

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A200 Energiatekniikan kandidaatintyö

**INES-ASTEIKON KÄYTTÖ JA TAPAHTUMAT VUOSIEN  
SAATOSSA**

**INES-SCALE - THE USE AND EVENTS OVER THE YEARS**

Lappeenrannassa 25.11.2009

0294970 Henni Simpanen Ente 5

## Sisällysluettelo

LIITTEET.....	<u>2</u>
LYHENNELUETTELO .....	<u>3</u>
1 JOHDANTO .....	<u>4</u>
2 INES-ASTEIKKO .....	<u>5</u>
2.1 Soveltamisalue.....	<u>9</u>
2.2 Käyttö.....	<u>9</u>
2.3 INES-asteikon käyttö Suomessa.....	<u>11</u>
3 ONNETTOMUUDET YDINLAITOKSILLA VUOSIEN SAATOSSA .....	<u>12</u>
3.1 Luokka 7.....	<u>13</u>
3.2 Luokka 6.....	<u>13</u>
3.3 Luokka 5.....	<u>14</u>
3.4 Luokka 4.....	<u>14</u>
4 TAPAHTUMAT YDINLAITOKSILLA VUOSIEN SAATOSSA.....	<u>16</u>
4.1 Luokka 3.....	<u>16</u>
4.2 Suomi .....	<u>17</u>
4.2.1 Luokka 2.....	<u>18</u>
4.2.2 Luokka 1 .....	<u>19</u>
5 YDINPOLTTOAINEKIERTO INES-ASTEIKON KANNALTA.....	<u>21</u>
5.1 Ydinpolttoaineen valmistus.....	<u>22</u>
5.2 Käytetyn ydinpolttoaineen ja ydinjätteiden varastointi .....	<u>24</u>
5.3 Ydinjätteen jälleenkäsittely .....	<u>26</u>
5.4 Käytetyn ydinpolttoaineen ja aktiivisen voimalaitosjätteen loppusijoitus.....	<u>27</u>
6 TAPAUKSET MUUSSA SÄTEILYN KÄYTÖSSÄ.....	<u>28</u>
6.1 Tapaukset säteilyn lääketieteellisessä käytössä.....	<u>29</u>
6.2 Tapaukset teollisuuden säteilynkäytössä .....	<u>30</u>
6.3 Säteilylähteiden katoamiset ja varkaudet .....	<u>32</u>

---

6.4	Kuljetukset .....	<u>33</u>
7	NYKYISYYS .....	<u>35</u>
8	TULEVAISUUS .....	<u>37</u>
9	YHTEENVETO.....	<u>38</u>
	LÄHTEET .....	<u>40</u>

## LIITTEET

Liite I: STUK:n määrittämät INES-luokituksen perusteet

## LYHENNELUETTELO

ALARA	As Low As Reasonably Achievable – säteilyannosten pitäminen mahdollisimman alhaisina
BWR	Boiling Water Reactor - Kiehutusvesireaktori
Cs	Cesium, alkuaine
IAEA	International Atomic Energy Agency – Kansainvälinen atomienergiajärjestö
INES	International Nuclear and radiological Event Scale
KPA	Käytetty polttoaine
NEA	Nuclear Energy Agency
NRC	Nuclear Regulatory Commission - USA:n ydinturvallisuutta valvova viranomainen
OECD	Organization for European Economic Cooperation, taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
PWR	Pressurized Water Reactor - Painevesireaktori
RBMK	Venäläinen grafiittihidasteinen kiehutusvesireaktori
STUK	Säteilyturvakeskus
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VVER	Venäläistyyppinen painevesireaktori
WHO	World Health Organization – Maailman terveysjärjestö

# 1 JOHDANTO

Kandidaatintyössä esitellään INES-asteikon (International Nuclear and radiological Event Scale), eli kansainvälisen ydinlaitostapahtumien ja ydinonnettomuuksien luokitusasteikon käyttöä ja kehitystä. Asteikko on työväline säteilyä ja radioaktiivisia aineita koskevista turvallisuutta vaarantavista tapahtumista ja onnettomuuksista tiedottamiseen toiminnan harjoittajien, viranomaisten ja median välillä. Säteilyä ja radioaktiivisia aineita on käytetty teollisuudessa, tutkimuskäytössä sekä lääketieteessä jo vuosikymmenten ajan, mutta INES-asteikko otettiin käyttöön vasta 90-luvulla.

Asteikko tunnetaan lähinnä ydinlaitoksissa tapahtuneiden onnettomuuksien kautta. Vakavimmat onnettomuudet ovatkin tapahtuneet juuri niissä, sillä muissa toiminnoissa radioaktiivisten aineiden määrä tai niiden aktiivisuus ei riittäisi aiheuttamaan yhtä laajoja vaikutuksia. Alkuperäistä asteikkoa on laajennettu niin, että se koskee nykyisin kaikkea säteilyn käyttöä. Kuitenkaan esimerkiksi Suomessa ei ohjeistusta ole vielä kansallisesti päivitetty vastaamaan vuonna 2008 koottua uutta asteikon käyttöohjetta. Käyttöohjeen on koontanut International Atomic Energy Association (IAEA) sekä taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön ydinvoiman virasto OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA).

IAEA on kansainvälinen YK:n alainen järjestö, jonka tarkoitus on edistää turvallisia, varmennettuja ja rauhanomaisia ydinteknologioita yhteistyössä jäsenmaidensa ja muiden yhteistyökumppaneidensa kanssa. Suomessa IAEA:n yhteysviranomaisena toimii Säteilyturvakeskus (STUK), joka on säteily- ja ydinturvallisuutta valvova viranomainen, tutkimuslaitos ja asiantuntijaorganisaatio.

Kirjallisuustyö on osa BH10A200 Energiatekniikan kandidaatintyö –kurssia, joka järjestettiin keväällä 2009. Työn aiheena oli alun perin INES-tapaukset vuosien saatossa ja ydinvoimalaitosten turvallisuuskehitys. Aihe muuttui kuitenkin työn edetessä käsittelemään INES-asteikon käyttöä vuosien saatossa, sillä IAEA:n laatiman asteikon käyttöohjeen mukaan vertailu eri ydinlaitosten tai maiden välillä ei ole sen käyttötarkoitusten mukaista. Eri-laisissa reaktoreissa tai vaikkapa röntgenkuvauksissa voi siis aiheutua tapahtumia, mitkä ovat onnettomuusluokituksen perusteella vaikutuksiltaan samanlaiset, mutta syyt, jotka tilanteeseen ovat johtaneet, voivat olla täysin erilaiset.

## **2 INES-ASTEIKKO**

IAEA ja OECD/NEA kehittivät vuonna 1990 asteikon kuvaamaan ydinlaitosten tapahtumien ja onnettomuuksien vakavuutta. Sitten se laajennettiin koskemaan kaikkia tapahtumia, joissa käsitellään radioaktiivista materiaalia tai säteilyä. Asteikon nimeksi annettiin International Nuclear Event Scale eli INES -asteikko ja se otettiin käyttöön vuonna 1994. (Sandberg 2004, 208) Asteikko kehitettiin tapahtuneiden ydinlaitosonnettomuuksien avulla ja sitä käytetään havainnollistamaan tapahtumien ja onnettomuuksien säteily- ja ydinturvallisuusmerkitystä, kun niistä tiedotetaan julkisuuteen (Säteilyturvakeskus 2002, 3). Asteikko siis toimii osittain samoin kuin esimerkiksi Richterin asteikko, joka määrittelee maanjäristysten voimakkuuksia.

Asteikko on pyritty jakamaan niin, että jokainen taso on vakavuudeltaan kymmenkertainen edellisen asteen tapahtumaan verrattuna. Skaala on jaettu kolmeen osaan tapahtumien vaikutusten perusteella, sekä seitsemään eri luokkaan, jotka määrittelevät säteily- ja ydinturvallisuuden kannalta merkitykselliset tapahtumat. Luokat ja niiden pääasialliset luokituskriteerit onnettomuuksille ovat esitettyinä taulukossa 1 ja tapahtumille taulukossa 2.

Taulukot perustuvat IAEA:n viralliseen vuonna 2008 julkaisemaan käyttäjän oppaaseen, johon se on tarkentanut esimerkiksi kuljetuksissa tapahtuneiden häiriöiden luokitusta. (IAEA 2009, 2) Säteilyturvakeskuksen käyttämä taulukko on esitetty liitteessä I. Se perustuu IAEA:n vanhentuneeseen käyttöoppaaseen ja on vielä toistaiseksi käytössä Suomessa.

**Taulukko 1.** INES-luokituksen periaatteet onnettomuuksille. (Mukaiillen: IAEA 2009, 3)

INES luokka	Ihmiset ja ympäristö	Laitosalueen säteilyhallinta	Syvyysuuntainen puolustus, turvallisuuden heikkeneminen
<p><b>Erittäin vakava onnettomuus</b> 7</p>	<p>- Hyvin suuri radioaktiivisten aineiden päästö aiheuttaen laajoja terveydellisiä ja ympäristöllisiä vaikutuksia ja vaatii suunniteltujen laajojen suojelutoimenpiteiden toteuttamista.</p>		
<p><b>Vakava onnettomuus</b> 6</p>	<p>- Merkittävä radioaktiivisten aineiden päästö vaatii suunniteltujen suojelutoimenpiteiden toteuttamista.</p>		
<p><b>Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus</b> 5</p>	<p>- Rajallinen radioaktiivisten aineiden päästö, joka todennäköisesti vaatii suojelutoimenpiteiden käynnistämistä. - Useita säteilyn aiheuttamia kuolemia.</p>	<p>- Vakava reaktorisydämen vaurioituminen. - Huomattava radioaktiivisten aineiden päästö, joka suurella todennäköisyydellä aiheuttaa ympäristön asukkaille merkittävän säteilyaltistuksen. Voi aiheutua esimerkiksi suuresta kriittisyys-onnettomuudesta tai tulipalosta.</p>	
<p><b>Laitosonnettomuus</b> 4</p>	<p>- Vähäinen radioaktiivisten aineiden päästö, joka ei todennäköisesti vaadi suojelutoimenpiteiden käynnistämistä, muutoin kuin paikallisten elintarvikkeiden käytön rajoittamiseksi. - Vähintään yksi säteilyn aiheuttama kuolema.</p>	<p>- Polttoaineen sulaminen tai vahingoittuminen aiheuttaen yli 0,1 % päästön sydämen inventaariosta. - Radioaktiivisten aineiden merkittävä päästö aiheuttaen suurella todennäköisyydellä merkittävän säteilyaltistuksen ympäristön asukkaille.</p>	



Luokat 4-7 kuvaavat siis onnettomuuksia ja luokat 1-3 turvallisuutta heikentäviä tapahtumia. Tapahtumat ja onnettomuudet luokitellaan kolmessa osassa niiden ympäristövaikutusten, laitosalueen sisäisten vaikutusten ja turvallisuuden heikkenemisen perusteella. Turvallisuuden heikkenemisessä sovelletaan syvyysuuntaisen puolustuksen (defence in depth) periaatetta. Poikkeuksellisille tapahtumille, joilla ei kuitenkaan ole merkitystä turvallisuuden kannalta, on vielä oma 0 – luokkansa. (Sandberg 2004, 208)

