskustelua. Ensiksi valitaan tutkittava prosessin osa ja sen jälkeen valitaan prosessiin liittyvä muu osa, esimerkiksi putki, tarkasteluun. Ryhmänvetäjä valitsee avainsanan, ja jäsenet pyrkivät löytämään seuraukset ja syyt. Ennen seuraavan avainsanan päättämistä on ainakin isoissa

prosesseissa hyödyllistä tehdä yhteenveto päätöksistä. Poikkeamatarkastelun tulokset on kirjattava muistiin, jotta niitä voidaan hyödyntää. Raporttiin tulisi sisällyttää ainakin analyysin tekemisessä mukana olleiden henkilöiden nimet, tutkittavan kohteen tarkastelun pohjana toimineet materiaalit, kuten esimerkiksi PI-kaavio sekä kaikki oleelliset tarkastelun aikana tehdyt muistiinpanot. (Hyppönen ja Saloranta<sup>4</sup>, s.24)

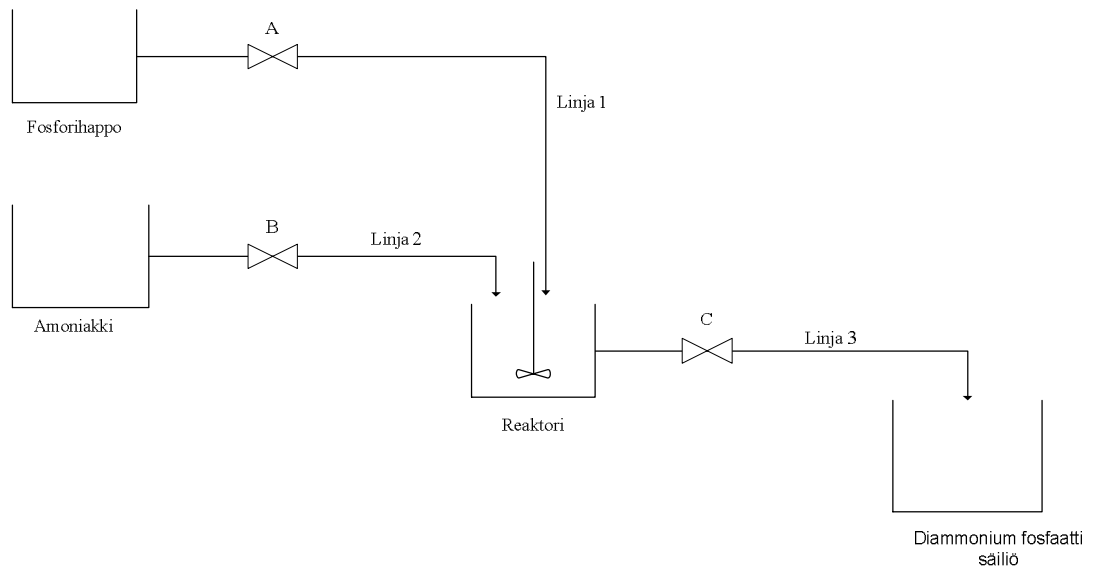
#### 4.2.2 HAZOP-poikkeamatarkastelun periaatteet

Kuvassa 8 on esitetty HAZOP-poikkeamatarkastelun eteneminen



Kuva 8. HAZOP poikkeamatarkastelun toteuttaminen (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-34)

HAZOP-poikkeamatarkastelun periaatteet käydään läpi esimerkkiprosessin avulla. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertainen prosessi, jossa ammoniakkia ja fosforihappoa sekoitetaan. Tuotteeksi saadaan diammoniumfosfaattia. Esimerkkinä tehdään linjan 1 poikkeamatarkastelu. Kuvassa 9 olevassa tapauksessa sama toteutettaisiin myös linjoille 2 ja 3, fosforihapon, ammoniakin ja diammoniumfosfaatin säiliöille sekä reaktorille (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-33, 4-48, 4-49 ja 4-51)



Kuva 9. Esimerkkiprosessin virtauskaavio (AIChE<sup>16</sup>, s. 4-30)

