



# 6

## KOKEMUKSET ONNETTOMUUKSISTA JA POIKKEUKSELLISISTA TAPAHTUMISTA YDINLAITOKSILLA

Timo Karjunen, Seija Suksi, Kirsti Tossavainen

### SISÄLLYSLUETTELO

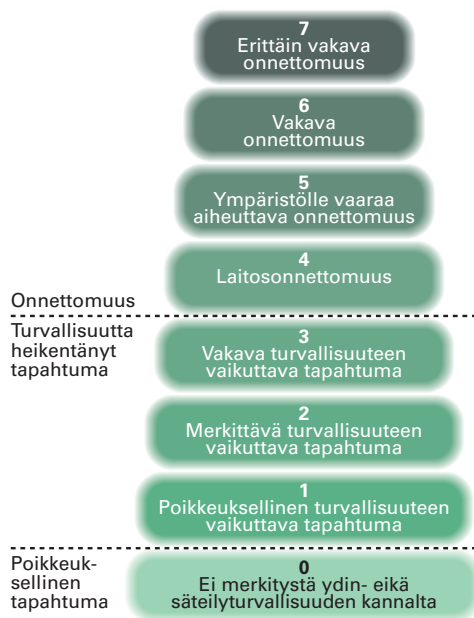
6.1	Kansainvälinen INES-asteikko .....	208
6.2	Tutkimus- ja sotilasreaktoreiden onnettomuudet .....	216
6.3	Vakavat ydinvoimalaitosonnettomuudet .....	219
6.4	Muut polttoainevaurioita aiheuttaneet tapahtumat .....	239
6.5	Turvallisuuteen vaikuttaneita tapahtumia .....	249
6.6	INES 2 -luokan tapahtumat Suomen ydinlaitoksilla .....	259

## 6.1 Kansainvälinen INES-asteikko

Ydinvoimalaitosten tapahtumista tiedottamiseen alettiin kiinnittää erityistä huomiota Tshernobylin onnettomuuden jälkeen. Ydinvoimalaitostapahtumien turvallisuusmerkityksen havainnollistamiseksi luotiin kansainvälinen ydinlaitostapahtumien vakavuusasteikko INES (International Nuclear Event Scale).

INES-asteikko kehitettiin Kansainvälinen atomienergiajärjestön IAEA:n ja Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n välisenä yhteistyönä. Asteikko muodostettiin ranskalaisen mallin pohjalta. Myös Japanissa oli käytössä vastaava asteikko. INES-asteikko otettiin koekäyttöön vuonna 1990. Ydinvoimalaitostapahtumien osalta asteikko hyväksyttiin viralliseen käyttöön 1992 ja muiden ydinlaitosten osalta 1994. Asteikkoa käyttää nykyisin 60 maata, joista 30:ssä on ydinvoimalaitoksia.

INES-asteikolla (kuva 6.1) on seitsemän luokkaa: luokat 1–7. Lisäksi käytössä on luokka 0 tapahtumille, joiden merkitys säteily- tai ydinturvallisuuden kannalta on niin vähäinen, että tapahtumaa ei voida sijoittaa asteikon alimmalle luokalle. INES-asteikolla luokitellaan ainoastaan tapahtumat, joilla on tai voi olla merkitystä säteily- tai ydinturvallisuuden kannalta.



**KUVA 6.1.** Ydinlaitostapahtumien kansainvälinen vakavuusasteikko eli INES-asteikko (International Nuclear Event Scale)

## Tiedonvaihto luokitelluista tapahtumista

IAEA pitää yllä tiedonvaihtoverkoston astein käyttöön osallistuvien maiden välillä. IAEA:lle ilmoitetaan INES-luokkaan 2 ja sitä ylempiin luokkiin kuuluvat tapahtumat. Tarkoituksena on, että INES-luokitus olisi IAEA:n käytettävissä vuorokauden kuluessa tapahtumasta. Myös alemmista luokista ilmoitetaan IAEA:lle, jos tapahtumat ovat herättäneet kansainvälistä mielenkiintoa. IAEA välittää saamansa tiedot astein käyttöön osallistuville maille. Tietoja tapahtumista on luettavissa NEWS-järjestelmästä (Nuclear events web-based system) IAEA:n verkkosivuilta osoitteesta <http://www-news.iaea.org/news>.