**Taulukko 2.** INES-luokituksen periaatteet tapahtumille. (Mukaiillen: IAEA 2009, 3)

INES luokka	Ihmiset ja ympäristö	Laitosalueen säteilyhallinta	Syvyysuuntainen puolustus, turvallisuuden heikkeneminen
<b>Vakava turvallisuuden vaikuttava tapahtuma 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yli kymmenkertaisesti vuosittaiset lakisääteiset annosrajat ylittävä säteilyannos työntekijälle.</li> <li>- Säteilyn aiheuttama välitön terveysvaikutus (esim. palovamma).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yli 1 Sv/h annosnopeuden ylittyminen työskentelyalueella</li> <li>- Vakava kontaminaation leviäminen valvonta-alueen ulkopuolisiin tiloihin. Pieni todennäköisyys ympäristön väestön säteilyaltistukselle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lähellä onnettomuutta oleva tilanne ydinvoimalaitoksessa, kun turvallisuutta varmentavia tekijöitä ei ole jäljellä.</li> <li>- Kadonnut tai varastettu säteilylähde.</li> <li>- Väärin toimitettu säteilylähde, puutteita säteilyn hallinnassa ja käsittelyssä.</li> </ul>
<b>Merkittävä turvallisuuden vaikuttava tapahtuma 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ympäristön asukkaalle aiheutunut yli 10 mSv:n säteilyannos.</li> <li>- Työntekijän vuosittaisen annosrajan ylittävä säteilyannos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Säteilytaso työskentelyalueella yli 50 mSv/h.</li> <li>- Merkittävä kontaminaation leviäminen laitosalueella valvonta-alueen ulkopuolelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Merkittäviä turvallisuuden laiminlyöntejä ilman varsinaisia seurauksia.</li> <li>- Löydetty korkea-aktiivinen säteilylähde, laite tai kuljetuspakkaus, joka on kuitenkin suojattu.</li> <li>- Säteilylähteen puutteellinen pakkaus.</li> </ul>
<b>Poikkeuksellinen turvallisuuden vaikuttava tapahtuma 1</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ympäristön asukkaan lakisääteisen annosrajan ylittyminen.</li> <li>- Vähäiset ongelmat turvallisuutta varmentavissa laitteissa, kun syvyysuuntaisen puolustuksen mukaisia toimintoja on vielä jäljellä.</li> <li>- Kadonnut tai varastettu vähäaktiivinen säteilylähde, laite tai kuljetuspakkaus.</li> </ul>
<b>Ei turvallisuusmerkitystä (Poikkeuksellinen tapahtuma/Luokka 0)</b>			

## 2.1 Soveltamisalue

INES-asteikkoa sovelletaan kaikissa tapahtumissa ja onnettomuuksissa, joissa käsitellään radioaktiivista materiaalia tai säteilyä. Eniten julkisuudessa käsiteltyjä sovelluskohteita ovat esimerkiksi ydinvoimalaitoksissa, ydinjätevarastoissa, jälleenkäsittelylaitoksissa, tutkimusreaktoreissa sekä radioaktiivisissa kuljetuksissa sattuneet tapahtumat. Myös säteilylähteiden tai pakkausten katoamiset ja varastamiset sekä yllättävien säteilylähteiden löydöt kuuluvat soveltamisalueeseen. Sotilaalliset toiminnot tai ydinmateriaaliturvallisuuteen liittyvät toiminnot jäävät asteikon ulkopuolelle. (IAEA 2009, 4)

## 2.2 Käyttö

INES-asteikko on työkalu, jonka päätarkoitus on helpottaa kommunikaatiota ja ymmärrystä teollisuuden, median ja yhteiskunnan välillä tapahtumien turvallisuusmerkityksestä. Luokitus tehdään joko turvallisuuden heikkenemisen perusteella, tai ympäristön tai laitosalueen säteilyvaikutuksien perusteella. Tapahtumassa tai onnettomuudessa kaikki seuraukset määritetään erikseen. Suuri osa ennen asteikon käyttöön ottoa tapahtuneista onnettomuuksista ja joitakin turvallisuutta heikentäviä tapahtumia on luokiteltu jälkikäteen. (Sandberg 2004, 211) IAEA on tehnyt INES-luokkien määrittämistä varten ohjeen, joka on yhteinen kaikille jäsenmaille. Ohje on päivitetty vuonna 2008.

INES -luokkien tulkinta ei ole täysin yksiselitteistä. Tiedot eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään eri maiden erilaisten raportointikäytäntöjen vuoksi. Eri maiden ydinvoiman turvallisuutta ei myöskään suositella vertaamaan toisiinsa tapahtumien perusteella. Jokainen maa raportoi IAEA:lle ainoastaan luokkaan 2 kuuluvat tai sitä korkeammat tapahtumat, mikä on kuitenkin hyvin pieni osa kaikista tapahtumista ja vaihtelee paljon vuosittain. Asteikko on virallisesti käytössä 61 eri maassa. (IAEA 2009, 180)

Tapahtuman vakavuuden tulkinta voi olla hankalaa onnettomuustilanteessa. Lopullinen INES-luokitus tehdäänkin jälkikäteen, kun kaikki tai suurin osa vaikutuksista on selvillä. Luokitus voi siis muuttua korkeammaksi tai matalammaksi, kun tapahtuman kaikki vaikutukset on kartoitettu. Mahdollisuudet INES-asteikon käyttämiseen apuvälineenä onnettomuustilanteessa rajoittuvatkin lähinnä tiedottamiseen.

Esimerkiksi Sellafieldin ydinlaitoksilla Iso-Britanniassa sattuneet onnettomuudet ja vakavat turvallisuuteen vaikuttavat tapahtumat luokiteltiin kaikki jälkikäteen, jolloin saatavissa oleva tieto oli rajoitettua. Tämän vuoksi luokituksia tehdessä jouduttiin käyttämään muun muassa käsin tehtyjä muistiinpanoja ja viittauksia kokousten pöytäkirjoihin yksityiskohtaisten virallisten raporttien sijaan. Jopa eläkkeelle jääneitä työntekijöitä haastateltiin tapahtumien kulun selvittämiseksi.

50- ja 60-luvuilla tutkimukseen ja kirjaukseen käytettävä tekniikka ei ollut samalla tasolla kuin nykyisin. Tapauksista, joissa on mahdollisesti ollut radioaktiivisten materiaalien päästöjä ympäristöön, ei ole välttämättä löytynyt yksityiskohtaisia arvioita kriittiseen ryhmään kohdistuneista säteilyannoksista. Vaikka tällainen arvio olisikin tehty, mallinnuksessa olisi todennäköisesti käytetty erilaisia oletuksia verrattuna nykyisiin käytäntöihin. Tapahtuman aikana tallennetut tiedot, joita voidaan käyttää takautuvasti jossain määrin luotettavasti, liittyvät vapautuneeseen aktiivisuuteen. INES luokkien 3 ja 4 ympäristövaikutuksien säteilyannokset on laskettu suurempien onnettomuuksien ympäristövaikutuksiin perustuen. (Webb et al. 2006, 34, 38)

### 2.3 INES-asteikon käyttö Suomessa

INES-luokka määritetään tapahtumamaassa. Suomessa IAEA:n yhteysviranomaisena toimii STUK, joka päättää tapahtumien luokituksen sen jälkeen, kun voimayhtiöt raportoivat niistä. Ohjeet luokituksen määrittämiseen ja raportointiin on esitetty tarkemmin STUK:n YVL-ohjeessa 1.12 Ydinlaitostapahtumien kansainvälinen vakavuusluokitus. STUK ilmoittaa luokkaan 2 ja sitä ylempiin luokkiin kuuluvista tapahtumista IAEA:lle, joka ylläpitää ajantasaista tapahtumalista.

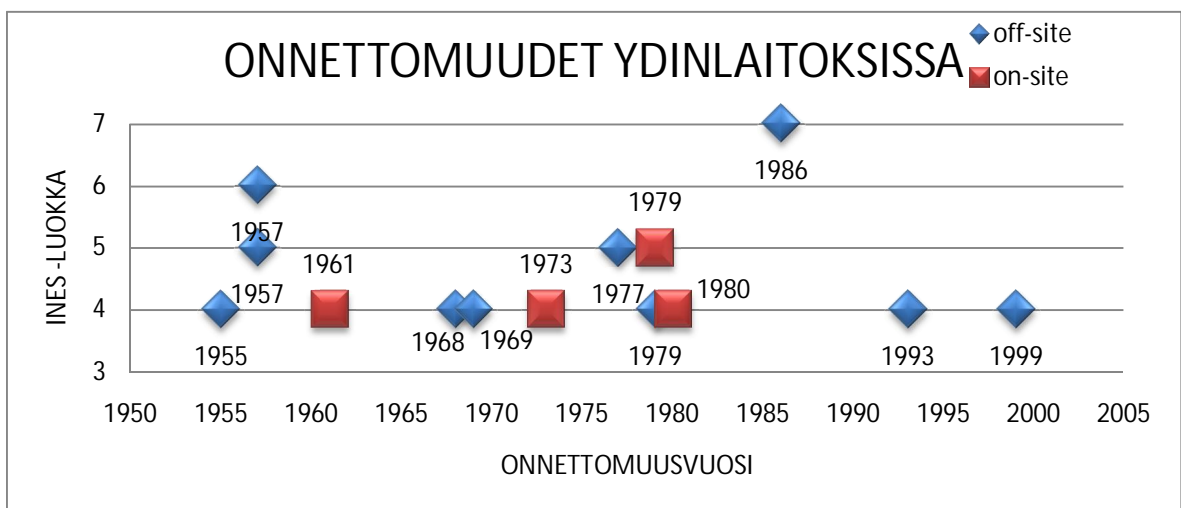
INES-luokituksen piiriin kuuluvat tapahtumat Suomen ydinvoimalaitoksissa Olkiluodossa tai Loviisassa, Otaniemessä sijaitsevassa tutkimusreaktorissa, jätteiden käsittely- ja varastointilaitoksissa sekä tuoreen ja käytetyn ydinpolttoaineen kuljetuksissa. Suomen Olkiluotoon rakennettava loppusijoituslaitos kuuluu myös valmistuttuaan luokituksen piiriin (Sandberg 2004, 209).

Ydinenergian käytön turvallisuusvalvontaa koskevista asioista tiedottaminen kuuluu Säteilyturvakeskuksen tehtäviin, joka käyttää INES-luokkia tiedottaessaan Suomen ydinlaitosten tapahtumista julkisuuteen. STUK tiedottaa tapahtuman INES-luokasta joko erillisellä tiedotteella tai ydinturvallisuutta koskevan neljännesvuosiraportin yhteydessä. Muiden radioaktiivisten aineiden tapahtumien luokituksesta, kuten sairaaloiden ja teollisuuden säteilynkäytöstä STUK päättää tapauskohtaisesti. (Säteilyturvakeskus 2002, 3, 5)

Säteilyasetuksen mukaan säteilyn käyttöön liittyvästä poikkeavasta tapahtumasta, jonka seurauksena turvallisuus vaarantuu merkittävästi säteilyn käyttöpaikalla tai sen ympäristössä, on ilmoitettava viivytyksettä STUKille. (Pukkila 2004, 335)

### 3 ONNETTOMUUDET YDINLAITOKSILLA VUOSIEN SAATOSSA

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti INES-luokitellut ydinlaitosonnettomuudet. Kuvassa 1 näkyvät kaikki ydinlaitoksilla vuoden 1950 jälkeen tapahtuneet onnettomuudet, jotka ovat saaneet INES-luokituksen. Viimeisimmästä onnettomuudesta on kulunut aikaa jo kymmenen vuotta ja ainoastaan kaksi onnettomuutta on luokiteltu asteikon laatimisen jälkeen. Onnettomuudet on eritelty ulkoisten (off-site, vaikutukset ympäristölle) ja sisäisten (on-site, vaikutukset laitosalueella) vaikutusten perusteella.