Taulukko II HAZOP-tarkastelu diammoniumfosfaatin valmistusreaktion linjaan 1

Poikkeama sana	Muuttuja	Poikkeama	Seuraukset	Syyt	Toimenpiteet
No	virta	Ei virtausta linjassa 1.	Liikaa ammoniakkia reaktoriin. Tuote vaurioituu.	Linjan 1 venttiili kiinni. Fosforihappo on loppu. Linjan 1 putki on tukossa. Linjan 1 putkessa on halkeama.	Linjoihin 1 ja 2 virtausmittarit. Ohjelmoidaan linjan 2 venttiili B sulkeutumaan kun fosforihapon syöttö pienenee.
Less	virta	Pienempi virtaus linjassa 1.	Liikaa ammoniakkia reaktoriin. Tuote vaurioituu.	Venttiili A vain osittain auki. Pieni tukos tai repeämä putkessa.	Linjoihin 1 ja 2 virtausmittarit. Ohjelmoidaan linjan 2 venttiili B sulkeutumaan kun fosforihapon syöttö pienenee.
More	virta	Normaalia suurempi virtaus linjassa 1	Liikaa fosforihappoa reaktoriin. Tuote vaurioituu.	Venttiili A rikki.	Virtausmittarin asennus linjaan.
Part of	virta	Laimeampaa fosforihappoa linjassa 1.	Liikaa ammoniakkia reaktoriin. Tuote vaurioituu.	Myyjä antanut liian laimeaa fosforihappoa. Virhe fosforihapotankin täytössä.	Fosforihapon pitoisuuden varmistaminen täytön jälkeen.
As well as	virta	Konsentroituneempaa fosforihappoa.	Tuote saattaa vahingoittua.	Myyjä antanut liian vahvaa fosforihappoa. Virhe fosforihappotankin täytössä.	Fosforihapon pitoisuuden varmistaminen täytön jälkeen.
Other than	virta	Linjassa 1 jotakin muuta ainetta kuin fosforihappoa.	Tuote vahingoittuu. Aineesta riippuen saattaa ilmetä vaaratilanne.	Myyjältä väärä toimitus. Toimittajalta on tilattu väärää ainetta.	Materiaalien tarkistus ennen niiden käyttöönottoa.
Reverse	virta	Linjan 1 virtaus päinvastaiseen suuntaan.	Ei ammoniakkia reaktoriin.	Ei järjellistä syytä, miksi virtaus on päin vastainen	

### 4.2.3 HAZOP-poikkeamatarkastelun ajoitus

Kuten jo aiemmin on todettu, poikkeamatarkastelua voidaan käyttää monessakin prosessin elinkaaren vaiheessa.

Jos tarkastelu tehdään suunnittelun alkuvaiheessa, voidaan sen avulla pienentää tai jopa poistaa riskejä tai päättää, mihin laitos sijoitetaan tai miten laitoksen yksiköt sijoitetaan toisiinsa nähden (AIChE<sup>16</sup>, s. 2-14). Kun tarkastelu toteutetaan



suunnittelun jo valmistuttua, on tarkastelussa mahdollista syventyä myös prosessilaitteisiin. Tällöin muutokset ovat vielä suhteellisen helposti toteutettavissa (Hyppönen ja Saloranta<sup>4</sup>, s. 20).

Poikkeamatarkastelu voidaan tehdä myös juuri ennen käyttöönottoa, mikäli uusi tuotantolaitos ei juuri poikkea aikaisemmasta tai siihen on tehty vain vähäisiä muutoksia. Muutosten toteuttaminen on tällöin kallista ja saattaa aiheuttaa viivästyksiä käyttöönotossa.

Poikkeamatarkastelun tekeminen jo käynnissä olevalle laitokselle tehdään yleensä kontrolloinnin ja valvontasysteemien parantamiseksi. Tällöin muutosten tekeminen on kuitenkin kallista ja saattaa keskeyttää tuotannon. (Hyppönen ja Saloranta<sup>4</sup>, s. 27)