INES-luokka määritetään tapahtumamaassa. Vakavuusasteikkoa käyttävät maat ovat voineet järjestää tapahtumien luokituksen haluamallaan tavalla. Suomessa on käytäntönä, että voimayhtiö toimittaa Säteilyturvakeskukselle (STUK) INES-luokitusarvion ja STUK päättää luokasta. STUKin ohjeessa YVL 1.12 esitetään INES-luokan määrittämisen menettelytavat ja vastuut Suomessa sekä INES-luokan määrittämisen periaatteet.

## INES-luokituksen soveltamisalue

INES-asteikkoa voidaan käyttää ydinvoimalaitosten lisäksi myös muiden ydinlaitosten tapahtumien luokitteluun. Tällaisia ydinlaitoksia ovat esimerkiksi ydinjätevarastot, jälleenkäsittelylaitokset ja tutkimusreaktorit. Asteikkoa voidaan soveltaa myös ydinpolttoaine- ja ydinjätehuollossa tarvittavissa kuljetuksissa sattuneisiin tapahtumiin. Kaksi korkeinta luokkaa eivät kuitenkaan käytännössä voi tulla kyseeseen muiden kuin ydinvoimalaitosten tai käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelylaitosten kohdalla. Sotilaskäyttöön tarkoitettujen reaktoreiden tapahtumat eivät virallisesti kuulu INES-luokitusjärjestelmän piiriin.

Suomessa INES-luokituksen piiriin kuuluvat seuraavissa ydinlaitoksissa tai toiminnoissa sattuneet tapahtumat:

- ydinvoimalaitokset
- Otaniemen tutkimusreaktori
- tuoreen ja käytetyn ydinpolttoaineen käsittely, varastointi ja kuljetukset
- jätteiden käsittely-, varastointi- ja loppusijoituslaitokset.

INES-asteikolla voidaan luokitella myös muissa kuin ydinvoimalaitoksiin liittyvissä toiminnoissa sattuneita tapahtumia, joilla on merkitystä säteily-

turvallisuuden kannalta. Tällaisia tapahtumia voi sattua esimerkiksi käsiteltäessä radioaktiivisia aineita teollisuudessa tai tutkimustoiminnassa. Suomessa STUK päättää tapauskohtaisesti näiden tapahtumien INES-luokan määrittämisestä.

## INES-luokan määrittäminen

Tapahtuman tai onnettomuuden INES-luokka määräytyy turvallisuuden heikkenemisen tai ympäristön tai laitosalueen säteilyvaikutusten perusteella. Tätä havainnollistetaan taulukossa 6.1. Luokkaa määritettäessä tarkastellaan kaikkia tapahtuman tai onnettomuuden seurauksia erikseen. Jos luokka voidaan määrittää useamman kuin yhden seurausvai-

INES-luokan määrytysperuste			
INES-luokka	Ympäristövaikutukset	Laitosalueen säteilytilanne	Turvallisuuden heikkeneminen
7 Erittäin vakava onnettomuus	Hyvin suuri radioaktiivisten aineiden päästö: päästö yli kymmeniä tuhansia TBq ( $^{131}\text{I}$ -ekv.), terveys- ja ympäristöhaittoja laajoilla alueilla		
6 Vakava onnettomuus	Merkittävä radioaktiivisten aineiden päästö: päästö tuhansista kymmeniin tuhansiin TBq ( $^{131}\text{I}$ -ekv.), suojelutoimenpiteiden käynnistäminen täydessä laajuudessa todennäköistä		
5 Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus	Rajallinen radioaktiivisten aineiden päästö: päästö sadoista tuhansiin TBq ( $^{131}\text{I}$ -ekv.), suojelutoimenpiteiden osittainen käynnistäminen todennäköistä	Ydinpolttoaineen tai säteilyn leviämistä rajoittavan esteen vakava vaurioituminen	
4 Laitosonnettomuus	Vähäinen radioaktiivisten aineiden päästö: ympäristön eniten altistuneen asukkaana säteilyannos (ns. kriittisen ryhmän jäsenen 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 asukkaana 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		