**Kuva 1.** INES-luokitellut ydinlaitosonnettomuudet off-site ja on-site vaikutusten perusteella

Suomessa ei ole tapahtunut yhtään ydinlaitosonnettomuutta. Kuitenkin lähimaissa tapahtuvien onnettomuuksien vaikutukset voivat ulottua myös Suomeen asti ja historian vakavimman ydinvoimalaitosonnettomuuden seuraukset näkyvät maassamme edelleen radioaktiivisena laskeumana sekä sosiaalisina vaikutuksina.

### 3.1 Luokka 7

Ainut INES 7-luokituksen saanut onnettomuus tapahtui 1986 Neuvostoliitossa, nykyisen Ukrainan alueella, kun Tshernobylin ydinvoimalaitoksen RBMK-tyyppinen reaktori tuhoutui räjähdysten seurauksena. Tapaus kuuluu luokkaan 7 ympäristövaikutusten perusteella, sillä reaktorin täydellinen rikkoutuminen aiheutti suuren radioaktiivisen päästön ja yli 30 laitoksen työntekijää kuoli onnettomuudessa saatuihin vammoihin tai säteilyn varhaisvaikutuksiin. (Sandberg 2004, 211)

Onnettomuudesta seurasi myös laajat sosiaaliset ja ympäristölliset myöhäisvaikutukset. Radioaktiivisten aineiden laskeuma jakautui tuulten ja sateen vaikutuksesta epätasaisesti ympäri Eurooppaa, jopa Japaniin ja Pohjois-Amerikkaan asti. Suomessa nykyisin saatavan säteilyannoksen kannalta tärkein laskeuman sisältämä aine on  $^{137}\text{Cs}$ , joka aiheuttaa edelleen noin prosentin vuosittaisesta yksilön saamasta säteilyannoksesta. (Pöllänen 2003, 95)

Pahiten onnettomuudesta kärsivät kuitenkin itse Ukraina sekä sen naapurimaat Valko-Venäjä sekä osa Venäjää. Onnettomuus on aiheuttanut myös laajat taloudelliset vaikutukset ja tutkimustyötä seurauksista tehdään yhä. Onnettomuudesta löytyy paljon kirjallisuutta ja raportteja. (YK 2002, 35)

### 3.2 Luokka 6

INES 6 – luokituksen saaneita onnettomuuksia on myös yksi. Kyshtymin polttoaineen jälleenkäsittelylaitoksella entisessä Neuvostoliitossa, nykyisellä Venäjän alueella, räjähti 1957 runsasaktiivista nestemäistä jätettä sisältänyt säiliö. Onnettomuus sai luokituksensa ympäristövaikutustensa perusteella, sillä räjähdys johti radioaktiiviseen päästöön ja terveyshait-

toja rajoitettiin suojelutoimenpiteillä, kuten alueen väestön evakuoinnilla. (Sandberg 2004, 212) Onnettomuutta käsitellään lisää kappaleessa 5.3.

### **3.3 Luokka 5**

Kaksi onnettomuutta on saanut INES 5 – luokituksen. Isossa-Britanniassa, Windscalen jälleenkäsittelylaitoksella (nykyinen Sellafield) tapahtunut kaasujäähdytteisen grafiittireaktorin onnettomuus vuonna 1957 luokiteltiin ympäristölle vaaraa aiheuttavaksi onnettomuudeksi. Onnettomuudessa plutoniumintuottoreaktorissa tapahtunut tulipalo aiheutti radioaktiivisten aineiden päästön ympäristöön. USA:ssa 1979 Three Mile Islandin ydinvoimalaitoksella tapahtui onnettomuus, jossa reaktorin sydän sulii osittain syöttöveden menetyksen seurauksena. Tämä onnettomuus luokiteltiin laitoksen sisäisten vaikutusten perusteella.

Näiden kahden onnettomuuden lisäksi voitaisiin luokkaan 5 lisätä myös Tsekkoslovakiassa vuonna 1977 A1-prototyypireaktorissa tapahtunut sydämen sulamisonnettomuus reaktorisydämen vaurioitumisen ja laitostilojen saastumisen perusteella. Onnettomuutta ei kuitenkaan ole luokiteltu virallisesti ja se yritettiin pitää salassa julkisuudelta. (Sandberg 2004, 212)

### **3.4 Luokka 4**

Iso-Britanniassa sijaitsevassa Sellafieldin ydinlaitoksissa tapahtui vuosina 1955-1979 viisi INES 4-luokituksen saanutta onnettomuutta. Neljä näistä onnettomuuksista saivat luokituksensa ulkoisten vaikutusten perusteella. 1973 jälleenkäsittelylaitoksella tapahtunut radioaktiivisten aineiden leviäminen kemiallisen reaktion seurauksena luokiteltiin laitosalueen sisäisten vaikutusten perusteella. Sellafield tunnettiin Windscalena 1980-luvulle saakka, kun-

nes nimi vaihdettiin useiden onnettomuuksien aiheuttaman huonon maineen takia. (Webb et al. 2006, 42-45)

INES 4-luokituksen ovat saaneet lisäksi vuonna 1961 Idahossa, USA:ssa kolmen ihmisen kuolemaan johtanut SL-1 kooreaktorin säätösauvan ulossinkoutumisen aiheuttama räjähdys, sekä Ranskassa Saint-Laurentin kaasujäähdytteisen ydinvoimalan polttoaineen osittainen sulaminen vuonna 1980. Buenos Airesissa, Argentiinassa, RA-2-tutkimusreaktorissa tapahtui vuonna 1983 kriittisyysonnettomuus, joka aiheutti yhden reaktorin läheisyydessä työskennelleen henkilön kuoleman. Nämä onnettomuudet saivat luokituksensa sisäisten vaikutusten perusteella. (Sandberg 2004, 217)

Vuonna 1993 Siperiassa, Tomsk-7 plutoniumin jälleenkäsittelylaitoksessa tapahtui räjähdys säiliössä, joka sisälsi radioaktiivisia aineita. Räjähdyksen seurauksena radioaktiivisia aineita levisi ympäristöön kontaminoiden yli 120 km<sup>2</sup> alueen. Tapahtuma luokiteltiin ulkoisten vaikutusten perusteella onnettomuudeksi. (BBC News 2006)

Viimeisin onnettomuus on tapahtunut vuonna 1999 Tokaimurassa, Japanissa, ydinpolttoaineen jälleenkäsittelylaitoksessa. Laitoksessa syntyi työntekijöiden virheen takia hallitsematon ydinreaktio, jolloin radioaktiivisia aineita levisi ympäristöön. Kaksi työntekijää kuoli onnettomuudessa ja yli 400 ihmistä altistui säteilylle. (Kajos & Virtanen 2004, 11)



## **4 TAPAHTUMAT YDINLAITOKSILLA VUOSIEN SAATOSSA**

Onnettomuuksien lisäksi INES-asteikolla luokitellaan vakavat, merkittävät ja poikkeukselliset turvallisuuteen vaikuttavat tapahtumat luokkiin 1-3. Tapahtumia on huomattavasti suurempi määrä kuin onnettomuuksia. Niiden merkitystä ei kuitenkaan pidä vähätellä, sillä niiden avulla voidaan tehdä turvallisuusparannuksia vastaavien tapahtumien ehkäisemiseksi muualla sekä ymmärtää paremmin riskitekijöitä.

### **4.1 Luokka 3**

Unkarissa, Paksin ydinvoimalaitoksen 2 yksikössä tapahtui vuosihuollon aikana vuonna 2003 merkittävä turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma. Polttoaineen puhdistuksen yhteydessä vaurioitui 30 polttoainepun erä pahoin. Tapahtuma määriteltiin aluksi INES-luokkaan kaksi ympäristövaikutusten perusteella, eli radioaktiivisen päästön vuoksi. Myöhemmin, kun polttoaine oli saatu jäähdytettyä riittävästi parempia tutkimuksia varten, se nostettiin luokkaan 3 johtuen rikkoontuneiden nippujen suuresta lukumäärästä. (Sandberg 2004, 243-244)

Toinen esimerkki INES 3-luokituksen saaneesta häiriötilanteesta on vuonna 1975 tapahtunut tulipalo Saksassa Greifswaldin VVER-ydinvoimalaitoksessa. Palo syttyi sähkömiehen aiheuttama oikosulun sähköjärjestelmään. Se levisi kaapeleita pitkin ja johti pääkiertopumppujen, syöttövesipumppujen ja molempien apusyöttövesipumppujen pysähtymiseen, jolloin laitos pystyi poistamaan jälkilämpöä reaktorista vain luonnonkierron avulla. Vastavaan tyyppinen häiriö missä tahansa muualla kuin VVER- tyyppisellä laitoksella, jossa reaktorin teho suhteessa primaari-sekundaaripiirin vesimassoihin on poikkeuksellisen suuri; olisi aiheuttanut vakavia reaktorivaurioita. (Sandberg 2004, 251-252)

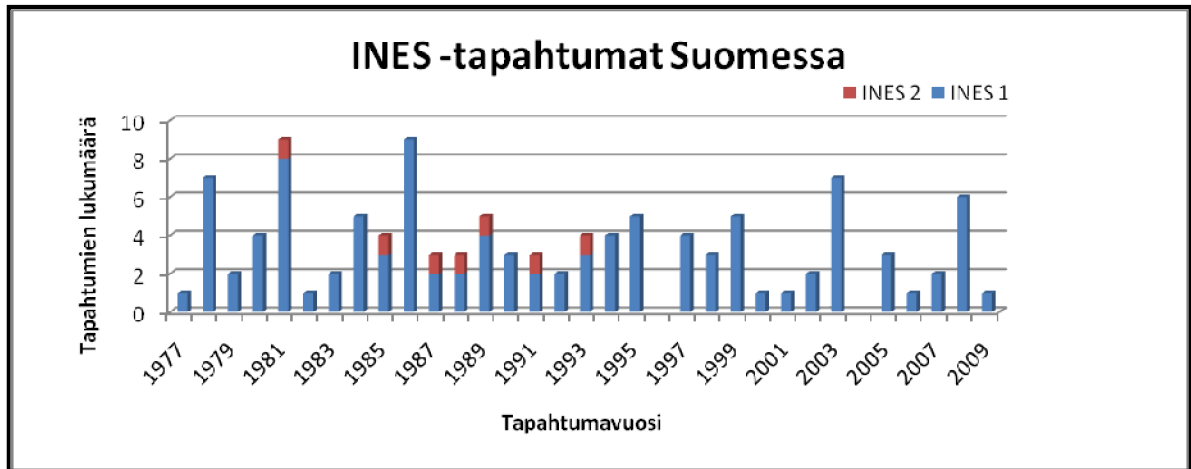
## 4.2 Suomi

Kaikki Suomessa INES-luokituksen saaneet tapahtumat ovat kuvattuina STUK:n julkaisemissa neljännesvuosiraporteissa koskien Suomen ydinvoimalaitosten käytön turvallisuutta (Säteilyturvakeskus 2002, 6). Suomessa on tällä hetkellä viisi ydinlaitosta, kaksi kiehutusvesireaktoria (BWR) Olkiluodossa, kaksi venäläistyyppistä painevesireaktoria Loviisassa (VVER) sekä Otaniemen tutkimusreaktori. Korkein luokitus tähän mennessä Suomen ydinlaitostapahtumille on INES 2.