### **4.3 Vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN**

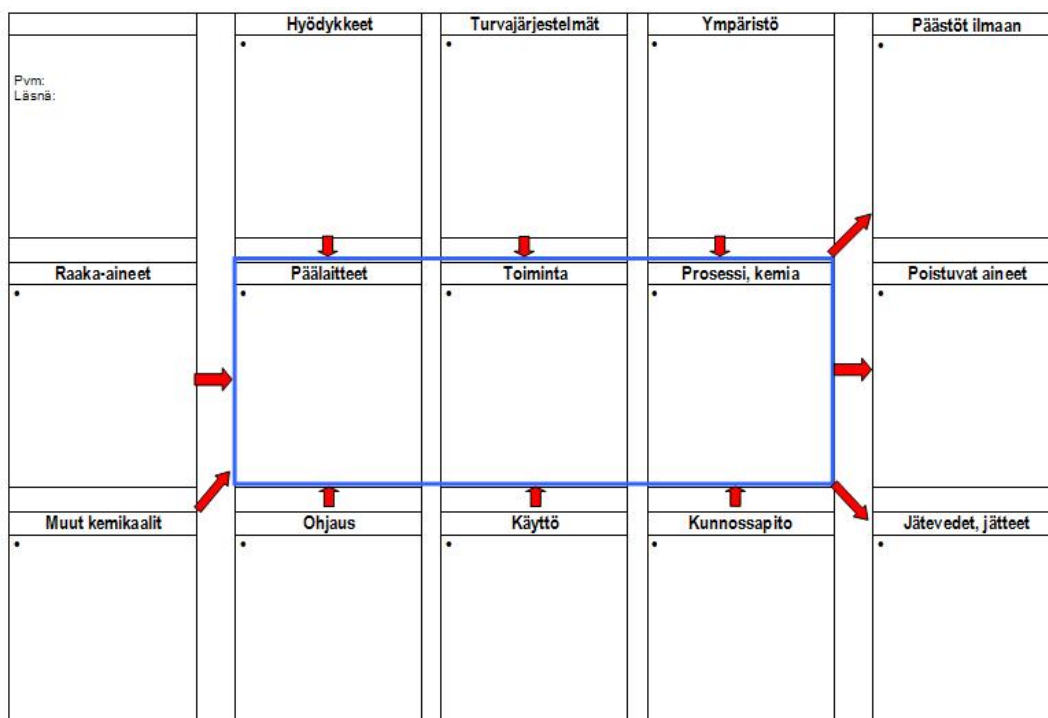
Vaarallisten skenaarioiden analyysi eli HAZSCAN on suomalainen analyysimenetelmä, jonka on kehittänyt VTT EU:n SPACE-projektissa vuosina 1996–1998. HAZSCAN-turvallisuusanalyysin avulla vaaramahdollisuuksia tunnistetaan laitteista, inhimillisistä tekijöistä sekä organisaatioista. HAZSCANin tavoitteena on määrittellä kohteen ongelma-alueet sekä onnettomuustekijät. HAZSCAN on parhaimmillaan, kun sitä käytetään koko laitoksen ja sen toimintojen analysointiin. Se käy myös laitoksen osajärjestelmien analysointiin. Tällöin osajärjestelmästä tehdään yksityiskohtainen aktiviteetti- ja prosessimallinnus (VTT<sup>17</sup>).

#### **4.3.1 Analyysin käyttö**

HAZSCAN-analyysissä koko laitos jaetaan osa-alueisiin eli kohteisiin siten, että kukin kohde analysoidaan kerrallaan. Esimerkiksi paperitehtaassa paperikone on yksi osa-alue. Kohteesta laaditaan A&P-malli, jonka avulla kohteen ongelma-alueita tutkitaan. Analyysi suoritetaan yleensä ryhmässä, jossa on vetäjä ja 3-6 muuta jäsentä. Vetäjän tulisi olla turvallisuusalan henkilö ja muiden työryhmän jäsenien prosessin hyvin tuntevia (VTT<sup>17</sup>, ALARP<sup>18</sup>).

### 4.3.2 Aktiviteetti- ja prosessimalli

Aktiviteetti- ja prosessimalli koostuu kolmestatoista kohdasta, jotka ovat: hyödykkeet, turvajärjestelmät, ympäristö, raaka-aineet, muut kemikaalit, ohjaus, käyttö, kunnossapito, jätevedet ja jätteet, tuotteet, päälaitteet, toiminta sekä prosessi, kemia. Kuhunkin kohtaan pyritään keräämään mahdollisimman yksityiskohtaista tietoa. Kolme viimeistä kohtaa ovat A&P-mallin keskeisimmät. A&P-mallissa päätarkoituksena on kirjata vain analyysin kannalta keskeiset vaaratilanteet ja muut tulokset. Tällöin analyysistä on mahdollista nähdä heti, mitä siinä on käsitelty. Aktiviteetti- ja prosessimalli on esitetty kuvassa 10 (VTT<sup>17</sup>).



Kuva 10. Vaarallisten skenaarioiden analyysi aloitetaan aktiviteetti- ja prosessimallin avulla

### 4.3.3 Analyysin kulku

Varsinainen analyysi aloitetaan, kun A&P-malli on täytetty. Aktiviteetti- ja prosessimalli käydään läpi kohta kerrallaan kysymysten avulla. Ryhmänvetäjä



Ensimmäisessä vaiheessa aloitettiin mahdollisten riskitekijöiden miettiminen kysymys kysymykseltä. Toisessa vaiheessa mahdolliset riskitekijät otettiin lähempään tarkasteluun ja mietittiin niistä aiheutuvia mahdollisia vaaratilanteita. Kysymysten tarkastelun kolmannessa vaiheessa kullekin mahdolliselle vaaratilanteelle määritettiin lukuarvo karkean riskinmäärittelyn taulukon avulla. Karkean riskinmäärittelyn taulukko on esitetty kuvassa 9. Kaikki mahdolliset vaaratilanteet, jotka saivat lukuarvon 3 tai enemmän otettiin mukaan analyysilomakkeeseen. Analyysilomake on esitetty liitteessä II.

Taulukko III Karkean riskinmäärittelyn taulukon avulla määritettiin lukuarvot mahdollisille vaaratilanteille<sup>19</sup>

Tapahtuman todennäköisyys	Seuraukset		
	vähäiset	haitalliset	vakavat
epätodennäköinen	1 (merkityksetön riski)	2 (vähäinen riski)	3 (kohtalainen riski)
mahdollinen	2 (vähäinen riski)	3 (kohtalainen riski)	4 (merkittävä riski)
todennäköinen	3 (kohtalainen riski)	4 (merkittävä riski)	5 (sietämätön riski)

## 5.1 Yhteenvetoraportti turvallisuusanalyysistä

Turvallisuusanalyysi tehtiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tutkimus- ja koekäytössä olevalle korkeajännitesähköpurkauslaitteistolle. Analyysi tehtiin nimenomaan tutkimuskäytössä olevalle laitteistolle eikä sen käyttöä teollisuudessa mietitty ollenkaan.

Korkeajännitesähköpurkauslaitteiston päätarkoitus on teollisuudessa puhdistaa jätevettä. Tällä hetkellä laitteiston toimintaa tutkitaan fenoli-vesi -seoksen avulla. Sen toimintaperiaatteena on puhdistaa vettä lyhytkestoisten impulssien avulla. Korkeajännitesähköpurkauslaitteistossa on kennostoalue, joka koostuu neljästä päällekkäisestä tasosta. Kullakin tasolla on neljä kuparia tai ruostumatontaterästä olevaa lankaa ja lankojen ylä- ja alapuolella teräsverkkoa. Pisarat törmäävät ensin teräsverkkoon ja sitten lankoihin, minkä seurauksena ne rikkoutuvat pienemmiksi tai

muuttavat muotoaan. Generaattori tuottaa lyhytkestoisen impulssin, jonka seurauksena syntyy salama. Salama kulkee pisaran pintaa pitkin ja aiheuttaa pisaran pinnalle radikaaleja, jotka puhdistavat vettä.

Turvallisuusanalyysi toteutettiin HAZSCAN-turvallisuusanalyysin avulla. Ensiksi tutustuttiin myös muihin analyysimenetelmiin. Tämän jälkeen tutustuttiin itse laitteeseen ja laadittiin siitä yksinkertainen virtauskaavio, jonka avulla täytettiin prosessista aktiviteetti- ja prosessimalli. Aktiviteetti- ja prosessimalli käytiin läpi kohta kohdalta kysymysten avulla, millä tavoin koottiin mahdolliset vaaratilanteet. Kukin vaaratilanne luokitettiin karkean riskinmäärittelyn avulla ja kaikki vaaratilanteet, jotka saivat vaaraluokituksen kolme tai enemmän kirjattiin analyysilomakkeelle.