Useat tapahtumat ovat seisokin aikaisia, jolloin laitoskomponentteja tarkastetaan, huolletaan ja korjataan. Vuosittaiset huollot mahdollistavat myös työskentelyn joissakin sellaisissa paikoissa, joihin ei laitoksen käynnin aikana ole pääsyä korkeiden säteilytasojen tai muuten vaativien olosuhteiden takia. Vuosihuoltojen aikana laitoksilla työskentelevien henkilöiden määrä moninkertaistuu, joten inhimillisten virheiden riski myös kasvaa. Noin 90 prosenttia vuosittaisista säteilyannoksista kertyy seisokkien aikana. (Fortum Generation 2009, 7)

Vuosihuoltojen laatu voi myös vaikuttaa tapahtumien määrään. Vuosihuoltojen tyypit, kestot ja laajuudet vaihtelevat vuosittain. Esimerkiksi Loviisan voimalaitoksilla suoritetaan joka vuosi polttoaineenvaihtoseisokki, jolloin tehdään myös vuosittaiset tarkastus- ja huoltotyöt. Joka neljäs vuosi taas on vuorossa pidempi vuosihuolto, jossa tehdään laajemmat tarkastus- ja perusparannustyöt sekä joka kahdeksas vuosi laajin seisokki, jolloin tehdään perusteelliset huolto- ja muutostyöt. (Fortum Generation 2009, 13)

Kuvassa 2 on aikajana kaikista Suomessa INES-luokituksen saaneista tapahtumista. Kuvasta on huomioitava, että suurin osa tapahtumista on luokiteltu jälkikäteen saatavissa olleiden tietojen perusteella. Vuosi 2009 on mukana vain ensimmäisen vuosineljänneksen osalta.



**Kuva 2.** Aikajana Suomessa INES-luokitelluista ydinlaitostapahtumista reaktoreiden käyttöönotosta lähtien.

Vuonna 1977 tahdistettiin verkkoon Loviisa 1 –laitos ja vuonna 1982 kaikki neljä Suomen ydinreaktoria olivat käytössä.

#### 4.2.1 Luokka 2

Suomessa on tapahtunut seitsemän INES 2-luokituksen saanutta merkittävää turvallisuuden vaikuttavaa tapahtumaa vuoteen 2009 mennessä. Tapahtumat, niiden sijaintipaikat sekä ajankohdat on lueteltuina taulukossa 3. Viimeisin tapahtuma oli vuonna 1993 Loviisa 2:lla, kun sekundaaripiirin syöttövesijärjestelmään kuuluva laippa murtui päittäin. Murtuma aiheutti lieviä vaurioita murtumakohdan ympäristössä, mutta henkilövahingoilta vältyttiin. Valvomohenkilökunta teki reaktoripikasulun käsin 13 sekuntia putkikatkon jälkeen. Tapah-

tumassa henkilökunnan toimenpiteet olivat oikeita, nopeita ja tehokkaita eikä prosessin käyttäytymisessä havaittu ongelmia. (Sandberg 2004, 265)

**Taulukko 3.** Suomessa INES 2 -luokituksen saaneet tapahtumat

<b>Paikka</b>	<b>Tapahtuma</b>	<b>Vuosi</b>
<b>Loviisa 1</b>	Hätäjäähdytysvesisäiliön laimentuminen seisokissa	1988
<b>Loviisa 2</b>	Reaktorin pikasulku ja hätäjäähdytyksen käynnistyminen	1981
	Pää- ja hätäsyöttöveden menetys	1987
	Sekundaaripiirin syöttövesiputken katkeaminen	1993
<b>Olkiluoto 1</b>	Pikasulkujärjestelmän vajaatoiminta primaaripiirissä olleen teräsjauhon vaikutuksesta	1989
<b>Olkiluoto 2</b>	Reaktorin ylipainesuojajärjestelmän puhallusventtiilien yhteisvika	1985
	Ulkoisen sähköverkon menetys kytkinlaitoksella sattuneen tulipalon seurauksena	1991

Yksikään näistä tapahtumista ei ole johtanut työntekijöiden tai ulkopuolisten henkilöiden virallisten säteilyannosrajojen ylittymiseen tai radioaktiiviseen päästöön.

#### 4.2.2 Luokka 1

Taulukossa 4. on lueteltu Suomen ydinlaitoksilla sattuneet INES-luokitellut tapahtumat vuosina 1999-2009, jotka kaikki kuuluvat luokkaan 1. Loviisan laitoksilla oli kaksi aktiivisuuspäästöön liittyvää tapahtumaa, muut kolme koskivat turvallisuuden heikentymistä turvallisuusteknisten käyttöehtojen (TTKE) vastaisesti.

Taulukko 4. Suomessa INES 1 –luokituksen saaneet tapahtumat vuosina 1999-2009

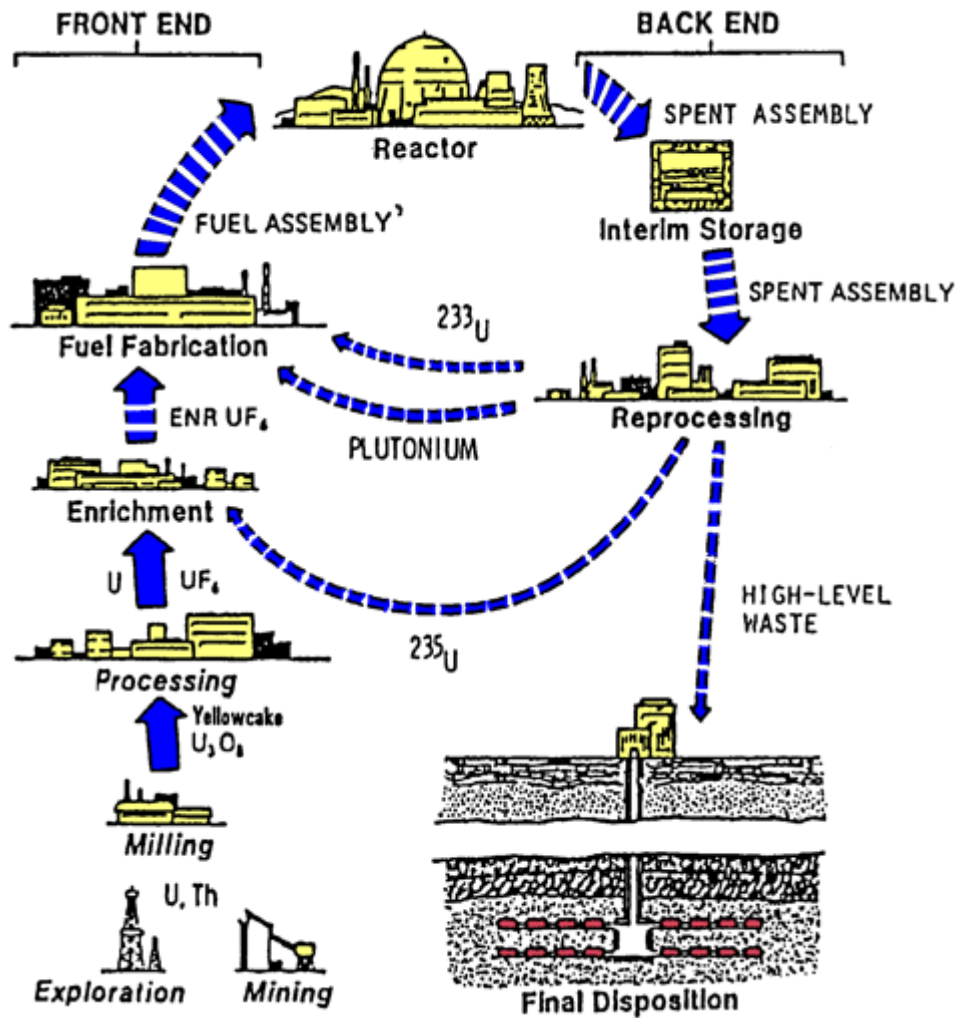
Paikka	Tapahtuma	Vuosi
<b>Loviisa 1</b>	Radioaktiivisen veden vuoto reaktorin ulkopuolisiin tiloihin seisokissa tehdyssä lisävesipumpun testauksessa	2000
	Primääripiirin boorihappopitoisuus alitti TTKE:n asettamat rajat	2002
<b>Loviisa 2</b>	Virhe hätäjähdytysjärjestelmän laitemerkinnöissä	1999
	Kontaminaation leviäminen vuosihuollossa	2006
	Simulointivirhe reaktorisuojausjärjestelmässä	2008
<b>Olkiluoto 1</b>	Reaktorin suojarakennuksen kaasunkäsittelyjärjestelmän venttiilin virheellinen asento	1999
	Onnettomuustilanteessa reaktoria jähdyttävän järjestelmän luotettavuuden heikentyminen	2001
	Suojarakennuksen eristystoiminnon heikentyminen	2003
	Reaktorin pikasulku reaktoriveden lämpötilan laskunopeuden turvallisuusrajan ylityksen vuoksi	2003
	Hätäjähdytyspumppujen korkeat värähtelytasot	2003
	Säteilymittausjärjestelmien määräaikauskokeiden puuttuminen	2008
	Säätösauvojen ajo TTKE:n vastaisesti	2008
	Reaktoripikasulku johtuen generaattorin jännitesäätäjän häiriöstä	2008
	Reaktorin jälkilämmönpoistojärjestelmän pumpun merkkivalon vioittuminen	2009
<b>Olkiluoto 2</b>	Suojarakennuksen henkilösulun aukiolo TTKE:n vastaisesti	1999
	Virhe polttoainelatauksessa	1999
	Hätäjähdytyspumput TTKE:n vastaisesti poissa automaattisesta käynnistysvalmiudesta vuosihuollossa	2003
	Reaktorirakennuksen ilmastointijärjestelmän palopeltilin toimimattomuus TTKE:n vaatimalla tavalla	2003
	Sähkökatkos vuosihuollossa pysäytti ydinturvallisuutta varmentavia laitteita	2005
	Reaktorin pikasulku turbiinin säätöventtiilin vian vuoksi	2007

<b>Paikka</b>	<b>Tapahtuma</b>	<b>Vuosi</b>
<b>Olkiluoto 1 &amp; 2</b>	Reaktorisydämen valvontarajat eivät toimineet suunnitellusti	2002
	Palovesipumpun toimintakunnottomuus	2003
	Dieseltilojen hiilidioksidisammutusjärjestelmän hälytyskoestuksien tekemättä jättäminen TTKE:n mukaisesti	2005
	Laitosyksiköiden välisten syöttökatkaisijoiden relesuojauksien asetteluvirhe	2005
	Kelpoistamattomia sulakkeita sähköjärjestelmissä	2006
	Hätäjäähdytysjärjestelmien pumppuhuoneiden läpivientien puutteelliset tiivistykset	2008
	Dieselgeneraattoreiden tiivisteviat	2008
<b>Olkiluoto KPA-varasto</b>	Lattiaviemäröinnin pinnanvalvonnan tarkastuksien tekemättä jättäminen	2003

Osa Olkiluodon tapahtumista on nostettu luokkaan 1 Teollisuuden voima Oy:n (TVO) menettelytavoissa löytyneiden puutteiden vuoksi, esimerkiksi useiden TTKE:n edellyttämien määräaikauskokeiden tekemättä jäämisten tai viivästymisten vuoksi. (Kainulainen 2009, 3)

## **5 YDINPOLTTOAINEKIERTO INES-ASTEIKON KANNALTA**

Koko ydinpolttoainekierto polttoainemateriaalin louhinnasta sen loppusijoitukseen sisältää radioaktiivisia aineita, jolloin se kuuluu INES-luokituksen piiriin. Osassa prosesseista onnettomuus- ja vahinkoriskit ovat vähäisemmät, mutta esimerkiksi käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelylaitoksilla on tapahtunut vakaviakin onnettomuuksia. Kuvassa 3 on esitettyinä tyypillinen ydinpolttoainekierto, johon kuuluvat muun muassa louhinta, rikastus, polttoaineen valmistus, käyttö, varastointi, jälleenkäsittely sekä loppusijoitus.