Korkeajännitesähköpurkauslaitteistossa olevat ainemäärät ja käytettävät aineet eivät ole vaaraa aiheuttavia. Tämän takia suurimmat vaaratilanteet ovat lähinnä kennoston kuumeneminen ja puhdistuksen loppuminen. Puhdistuksen loppuminen ei suorastaan ole vaaratilanne, sillä kukaan ei puhdistettua fenolivettä aio kuitenkaan nauttia. Se on kuitenkin huomioitu suureksi vaaratilanteeksi, koska tämän laitteiston pääasiallinen tarkoitus on puhdistaa vettä. Kennoston kuumeneminen johtuu lähinnä siitä, että kennostolle ei mene ollenkaan syötettäviä aineita. Syötettävien aineiden virtauksen loppuminen voi johtua esimerkiksi vuodosta putkilinjassa, syötettävän aineen loppumisesta säiliössä, pumpun vikaantumisesta tai siitä, ettei pumppu ole päällä. Puhdistuksen loppumisen pääasialliset syyt ovat turbulenttisen virtauksen loppuminen tai kennoston/generaattorin vaurioituminen. Turbulenttinen virtaus loppuu jos turbopumppu ei ole päällä tai se on rikki.

Korkeajännitesähköpurkauslaitteistoon ehdotetaan yhtä korjausta, joka koskee kennoston lämpenemistä. Linjaan 1 pitää asentaa virtausmittari, josta on yhteys generaattoriin siten, että virtauksen loputtua linjassa 1 myös generaattori menee automaattisesti pois päältä. Muita korjauksia korkeajännitesähköpurkauslaitteistoon ei ehdoteta, sillä ainakin toistaiseksi työskennellään vain pienillä määrillä materiaalia. Tehty turvallisuusanalyysi ei käy suoraan sovellettavaksi teollisuuteen menevään

korkeajännitesähkönpurkauslaitteistoon vaan se toimii ennemminkin suuntaa antavana analyysinä jatkossa tehtäville turvallisuusanalyysille.

## **6 Johtopäätökset**

Työ aloitettiin tutkimalla kuuttatoista eri turvallisuusanalyysimenetelmää. Näistä valittiin kolme lähemmin tutkittavaksi: Dow's Fire and Explosion Index, HAZOP -poikkeama-analyysi ja vaarallisten skenaarioiden analyysi HAZSCAN. Nämä kolme analyysimenetelmää valittiin, koska ne sopivat turvallisuusanalyysin tekemiseen pilot-plant mittakaavassa oleville laitteistoille. Kolmesta valitusta varsinkin HAZOP ja HAZSCAN sopivat hyvin analyysimenetelmiksi. Dow:n avulla analyysiä ei tehty, sillä korkeajännitesähkönpurkauslaitteisto ei aiheuta suurta palo- tai räjähdysvaaraa. Turvallisuusanalyysiä ei tehty HAZOP-poikkeamatarkastelun avulla, sillä sen pääajatus on, että se tehdään ryhmätyönä. Täysin uudelle prosessille HAZSCAN oli hyvä turvallisuusanalyysimenetelmä, sillä sen aloittamiseen ei tarvittu paljoa alkutietoja. Se oli myös helppo tehdä, vaikka analyysimenetelmä ei ollut entuudestaan tuttu. Analyysin tekeminen oli systemaattista ja aktiviteetti- ja prosessikaavion avulla koko laitteisto ja prosessi käytiin johdonmukaisesti läpi.

Turvallisuusanalyysi tehtiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa olevalle korkeajännitesähkönpurkauslaitteelle. Korkeajännitesähkönpurkauslaitteisto on aivan uusi keksintö ja sen tarkoituksena on tulevaisuudessa toimia jäteveden puhdistuksessa. Korkeajännitesähkönpurkauslaitteiston toimintaperiaatteena puhdistaa vettä lyhytkestoisten impulssien avulla. Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa laitetta testataan fenoli-vesi -seoksen avulla.

Tutkimuskäyttöön tarkoitettussa korkeajännitesähkönpurkauslaitteistossa ei ilmennyt juurikaan kemiallisten reaktioiden aiheuttamia riskitekijöitä. Tällaisia riskitekijöitä olivat lähinnä OH-radikaalien, otsonin ja typen oksidien muodostuminen sekä fenolin haittavaikutukset ja mahdolliset reaktiot. Korkeajännitesähkönpurkauslaitteistossa käytettävät ainemäärät ovat kuitenkin niin pieniä, että mikään edellä mainituista ei ole sellaisissa pitoisuuksissa, että se aiheuttaisi ihmiselle vaaraa. Ainostaan typen oksidien muodostusta ei ole juurikaan tutkittu. Aikaisempien tutkimusten perusteella

typen muodostuminen on niin vähäistä, että siitä ei ole ihmiselle haittaa. Suurin osa korkeajännitesähkönpurkauslaitteiston riskitekijöistä ja –tilanteista aiheutuu mahdollisista laitevioista. Laitteistolle tehdystä analyysistä olisi tullut kattavampi, mikäli sähkö- ja konetekniikasta hyvin tietäviä henkilöitä olisi ollut mukana analyysin teossa. Eritoten generaattorista ja kennostosta johtuvien riskitekijöiden ja –tilanteiden kartuttamisessa sähkö- ja konetekniikan tuntemus olisi ollut tarpeen, mistä johtuen joitain riskitekijöitä ja –tilanteita on saattanut jäädä huomioimatta. Toisaalta tämä osoittaa hyvin eri alojen asiantuntijoiden tärkeyden riski- tai turvallisuusanalyysiä tehtäessä.

Laitteistosta aiheutuvien riskitekijöiden ja –tilanteiden lisäksi juuri muita riskiä aiheuttavia tilanteita ei ollut pienien ainemäärien johdosta. Esimerkiksi vuoto putkistossa tai säiliössä ei aiheuta suurta vaaratilannetta muulloin kuin osuessaan generaattoriin. Pumpun rikkouduttua toki sen korjaus maksaa ja hidastaa tutkimuksia, mutta näillä virtausmäärillä ei kannata haaskata aikaa ja voimavaroja toisen pumppulinjan rakentamiseen. Esimerkiksi tukokset putkistoissa fenoli-vesi -seoksella eivät ole kovin todennäköisiä vaaratekijöitä.

Suurin vaaratilanne syntyy, jos kennosto pääsee kuumenemaan esimerkiksi tulevien aineiden loppumisesta tai generaattorin toimintovirheestä johtuen. Tämän takia korkeajännitesähkönpurkauslaitteistoon ehdotetaan tehtäväksi yksi lisäys: Linjaan yksi, jota pitkin tulevat aineet pumpataan kennostoalueen yläpuolelle, asennettaisiin virtausmittari. Virtausmittarista olisi yhteys generaattoriin siten, että virtauksen vähentyessä tai kokonaan pysähtyessä myös generaattori kytkeytyisi pois päältä tai aiheuttaisi hälytyksen. Korkeajännitesähkönpurkauslaitteesta tulisi myös laatia työohjeet, jossa mainitaan kennoston kuumenemisesta, generaattorin toiminnasta ja fenoli-vesi -seoksen käsittelystä. Generaattorissa olevat venäjänkieliset ohjetarrat tulisi kääntää suomeksi tai englanniksi.

Vaikka korkeajännitesähkönpurkauslaitteessa ei suuria riskitekijöitä ilmennytkään, oli turvallisuusanalyysin tekeminen tarpeellista. Korkeajännitesähkönpurkauslaite on uusi keksintö, josta ei ole vuosien kokemusta, eikä siitä näin ollen löytynyt tehtyä turvallisuusanalyysiä. Laitteiston kanssa samoissa tiloissa työskentelee usein myös

opiskelijoita ja tutkijoita. Turvallisuusanalyysi olisi hyvä tehdä myös muille samantapaisille projekteille, mistä ei ole aikaisempaa tietoa.

Koekäytössä olevalle korkeajännitesähkönpurkauslaitteistolle tehty turvallisuusanalyysi ei sovi suoraan teollisuuden käyttöön tulevan korkeajännitesähkönpurkauslaitteiston turvallisuusanalyysiksi. Tehty analyysi on lähinnä suuntaa antava ja se toimii alustavana menetelmänä jatkossa tehtäville turvallisuusanalyysille.