Kuva 3. Tyypillinen ydinpolttoainekierto. (U.S.NRC 2009)

## 5.1 Ydinpolttoaineen valmistus

Ydinvoimalaitosten polttoaineena käytettävää uraanimalmia hankitaan kaivamalla joko maanalaisista kaivoksista tai avolouhoksista. Tavallisesta metallikaivostoiminnasta uraanikaivokset eroavat niiden radiologisten tekijöiden vuoksi. Louhittaessa ilmaan vapautuu uraanin hajoamistuotetta, kaasumaista radonia ( $^{222}Rn$ ). Maanalaisissa kaivoksissa radon on suurempi ongelma kuin avolouhoksissa, mutta hyvällä ilmastoinnilla voidaan pienentää

saatavia säteilyannoksia myös kaivoksissa. Uraanikaivoksissa INES-luokituksen piiriin kuuluvat esimerkiksi tapaukset, joissa työntekijän säteilyannosrajat ylittyvät tai louhinnassa syntyvät radioaktiiviset jätteet leviävät ympäristöön tai niistä jätetään huolehtimatta. (Energiateollisuus ry 2006, 10)

Uraanimalmin rikastus tapahtuu yleensä kaivoksen läheisyydessä, jolloin radonin lähtöaineet  $^{226}\text{Ra}$  ja  $^{230}\text{Th}$  jäävät puuromaiseen kaivosjätteeseen ja muodostavat potentiaalisen säteilylähteen vielä pitkäksi ajaksi varsinaisen kaivostoiminnan käyttöajan päättymisen jälkeen. Paikoin vanhojen kaivosten jätekasat ovat edelleenkin hoitamatta ja saattavat aiheuttaa ylimääräistä säteilyaltistusta ympäristön asukkaille. (Energiateollisuus ry 2006, 10-11)

Nigeriassa Arlitin aavikkokaupungissa asukkaat epäilivät uraaninlouhinnan aiheuttaneen terveydellisiä vaikutuksia. Tutkimusanalyysit maaperän ja juomaveden aktiivisuudesta osoittivat kaivosten läheisyydessä veden aktiivisuuspitoisuuksien olevan jopa 100 kertaa korkeammat kuin mitä maailman terveysjärjestö WHO määrittelee hyväksyttäväksi. Kaivauksista vastuussa olevan ranskalaisen ydinenergiayhtiön, Arevan väitetään muutenkin laiminlyöneen turvallisuusmääräyksiä kaivauksilla esimerkiksi jättämällä radioaktiivista jätettä suojaamatta niin, että se voi levitä ympäristöön tuulten mukana. Myös uraanimalmin kuljetuksessa tapahtuneen kolarin seurauksena ympäriinsä levinnyt malmi jätettiin siivoamatta kunnolla, minkä johdosta säteilytasot alueella olivat koholla vielä pitkään. Myös puutteita monitoroinnissa kaivauksilla on kritisoitu. (IRIN 2005)

Ydinpolttoaineen valmistuksen vaiheista puhdistus ja konversio ovat tavallisia kemiallisia prosesseja, jotka eivät aiheuta säteilyvaikutuksia työntekijöille. Väkevöintilaitoksilla oleva muutamaan prosenttiin saakka väkevöity uraaniheksafluoridi  $\text{UF}_6$  on vain heikosti radioaktiivista, mutta kemiallisesti se on myrkyllinen aine. Mahdollisten vuotojen varalta laitoksilla onkin ilmaisimet, joilla sekä suojellaan laitosten työntekijöitä että ehkäistään päästöt lai-



tosten ulkopuolelle. Muutamissa onnettomuustapauksissa pieniä vuotoja on kuitenkin sattunut. Säteilyhaittoja ei ole aiheutunut, koska laitosten ulkopuolelle on joutunut vain fluori-vetyä, kun taas itse uraani on jäänyt vuotokohdan lähistöön. (Energiateollisuus ry 2006, 12-13)

## **5.2 Käytetyn ydinpolttoaineen ja ydinjätteiden varastointi**

Säteilyturvakeskuksen ohjeen YVL 6.8 mukaan ”Ydinpolttoaineen varastoinnissa ja käsittelyssä ovat keskeisinä turvallisuustavoitteina estää kriittisyys ja polttoaineen vaurioituminen sekä turvata riittävä jäähdytys ja säteilysuojaus. Turvallisuuden kannalta on lisäksi tärkeää, että polttoaineen käsittelyn ja siirtojen yhteydessä nostettavat taakat eivät putoa ja että ydinvoimalaitoksen turvallisuuden kannalta tärkeiden järjestelmien, laitteiden ja rakenteiden toimivuutta ei vaaranneta.” (Säteilyturvakeskus 2003, 3)

Suomessa ohjetta noudatetaan siirtämällä käytetty polttoaine reaktorista laitosalueella sijaitseviin vesialtaisiin, jossa sen annetaan jäähtyä useita vuosikymmeniä. Tämän jälkeen, kun polttoaineen aktiivisuus on riittävästi pienentynyt, se on tarkoitus loppusijoittaa pysyvällä tavalla Suomen kallioperään. Kuvassa 4. näkyy Olkiluodon käytetyn polttoaineen siirtolaitteisto ja -säiliö.



**Kuva 4.** Käytetyn polttoaineen siirtovälineistöä Olkiluodossa. (Posiva 2008)

Muualla maailmassa varastointi ei välttämättä ole yhtä pitkäkestoista kuin Suomessa, vaan polttoainetta voidaan käyttää jälleenkäsittelyyn. Pitkäaikaisvarastoinnin kannalta maailmalla on jouduttu myös kehittämään uusia varastointimenetelmiä, sillä polttoaineiden jäähdytysaltaiden kapasiteetti on rajallinen. Kriittisyysturvallisuus on varmistettava pitämällä polttoaineput riittävän kaukana toisistaan. Yksi vaihtoehtoinen varastointimenetelmä on siirtää riittävästi aktiivisuudeltaan heikentynyt, eli noin 5 vuotta jäähdytetty polttoaine tynnyreihin. Tämä voidaan toteuttaa kuiva- tai märkäsäilytysmenetelmällä. (U.S.NRC 2008, 1)

Suomessa on ydinjätteen varastoinnissa luokiteltu yksi tapahtuma luokkaan INES 1. Tämä tapahtui vuonna 2003 Olkiluodon KPA-varastolla, kun lattiaviemäröinnin pinnanvalvonnan tarkastus oli jätetty tekemättä useiden vuosien ajan. Ns. pintavahtien tehtävänä on varmistaa mahdollisten polttoainealtaiden hätäjäähdytysjärjestelmästä peräisin olevien vesivuoto-

jen havaitseminen. Tapahtuma osoitti puutteita organisaation toiminnassa ja ohjeiden noudattamisessa. (Tossavainen 2004, 10)

Myös muut ydinlaitoksissa syntyvät radioaktiiviset jätteet voivat sisältää onnettomuusriskejä. Sellafieldin laitoksilta löytyy hyviä esimerkkejä INES-luokitelluista tapahtumista, jotka koskevat radioaktiivisia jätteitä. Vuonna 1980 lisääntynyt korroosio käytetyn magnox-ydinpolttoaineen varastointisiilossa aiheutti Cs-päästön ympäristöön ilmanvaihtohormin kautta. Vuonna 1984 taas jäteveden puhdistuslaitoksessa liejutankissa syttyi liuotainainepalo, jonka aiheutti varomattomat tulityöt säiliön läheisyydessä. Palo aiheutti alfaaktiivisuuden leviämisen ympäristöön. Molemmat tapahtumat saivat luokituksen INES 3. (Webb et al. 2006, 45-46)

### **5.3 Ydinjätteen jälleenkäsittely**

Teollisuudessa on pitkään ollut käytössä ns. PUREX –prosessi (plutonium uranium extracting). Se on tällä hetkellä maailmassa pääasiallinen jälleenkäsittelymenetelmä ja on käytössä esimerkiksi Ranskassa La Haguessa, Iso-Britannian Sellafieldissa ja Venäjällä Majakin jälleenkäsittelylaitoksella. Muitakin menetelmiä on kehitteillä. Prosessi ei ole kannattavaa pienellä kapasiteetilla, mikä tarkoittaa käytännössä laitoksilla suuria ainevirtoja ja sitä kautta suurta määrää käytetyn polttoaineen aktivoimaa prosessijätettä. Uraanin ja plutoniumin erotuksen jälkeen jäljelle jäävä jäte on erittäin radioaktiivista ja sisältää loput fissiotuotteet sekä aktinideja (Am, Np, Cm). Jäte tuottaa myös paljon lämpöä. (WNA 2009, 6) Prosessissa toimii olennaisena osana typpihappoon liuottaminen, joka liittyy prosessiin neutronihidasteena toimivan veden ja aiheuttaa ongelmia jälleenkäsiteltävien aineiden kriittisyyden kanssa. (Tulkki, 8)

Ydinjätteen jälleenkäsittelylaitoksilla tapahtuneet vakavimmat onnettomuudet liittyvät kemiallisiin reaktioihin radioaktiivisen materiaalin käsittelyn ja varastoinnin yhteydessä. Esimerkiksi ainut INES 6 -luokkaan määritelty onnettomuus on tapahtunut polttoaineen jälleenkäsittelylaitoksessa Kyshtymissä, entisessä Neuvostoliitossa vuonna 1957. Laitos tunnetaan nimellä Tsheljabinsk-65 ja se tuotti käytetystä ydinpolttoaineesta plutoniumia ydin-asemateriaaliksi. Toimimaton jäähdytysjärjestelmä aiheutti räjähdyskorkeaksi aktiivisessa nitraatti-asetaattisäiliössä. Fission tuotteet levisivät ilmakehään kontaminoiden laajoja alueita. (French Nuclear Society 1991, 227) Neuvostoliitto julkaisi ensimmäisen virallisen tiedotteen onnettomuudesta vasta vuonna 1989. (IAEA 2007, 9)

Jälleenkäsittelylaitoksilla suuria ongelmia aiheuttaa siis käytetyn polttoaineen suuri radioaktiivisuus ja suuri jälkilämmön tuotto. Esimerkiksi vuonna 1972 Sellafieldin jälleenkäsittelylaitoksella vain 19 päivää jäähdytettyjen käytettyjen polttoaine-elementtien huolimaton käsittely aiheutti jodipäästön ja tapahtuma määriteltiin luokkaan 3 kuuluvaksi ympäristöön levinneen aktiivisuuden perusteella. (Webb et al. 2006, 44)

#### **5.4 Käytetyn ydinpolttoaineen ja aktiivisen voimalaitosjätteen loppusijoitus**

Ydinjätteiden loppusijoitusta on toteutettu maailmalla vasta matala- ja keskiaktiivisen jätteen osalta. Korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoitus on pisimmilläänkin vasta suunnittelu- vaiheessa. Suomi kuuluu pioneirimaihin loppusijoituskonseptin kehittämisessä.

Radioaktiivisten jätteiden käsittelyssä on useita vaiheita, joissa säteilyturvallisuudesta on huolehdittava. Esikäsittely suoritetaan jatkokäsittelyn helpottamiseksi. Siihen voi kuulua esimerkiksi jätteiden kerääminen, lajittelu, neutralointi tai muu kemiallinen säätö, dekontaminointi ja alkukarakterisointi. Matala- ja keskiaktiivisten jätteiden loppusijoitukselle on

käytössä kaksi eri periaateratkaisua, betonipunkkeri maan pintakerroksissa ja luolasto keskisyvyudessa kallioperässä. Suomessa sekä Loviisan että Olkiluodon laitoksilla on omat voimalaitosjäteluolansa kallioperässä. (Sandberg 2004, 279-281)

Ydinjätteiden loppusijoituksessa on varmistettava niin käyttöturvallisuus kuin pitkäaikais-turvallisuuskin. Tarkemmat kriteerit löytyvät valtioneuvoston asetuksesta ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuudesta (VNA 27.11.2008/736).

Suomessa suunnitellaan ydinjätteen loppusijoitusta syvälle kallioperään ja loppusijoituspaikaksi on valittu Eurajoen Olkiluoto. Suomen ydinvoimalaitosten omistajayhtiöiden, TVO:n ja Fortum Power and Heat Oy:n (Fortum) omistama Posiva Oy suunnittelee ja toteuttaa loppusijoituskonseptia. Ydinjätelaitos koostuu maan pinnalla sijaitsevasta kapselointilaitoksesta sekä maan alla sijaitsevasta loppusijoituslaitoksesta. Loppusijoitus on vielä tutkimusvaiheessa ja rakentamislupahakemus on tarkoitus jättää valtioneuvostolle vuonna 2012 ja loppusijoitustoimintojen on suunniteltu alkavan vuonna 2020. (Posiva 2008, 19)

## **6 TAPAUKSET MUUSSA SÄTEILYN KÄYTÖSSÄ**

Säteilytoimintaan liittyviin poikkeustapauksiin, joista aiheutuu tai voisi aiheutua huomattavaa säteilyaltistusta ihmisille, luokitellaan teollisuus- ja sairaalakäytön lisäksi myös radioaktiivista ainetta sisältävän säteilylähteen katoamiset, varkaudet tai heitteillejätöt. Yleisimmät syyt poikkeustapauksille ovat tiedon tai valvonnan puute, välinpitämättömyys tai jopa rikollisuus. Laiminlyönneistä ja tietämättömyydestä aiheutunutta säteilyvaaratilannetta ei aina ymmärretä tai katsota tarpeelliseksi ilmoittaa viranomaiselle, eikä niitä välttämättä aina osata tunnistaa.

INES-luokitus otettiin käyttöön Suomessa säteilylähteiden ja kuljetusten vaaratilanteiden osalta vuonna 2003. STUKille ei ole tullut yhtään ilmoitusta vakavaa terveyshaittaa aiheuttaneesta säteilytapahtumasta vuosina 1990-2003. (Pukkila 2004, 334-335)

## **6.1 Tapaukset säteilyn lääketieteellisessä käytössä**

Säteilyä käytetään lääketieteessä muun muassa säde- ja isotooppihoidoissa. Sädehoito on yksi syöpäsairauksien perushoitomuoto, mutta sitä käytetään myös esimerkiksi verisuonten ahtaumien hoitoon ja tiettyjen ihosairauksien hoitoon. Isotooppihoidolla on myös vakiintunut asema syövän hoidossa sekä kilpirauhassairauksien ja niveltulehdusten hoidossa. Isotooppilääketieteellä tarkoitetaan sitä lääketieteen erikoisalaa, jossa käytetään radioaktiivisia aineita avolähteinä radiolääkkeiden muodossa sairauksien tutkimiseen ja hoitoon. (Pukkila 2004, 184, 220) Sairaaloiden ja muiden terveydenhuollon yksiköillä on velvollisuus tehdä ilmoitus potilaan hoidossa tai tutkimuksessa käytetyn laitteen tai välineen aiheuttamasta vaaratilanteesta.

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen suurimmat säteilyonnettomuudet, jotka vaativat ihmishenkiä, ovatkin liittyneet sädehoitoon. Costa Rican San Joséssa tapahtui useiden ihmisten kuolemaan johtanut sairaalafyysikon arviointivirhe kobolttikeilahoitolähteen uusinnan jälkeisestä säteilyntuotosta. Laitteella ehdittiin hoitaa 115 potilasta. 42 potilaista kuoli yhdeksän kuukauden sisällä ja ainakin 13 näistä on osoitettu olevan virheen aiheuttamia. Onnettomuus kuuluu luokkaan 5. (Pukkila 2004, 339-340)

Kuvassa 5. on esitettyinä uuden sukupolven sädehoitolaite, joka mahdollistaa erittäin tarkan hoidon sekä arkojen kohteiden suojaamisen. Laite on myös turvallinen työntekijöiden kannalta, sillä säteily suojaukset ovat kunnossa sekä säteily kohdistuu vain pienelle alueelle.



**Kuva 5.** Uuden sukupolven sädehoitolaite. (Scanex Medical Systems 2009)

## 6.2 Tapaukset teollisuuden säteilynkäytössä

Radiografiaa käytetään teollisuudessa laajalti ympäri maailmaa rakenteellisiin tarkastuksiin. Säteilytyöntekijöillä on tarkat turvallisuusmääräykset, joiden tarkoituksena on pitää mahdolliset säteilyannokset niin pieninä, kuin mahdollista ALARA –periaatteen mukaisesti. Radiografialaitteissa käytetään säteilyn synnyttämiseen joko suuritehoista röntgenlaitetta tai paksummille materiaaleille joko gammalähdettä tai lineaarikiihdytintä. (IAEA 2000, 1-2)

Esimerkkinä vakavasta turvallisuuteen vaikuttaneesta tapahtumasta (INES 3) teollisuudessa löytyy vuonna 1999 Yanangossa, Perussa, vesivoimalaitoksen käytetyn radioaktiivisen  $^{192}\text{Ir}$  – lähteen aiheuttamat useat palovammat. Suojaamaton lähde joutui sen vaarallisuudesta tietämättömän hitsarin taskuun ja sitä kautta kotiin. Lähde aiheutti suuret säteilyannokset

hitsarille sekä hänen perheelleen. Onnettomuus johtui suurelta osin radiografiakuvauksen turvallisuusmääräysten laiminlyönnistä työkohteella sekä laitteiston kunnan tarkastuksista. (IAEA 2000, 8-10) Kuvassa 6. voidaan nähdä säteilyvammat aiheuttanut osa sekä säteilyn vaikutukset asteittain.



Photo 4. Source pigtail.



Photo 5. Blistering lesion surrounded with large inflammatory halo on the mid-upper line of the rear surface of the right thigh (22 February 1999).



Photo 6. Extended superficial erosion surrounded by a large dusky inflammatory area in the rear surface of the right thigh (1 March 1999).



Photo 7. Severely suppurated large ulcers spreading in the whole perianal (14 December 1999).

**Kuva 6.** Säteilylähteen aiheuttamat seuraukset. Alussa näkynyt ulkoisesti pienehkö säteilyvamma johti koko jalan amputointiin noin vuoden kuluttua tapahtumasta. (Mukaiillen: IAEA 2000)

Suomessa tapahtui vuonna 2004 Porvoossa suojaamattoman säteilylähteen aiheuttama vaaratilanne, joka sai INES-luokituksen 1. Kaksi teollisuuden radiografiakuvaujaa saivat säteilyannoksia kuvauksissa käytetystä Iridium –säteilylähteestä suojausäiliön lukitusmekanismin vian vuoksi. Vuosittaiset annosrajat eivät ylittyneet, mutta viallisen laitteen aiheuttaman



säteilyvaaratilanteen takia tapaus sai luokituksen 1 ja siitä ilmoitettiin IAEA:lle. (Rantanen 2005, 22)

### **6.3 Säteilylähteiden katoamiset ja varkaudet**

Radioaktiivisten aineiden varkauksista, salakuljetuksista sekä heitteillejätöstä on muodostunut 1990-luvulla jopa globaalinen uhkatekijä. Esimerkiksi USA:ssa ydinaineiden käyttöä sääntelevän viranomaisen, NRC:n (Nuclear Regulatory Commission) tiedostoissa oli tällöin kymmenen vuoden ajalta yli 2300 raporttia romutettavan metallin seasta löytyneistä radioaktiivisista säteilylähteistä. (Pukkila 2004, 339)

Vuonna 1987 Goiassa, Brasiliassa tapahtui ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus (INES 5), jossa sädehoidossa käytetty hylätty  $^{137}\text{Cs}$ -lähde joutui jätteiden keräilijölle, jotka rikkoivat lähteen suojakuoren. Cesiumpulveria levisi ympäristöön ja kontaminoi lähes 300 ihmistä. Seurauksena oli neljä kuollutta, kymmenien ihmisten sairaalahoito sekä kallis ympäristön puhdistusoperaatio. (Pukkila 2004, 339)

Viron Tammikussa kolme veljestä varastivat vuonna 1994  $^{137}\text{Cs}$  lähteen vartioimattomasta varastosta. Seurauksena yksi varkaista kuoli, muut kaksi sekä heidän omaisensa saivat säteilyvammoja säteilylähteen sijaittua perheen keittiössä kuukauden ajan. (Pukkila 2004, 340)

## 6.4 Kuljetukset

Maailmassa kuljetetaan vuosittain radioaktiivisia aineita muutama kymmenen miljoonaa lähetystä. Kuljetuksista vain pari prosenttia on ydinpolttoaineen ja ydinjätteiden kuljetuksia. Kuljetukset tapahtuvat autoilla, junilla, laivoilla ja lentokoneilla. Käytetyn ydinpolttoaineen ja ydinjätteiden siirrossa käytetään erityisvarusteltuja ajoneuvoja. Kuljetusten turvallisuus varmistetaan ensisijaisesti kuljetuspakkauksella, jolla tulee olla muun muassa riittävä törmäyskestävyys, lämmönsiirtokyky ja kriittisyysturvallisuus.

Tuoreen ydinpolttoaineen ja matala- ja keskiaktiivisen jätteen kuljetuksiin ei liity huomattavan ympäristöonnettomuuden mahdollisuutta. Tuore ydinpolttoaine on heikosti säteilevää veteen liukenematonta keraamista uraanioksidia, joka ei edes tulipalon tapahtuessa leviä helposti ympäristöön. Rikastetun uraanipolttoaineen kuljetuksissa on kuitenkin otettava huomioon kriittisyysvaara, jolta suojaudutaan esimerkiksi ylimääräisen kuljetussuojan avulla, sekä valitsemalla pakkaus niin, ettei onnettomuustilanteessakaan ketjureaktion syntyminen ole mahdollista. (Energiateollisuus ry 2006, 13) Matala- ja keskiaktiivisten jätteiden aineiden kuljetuksissa yhdessä kuljetuserässä olevien radioaktiivisten aineiden määrä on niin pieni, että esimerkiksi tulipalon seurauksena ympäristön saastuminen jäisi varsin paikalliseksi.