Tulevaisuudessa, kun korkeajännitesähkönpurkauslaitteisto siirretään teollisuudessa käytettävään mittakaavaan, ainakin seuraavanlaisia asioita tulee ottaa huomioon, ennen kuin prosessi otetaan käyttöön: Mistä puhdistettava jätevesi tulee ja mitä myrkkyjä se saattaa sisältää? Tulevien aineiden säiliö ja syöttö pitää ehkä eristää myrkyllisiä kemikaaleja sisältävien aineiden takia. Putkistossa oleviin vuotoihin tai tukoksiin on varauduttava esimerkiksi varaputkilinjoilla ja suoja-altailla. Varsinkin syötettävien aineiden pumpun, turbopumpun ja kennoston rikkoutumiseen on varauduttava siten, että varalaitteet ovat heti käytössä, kun ne menevät rikki.



## Lähteet

- 1 Petersen, D., *Techniques of Safety Management, A System Approach*, 3<sup>rd</sup> ed., U.S.A. 1989, s.3.
- 2 Kuronen, Juhani., Lappeenrannan teknillinen yliopisto, *suullinen tiedonanto*, 2008.
- 3 Kalliokoski, L., Riskien arviointi ja turvallisuusjohtaminen, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2000.
- 4 Hyppönen, A., Saloranta, T., *HAZOP-poikkeamatarkastelun käsikirja*, 2<sup>nd</sup> ed., Helsinki 2000, s 5.
- 5 Malmén, Y., Nissilä, M., Rouhiainen, V., *Suuronnettomuusvaaraa aiheuttavien laitosten turvallisuusselvitykset Euroopassa*, 1<sup>st</sup> ed., Suomi, Espoo 1992, s.7.
- 6 Kerko, P., *Turvallisuusjohtaminen*, 1<sup>st</sup> ed, Porvoo 2001, s. 12.
- 7 Europarlamentti, <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef> 22.1.2008.
- 8 Tilastokeskus, [http://www.stat.fi/til/ttap/2005/ttap\\_2005\\_2007-05-22\\_kat\\_001.html](http://www.stat.fi/til/ttap/2005/ttap_2005_2007-05-22_kat_001.html) 28.1.2008.
- 9 Yritysturvallisuus,  
<https://scapa.cc.lut.fi:8443/webct/urw/lc4130001.tp0/cobaltMainFrame.dowebct?JSESSIONID=ffJnH6fVhZ5X3sv8SqB3T34dzSf4437LmQrBbsXGPLpQWvc2wBTC!-154816275!scapa.cc.lut.fi!8080!8443>, 21.1.2008.
- 10 Kuronen, J., *Yritysturvallisuus*, 1<sup>st</sup> ed, Lappeenranta 2007, s. 19–26.
- 11 Preis, Sergei, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, *suullinen tiedonanto*, 2008.
- 12 Hatakka, Henry, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, *suullinen tiedonanto*, 2008.
- 13 Chen, B.N., Isaev, U., Khaskelberg, M., Kornev, J., Preis, S., Yavorovsky, N., *Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water air mixtures*, Tomsk, Russia and Lappeenranta, Finland 2006, s 207-208.

- 14 Preis, S., *Results of pulsed dielectric barrier discharge testing in water treatment: Preliminary results, conclusions and prospective*, Lappeenranta 2008.
- 15 The Dow Chemical Company, *Dow's fire and explosion index hazards classification guide*, 7<sup>th</sup> ed., U.S.A. 1994.
- 16 American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for hazard evaluation procedures*, 1<sup>st</sup> ed., U.S.A. (N.Y) 1985.
- 17 Valtion teknillinen tutkimuslaitos,  
[http://www.vtt.fi/riskianalyysit/riskianalyysit\\_vaarallisten\\_skenaarioiden\\_analyysi\\_hazscan.jsp](http://www.vtt.fi/riskianalyysit/riskianalyysit_vaarallisten_skenaarioiden_analyysi_hazscan.jsp), 4.12.2007.
- 18 Valtion teknillinen tutkimuslaitos,  
<http://virtual.vtt.fi/virtual/riskianalyysit/indexdd8e.html>, 27.11.2007.
- 19 Valtion teknillinen tutkimuslaitos,  
[http://www.vtt.fi/riskianalyysit/riskianalyysit\\_karkea\\_riskin\\_maarittely.jsp](http://www.vtt.fi/riskianalyysit/riskianalyysit_karkea_riskin_maarittely.jsp), 29.1.2008.