Käytetyn ydinpolttoaineen aktiivisuus on hyvin suuri. Sen kuljetuspakkaukset on mitoitettava kestäväksi suurella turvamarginaalilla ajateltavissa olevat kuljetusonnettomuudet. Jos kuljetusastia kuitenkin rikkoutuisi, paljastuneesta polttoaineesta aiheutuva, huomattavasti kohonneen ulkoisen säteilyn sektori ulottuisi muutaman sadan metrin päähän. Vuosia jäähtyneessä polttoaineessa radioaktiivisia aineita voisi vapautua ilmaan huomattavia määriä vain esimerkiksi tulipalon tai ydinketjureaktion aiheuttaman korkean lämpötilan vuoksi kuljetussäiliön rikkoontumisen lisäksi. (Sandberg 2004, 311-315)

Maailmalta ei tunneta yhtään tapausta, jossa kuljetettava radioaktiivinen aine olisi aiheuttanut kuoleman tai vakavan altistumisen säteilylle. Suurin säteilyannos aiheutuu pakkausten käsittelyn aikana ja ajomatkan pituudella tai kestolla on vain toissijainen merkitys. Kuljetuksissa on sattunut onnettomuuksia, mutta radioaktiiviset aineet eivät ole vaikuttaneet onnettomuuden syntyyn eivätkä pahentaneet sen seurauksia. (Tikkinen 2009, 18)

Ranskassa tapahtui vuonna 1984 radioaktiivisen materiaalin kuljetusonnettomuus merellä, kun Mont-Louis –laiva upposi Belgiassa kuljettaessaan ydinmateriaalia rikastutettavaksi Ranskasta Neuvostoliittoon. Kaikki kuljetussäiliöt saatiin nostettua pois merestä. Yksi säiliöistä oli rikkoutunut ja kahden säiliön tiiveys 30:sta oli pettänyt. Kuljetettavan uraaniheksafluoridin ( $UF_6$ ) radioaktiivisuus oli kuitenkin niin pieni, ettei sen vapautuminen onnettomuudessa olisi aiheuttanut huomattavaa ympäristöonnettomuutta. Vaikka onnettomuudella ei ollut huomattavaa säteily- ja ydinturvallisuusmerkitystä, siitä saatiin kokemusta myös käytetyn polttoaineen kuljetuksia ajatellen.

Suomessa kuljetetaan noin 20 000 radioaktiivista materiaalia sisältävää pakkausta vuosittain. Valtaosa pakkauksista viedään sairaaloihin ja pieni osa teollisuuden ja tutkimuksen käyttöön. Tavallisimmin radioaktiiviset aineet kuljetetaan lentokoneella, sillä suurin osa kuljetuksista sisältää vain pienen määrän radioaktiivista ainetta, kuten lähteen. Suomessa ei radioaktiivisia kuljetuksia tehdä juuri lainkaan rautateitse. Meriteitse kuljetetaan vähemmän kiireellisiä, raskaita tai suurikokoisia lähetyksiä.

Suomessa vakavin onnettomuus sattui 1988 Ilmajoella. Lentokoneen, jonka kyydissä oli sairaalaan tarkoitettuja radioaktiivisen aineen kolleja, maahansyöksy aiheutti kuuden ihmisen kuoleman. Kollit löydettiin vahingoittumattomina. (Tikkinen 2009, 17-19)

Suomessa ydinpolttoaineen ja ydinjätteiden kuljetustarve on erityisen vähäinen, koska toiminta on keskitetty vain kahdelle sijaintipaikalle, Eurajoen Olkiluotoon ja Loviisan Hästholmeniin. Olkiluotoon tuore polttoaine tuodaan useimmiten rahtilaivalla Ruotsista tai muualta Euroopasta. Loviisaan on tuotu tuoretta polttoainetta pääosin Venäjältä maantie- ja merikuljetuksina. Vuoteen 1996 asti Loviisasta vietiin käytettyä ydinpolttoainetta Venäjälle, kunnes ydinenergialakiin tehdyn muutoksen mukaan suomalaisten laitosten käytetty ydinpolttoaine on käsiteltävä, varastoitava ja sijoitettava pysyvällä tavalla Suomeen. (Sandberg 2004, 312)

## 7 NYKYISYYS

IAEA ylläpitää ajantasaista julkista listaa INES-tapahtumista osoitteessa <http://www-news.iaea.org/news>. Sivustolla esitetään kaikki INES-tapaukset jäsenmaissa viimeisen kuuden kuukauden ajalta, jotka ovat saaneet tapahtumamaassa vähintään luokan 2, tai tapahtuman raportointi muulle maailmalle on muutoin koettu tärkeäksi. Taulukossa 5 on lista INES-tapauksista ajalta syyskuu 2008 – syyskuu 2009. Tapauksia raportointiin 15 eri maasta ja niitä oli yhteensä 25. Korkein tapahtuma sai luokituksen INES 3 ja niitä oli yksi kappaletta. Tapaus oli radioaktiivisen lähteen aiheuttamasta säteilyannoksesta työntekijälle. Koska tapaus on luokiteltu 3:ksi, lähde on aiheuttanut taulukossa 1 esitettyjen kriteereiden mukaisesti välittömiä terveyshaittoja.

Taulukko 5. IAEA:lle raportoidut INES-tapaukset vuoden ajalta.

Lähetys pvm	Tapahtuman kuvaus	Tapahtuma pvm / Luokka	Toiminto tai paikka	Toiminnan laatu	Maa
16.10.2009	Mahdollinen säteilyaltistus ympäristön asukkaille	23.9.2009 2	Laramie River Station	Muu	USA
15.10.2009	Laiminlyönti fissiilin materiaalin vastuuvollisuudessa	6.10.2009 2	Cadarache	Muu	Ranska
28.9.2009	Cs-137 kontaminaatio ajoneuvossa	28.8.2009 2	-	Radioaktiivinen lähde	Armenia
23.9.2009	Säteilyannos työntekijälle	21.7.2009 2	Cardinal Health / Beltsville MD	Radioaktiivinen lähde	USA
7.9.2009	Radioaktiivisen lähteen katoaminen	31.8.2009 2	Birjand University	Tutkimus	Iran
10.8.2009	Kahden työntekijän lakisääteisten säteilyannosrajojen ylittyminen	3.8.2009 2	BEZNAU-2	Reaktori	Sveitsi
7.8.2009	Säteilyannos röntgenkuvajalle	26.5.2009 [N/A]	Sokeritehdas, Lahore	Radioaktiivinen lähde	Pakistan
4.8.2009	Teollisuuden säteilylähteen irtoaminen, leviäminen ja talteenotto	24.7.2009 1	Lima	Radioaktiivinen lähde	Peru
6.7.2009	Mahdollisen moderaattorimateriaalin johdatus polttoaineen väylälle	29.6.2009 2	Dungeness-B1 Unit A	Reaktori	Iso-Britannia
18.6.2009	Cs-137 kontaminaatio puupelleteissä	13.6.2009 [N/A]	Muu	Muu	Italia
18.5.2009	Henkilön kontaminaatio	16.5.2009 1	Radioisotope Centre POLATOM	Muu	Puola
14.5.2009	Tapahtuma säteilytystoiminnassa	7.5.2009 2	STERIGENICS - Fleurus	Säteilytys	Belgia
12.5.2009	Kontaminaation leviäminen tuuletuskanavasta	23.1.2009 2	Sellafield Ltd, Cumbria	Polttoaineen jälleenkäsittely	Iso-Britannia
5.5.2009	Sähkökatkoksen aiheuttama vika kuljetussäiliön neutroni-ilmaisimeen reaktorihallissa	4.5.2009 2	PAKS-4	Reaktori	Unkari
14.4.2009	Säteilyannos työntekijälle	2.3.2009 2	Perma-Fix, NW / Richland, WA	Radioaktiivinen jäte	USA
13.3.2009	Pieni säteilylähde löytyi romumetallin seasta	27.12.2008 0	Meghri	Radioaktiivinen lähde	Armenia
6.3.2009	Tulipalo reaktorirakennuksessa	5.3.2009 [N/A]	KASHIWAZA KI KARIWA-1	Reaktori	Japani
22.12.2008	Säteilyannos ulkopuoliselle	18.12.2008 2	Delek Refining, Ltd, Tyler, Texas	Radioaktiivinen lähde	USA
14.11.2008	Puutteellinen radioaktiivisen materiaalin hallinta	23.10.2008 2	Bunkyo-city, Tokyo	Muu	Japani

<b>7.11.2008</b>	Yritys myynyt ulkomaille kontaminoituneita hissinnappuloita (Coboltti-60)	7.10.2008 2	Metallivalmistaja	Muu	Ranska
<b>31.10.2008</b>	Säteilyannos työntekijälle	11.9.2008 2	S.H.I.Examination & Inspection, Ltd	Muu	Japani
<b>9.10.2008</b>	Säteilyannos röntgenkuvaajalle	29.9.2008 2	Metco	Radioaktiivinen lähde	USA
<b>3.10.2008</b>	Säteilyannos työntekijälle	1.8.2008 3	Tarragona	Radioaktiivinen lähde	Espanja
<b>19.9.2008</b>	Säteilyannos työntekijälle	28.8.2008 2	Covidien, Mallinckrodt Medical B.V., Petten	Muu	Hollanti
<b>9.9.2008</b>	Säteilyannos röntgenkuvaajalle	2.9.2008 2	Armore, Oklahoma	Radioaktiivinen lähde	USA

Suurin osa luokitelluista tapahtumista liittyy ihmisten saamiin säteilyannoksiin tai kontaminaation leviämiseen. Vain viidesosa raportoiduista tapahtumista koski ydinlaitoksia. Kuusi tapahtumista oli alle raportoimisrajan, eli alle luokan 2 tapahtumia.

## 8 TULEVAISUUS

Energian kulutuksen kasvu sekä ilmastonmuutoksen uhka tukevat ydinennergian käytön lisääntymistä tulevaisuudessa sekä uusien innovaatioiden kehittämisestä alalla. Polttoainekierrolle on jo nyt suunnitteilla kehittyneempiä tekniikoita paremman energiahyödyn saamiseksi uraanista, plutoniumista ja aktinideista sekä ydinjätteen määrän minimoimiseksi. Myös toiveita fuusiovoimalaitoksien onnistumisesta on olemassa, rakenteilla on jo ITER-tutkimuslaitos. Nälänhädän ja aliravitsemuksen kasvu, lisääntyvä syöpäriski, maanviljelyn taloudellisuus ja kestävä maan-, veden ja muiden luonnonvarojen käyttö kiinnittävät myös huomiota uusien ja tehokkaampien ydinteknologioiden kehittämiselle. (ElBaradei 2007)

Säteilyn käyttötavat siis kehittyvät ja muuttuvat jatkuvasti, joten INES-asteikkoakin on päivitettävä kattamaan uudet sovellusalueet. Tekniikoita kehitettäessä turvallisuuteen kiin-

nitetään valtavasti huomiota ja INES-asteikkoa käytetään apuna myös riskiennusteiden määrittelyssä todennäköisyysanalyysissä. On myös hyvin todennäköistä, että uusia maita liitetään INES-asteikon piiriin, sillä tällä hetkellä asteikko on virallisesti käytössä vain 61 maassa.

Suomessa käynnissä olevat ydinvoimalaitokset ovat saaneet luvan käyttöönsä pidennykselle, eivätkä näin ollen lähivuosina ole poistumassa. Suurimpia muutoksia on Olkiluoto 3 –reaktorin valmistuminen, ydinvoiman mahdollinen lisärakentaminen sekä ydinjätteen loppusijoituksen aloittaminen. Tämä tarkoittaa ydinturvallisuuden kannalta lähinnä radioaktiivisten kuljetusten lisääntymistä.

## 9 YHTEENVETO

Säteily ja radioaktiivisuus mielletään usein negatiivisiksi käsitteiksi niiden käytössä aiheutuneiden vaikutusten perusteella. Pahimmillaan onnettomuuksissa säteily on aiheuttanut suuria terveydellisiä ja ympäristöllisiä vaikutuksia. Vaikutukset voivat olla joko välittömiä tai myöhäisvaikutuksia. Esimerkiksi ihminen voi kuolla lähes välittömästi altistuttuaan riittävän suurelle määrälle säteilyä, tai ympäristö voi kontaminoitua laajalti nopeastikin esimerkiksi ydinvoimalaitoksella aiheutuneen suuronnettomuuden seurauksena. Pitkän aikavälin seuraukset voivat taas näkyä muun muassa lisääntyneinä syöpäkuolemina, elintarvikkeiden aktiivisuuden aiheuttamina käyttökieltoina tai taloudellisina ja sosiaalisina vaikutuksina.

Säteilyä käytetään kuitenkin myös sairauksien parantamiseen ja tutkimiseen, energian tuotantoon sekä hyödyksi muussakin teollisuudessa. INES-asteikon tarkoituksena on jakaa oikeaa tietoa mahdollisista tapahtumista ja onnettomuuksista säteilyn käytössä, jottei vää-

rinkäsityksiä, salailun tunnetta taikka vaikutusten vähättelyä tai yliarviointia pääsisi synty-  
mään. Asteikon jako onnettomuuksiin ja tapahtumiin auttaa paljon tulkintaa tapausten va-  
kavuudesta. Tapahtumissa säteily ei ole aiheuttanut kenellekään välittömiä hengenvaaralli-  
sia vaikutuksia.

Suomessa ei ole tapahtunut yhtään INES-luokiteltua onnettomuutta ja tapahtumissakin kor-  
keimmat luokitukset ovat ylittäneet luokkaan 2. Suomessa STUK ei ole vielä päivittänyt oh-  
jeistustaan vastaamaan IAEA:n uusinta versiota asteikon käyttöohjeista, mutta tämä tapah-  
tunee lähiaikoina.

Työssä on esitelty joitakin tapahtumia, joita ei ole virallisesti luokiteltu INES-asteikolla. Tä-  
mä johtuu siitä, että INES-asteikko on laajentunut alkuperäisestä käyttötarkoituksestaan  
koskemaan myös muita säteilyn käyttöön liittyviä tapahtumia, kuin ydinlaitosonnettomuu-  
ksia. Toinen syy on se, että ainoastaan onnettomuudeksi luokiteltavat ja merkittävimmät  
tapahtumat, jotka ovat tapahtuneet ennen 1990-lukua, on luokiteltu jälkikäteen.



## LÄHTEET

BBC News. 2006. Timeline: Nuclear plant accidents. [verkkojulkaisu] [viitattu 3.11.2009]  
Uutisartikkeli. Saatavissa: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/5165736.stm>

ElBaradei, Mohamed. 2007. Nuclear technology: Looking to the future. [verkkojulkaisu]  
lausunto. [Viitattu 18.11.2009] Saatavissa:  
<http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/2007/ebsp2007n015.html>

Energiateollisuus ry. 2006. Hyvä tietää uraanista. Helsinki. 27 s. [verkkojulkaisu] lehti.  
[viitattu 5.11.2009] Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/julkaisut/hyvatietaa-sarja/Hyvatietaauraanista.pdf>

Fortum Generation. Fortum Loviisan Voimalaitos 19 s. [verkkojulkaisu] esite. [viitattu  
9.11.2009] Saatavissa: [http://www.loviisa3.fi/filebank/106-voimalaitosesite\\_fin.pdf](http://www.loviisa3.fi/filebank/106-voimalaitosesite_fin.pdf)

Integrated Regional Information Networks, IRIN. 2005. NIGER: Residents of uranium  
mining town fear they're being exposed to radioactive poisoning. [verkkojulkaisu] Dakar.  
[viitattu 10.11.2009] Uutinen. Saatavissa:  
<http://www.irinnews.org/report.aspx?reportid=54130>

International Atomic Energy Association (IAEA). 2000. The Radiological Accident in Ya-  
nango. Vienna 41 s. ISBN 92-0-101500-3

International Atomic Energy Association (IAEA). 2007. 50 Decisive Years, the IAEA in time. 18 s. [verkkajulkaisu] Vienna [viitattu 10.11.2009] Saatavissa:  
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull482/pdfs/decades.pdf>

International Atomic Energy Association (IAEA). 2009. The International Nuclear and Radiological Event Scale, User's Manual, 2008 Edition. [verkkodokumentti] Vienna. [viitattu 28.10.2009] Käyttöopas. Saatavissa:  
[http://www.ensi.ch/fileadmin/deutsch/files/INES\\_manu01.pdf](http://www.ensi.ch/fileadmin/deutsch/files/INES_manu01.pdf)

Kainulainen, E. 2009. Ydinturvallisuus, neljännesvuosiraportti 4/2008. STUK-B 99. [verkkajulkaisu] Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). [viitattu 6.11.2009] Saatavissa:  
<http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b99.pdf>

Kajos, M. Virtanen, S. 2004. Ydinvoimalaonnettomuudet. 17 s. [verkkajulkaisu] Helsinki: Helsingin yliopiston fysiikan laitos. [viitattu 28.10.2009] Tutkielma. Saatavissa :  
[http://www.atm.helsinki.fi/~llaakso/ymp\\_ong/YDINVOIMALAONNETTOMUUDET.pdf](http://www.atm.helsinki.fi/~llaakso/ymp_ong/YDINVOIMALAONNETTOMUUDET.pdf)

Posiva Oy. 2008. Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuolto, yhteenveto vuoden 2008 toiminnasta. 38 s. [verkkodokumentti] Eurajoki. [Viitattu 12.11.2009] Saatavissa  
[http://www.posiva.fi/files/847/POSIVA\\_2008.pdf](http://www.posiva.fi/files/847/POSIVA_2008.pdf)

Pukkila, O. 2004. Säteilyn käyttö. 361 s. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). ISBN 951-712-498-8.

Pöllänen, R.(toim.). 2003. Säteilyn ympäristössä. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK) 395 s. ISBN 951-712-497-X

Rantanen, E. 2005. Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta, vuosiraportti 2004. STUK-B-STO57. 52 s. [verkkojulkaisu] Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). [viitattu 5.11] Saatavissa: <http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b-sto57.pdf>

Sandberg, J. (toim.). 2004. Säteily- ja ydinturvallisuus-kirjasarja, Osa 5 Ydinturvallisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK) 418 s. ISBN 951-712-500-3

Sert, G. 2006. The Recovery Radiation Sources abler a Shipwreck The Case of Mont-Louis Cargo and the Implications of the M.S.C. Carla. 6 s. [verkkodokumentti] Ranska: Institut de Protection et de Surete Nucleaire. [viitattu 27.10.2009] Saatavissa: <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC42/SciProg/gc42-scifor-8.pdf>

Säteilyturvakeskus. 2002. Ohje YVL 1.12 Ydinlaitostapahtumien kansainvälinen vakavuusluokitus. 13 s. Helsinki. ISBN 951-712-516-X.

Säteilyturvakeskus. 2003. Ohje YVL 6.8 Ydinpolttoaineen varastointi ja käsittely. 6 s. Helsinki. ISBN 951-712-783-9

Tikkinen, J. 2009. Radioaktiivisen kuljetuksessa turvallisuuden perusta on kunnon pakkaus. Alara 3/2009. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). 31 s.

Tossavainen, K. 2004. Ydinturvallisuus Suomi ja lähialueet, neljännesvuosiraportti 4/2003, STUK-B-YTO 229. 23 s. [verkkajulkaisu] Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). [viitattu 6.11.2009] Saatavissa: <http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b-yto229.pdf>

U.S.NRC. 2008. Dry Cask Storage of Spent Nuclear Fuel. 3 s. [verkkodokumentti] USA [viitattu 11.11.2009] Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/dry-cask-storage.pdf>

Webb, G. A. M. Anderson, R. W. and Gaffney, M. J. S. 2006. Classification of events with an off-site radiological impact at the Sellafield site between 1950 and 2000, using the International Nuclear Event Scale. [verkkodokumentti] J. Radiol. Prot. 26 33. [viitattu 27.10.2009] Saatavissa: IOP Electronic Journals

World Nuclear Association (WNA).2009. Processing of Used Nuclear Fuel. 13 s. [verkkajulkaisu][viitattu 9.11.2009] Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html>

YK. 2002. The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. 75 s. [verkkodokumentti] UNDP and UNICEF. [viitattu 4.11.2009] raportti. Saatavissa: [http://www.reliefweb.int/library/documents/2002/undp\\_rus\\_25jan.pdf](http://www.reliefweb.int/library/documents/2002/undp_rus_25jan.pdf)

Säteilyturvakeskuksen laatima taulukko INES-luokan määräytymisperusteelle. (STUK YVL 1.12)

INES-luokka	INES-luokan määräytymisperuste		
	Ympäristövaikutukset	Laitosalueen säteilytilanne	Turvallisuuden heikkeneminen
7 Erittäin vakava onnettomuus	Hyvin suuri radioaktiivisten aineiden päästö: päästö yli kymmeniä tuhansia TBq ( $I^{131}$ -ekv.), terveys- ja ympäristöhaittoja laajoilla alueilla		
6 Vakava onnettomuus	Merkittävä radioaktiivisten aineiden päästö: päästö tuhansista kymmeneen tuhansiin TBq ( $I^{131}$ -ekv.), suojeletoimenpiteiden käynnistäminen täydessä laajuudessa todennäköistä		
5 Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus	Rajallinen radioaktiivisten aineiden päästö: päästö sadoista tuhansiin TBq ( $I^{131}$ -ekv.), suojeletoimenpiteiden osittainen käynnistäminen todennäköistä	Ydinpolttoaineen tai säteilyn leviämistä rajoittavan esteen vakava vaurioituminen	
4 Laitos-onnettomuus	Vähäinen radioaktiivisten aineiden päästö: ympäristön eniten altistuneen asukkaan säteilyannos (ns. kriittisen ryhmän jäsenten keskimääräinen annos) kuitenkin muutamia mSv	Ydinpolttoaineen tai säteilyn leviämistä rajoittavan esteen huomattava vaurioituminen tai suurella todennäköisyydellä työntekijän kuolemaan johtava säteilyannos	
3 Vakava turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma	Pieni radioaktiivisten aineiden päästö: ympäristön eniten altistuneen asukkaan säteilyannos 0,1–1 mSv	Radioaktiivisten aineiden huomattavan suuri leviäminen laitoksella tai työntekijä saanut välittömiä terveyshaittoja aiheuttavan säteilyannoksen	Lähellä onnettomuutta oleva tilanne: turvallisuutta varmistavia tekijöitä ei ole jäljellä
2 Merkittävä turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma		Radioaktiivisten aineiden merkittävä leviäminen laitoksella tai työntekijä saanut annosrajan ylittävän säteilyannoksen	Merkittävä puute turvallisuuteen vaikuttavissa tekijöissä
1 Poikkeuksellinen turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma			Sallitusta poikkeava toiminta tai käyttötila
0 Poikkeuksellinen tapahtuma	Ei turvallisuusmerkitystä		