TAULUKKO 6.1 INES-luokituksen pääperiaatteet

kutuksen perusteella ja luokituslähtökohdasta riippuen tuloksena on toistaan poikkeavat INES-luokat, luokaksi valitaan korkein.

Seuraavassa esitetään kuvaukset INES-asteikon luokista sekä esimerkkejä niihin kuuluvista tapahtumista. Mukana on eräitä ennen asteikon käyttöönottoa sattuneita tapahtumia, joille on jälkeensä määrätty INES-luokka. Suomen ydinvoimalaitoksilla ei ole sattunut yhtään luokkaan 3 tai sitä ylempään luokkaan sijoittuvaa tapahtumaa.

## INES 7 Erittäin vakava onnettomuus

Luokkaan INES 7 kuuluvat onnettomuudet, joissa merkittävä osa ydinvoimalaitoksen tai muun suuren ydinlaitoksen sisältämistä radioaktiivisista aineista vapautuu ympäristöön. Tyypillistä tällaiselle onnettomuudelle on, että sen aiheuttama erittäin suuri päästö sisältää sekä lyhyt- että pitkäikäisiä fissiotuotteita (jodi-131-ekvivalentteina<sup>1</sup> vähintään suuruusluokkaa kymmeniä tuhansia terabecquereljä<sup>2</sup>). Tällainen päästö saattaa aiheuttaa laajoilla alueilla, jopa useissa maissa, välittömiä terveyshaittoja, myöhemmin ilmeneviä terveyshaittoja sekä pitkäaikaisia ympäristövaikutuksia.

Luokkaan 7 kuuluvia onnettomuuksia on tapahtunut yksi. Tshernobylin ydinvoimalaitoksen reaktori Neuvostoliitossa (nykyisen Ukrainan alueella) tuhoutui räjähdysnomaisesti vuonna 1986. Reaktorin täydellinen rikkoutuminen aiheutti suuren radioaktiivisten aineiden päästön ja yli 30 laitoksen työntekijää kuoli onnettomuudessa saamiinsa vammoihin tai säteilyn varhaisvaikutuksiin. Ympäristövaikutusten perusteella onnettomuus kuuluu luokkaan 7. Yksityiskohtainen kuvaus onnettomuudesta esitetään kohdassa 6.3.

## INES 6 Vakava onnettomuus

Tähän luokkaan kuuluvissa onnettomuuksissa ympäristöön vapautuu suuri määrä radioaktiivisia aineita (jodi-131-ekvivalentteina suuruusluokkaa tuhansista kymmeneen tuhansiin terabecquerelihin). Tällainen päästö johtaa todennäköisesti suojelutoimenpiteiden käynnistämiseen täydessä laajuudessaan vakavien terveyshaittojen rajoittamiseksi.

<sup>1</sup> Jodi-131-ekvivalentilla tarkoitetaan jodi-isotooppien laskennallista painotettua summaa, jossa jodi-131:n painokerroin on 1 ja muiden isotooppien painokerroin määräytyy niiden suhteellisen haitallisuuden mukaan.

<sup>2</sup> 1 terabecquerel = 1 TBq = 10<sup>12</sup> Bq

Luokkaan 6 kuuluvia onnettomuuksia on tapahtunut yksi. Tsheljabinsk-65-nimellä tunnetulla jälleenkäsittelylaitoksella lähellä Kysh-tymyn kaupunkia Neuvostoliitossa (nykyisen Venäjän alueella) tapahtui vuonna 1957 runsasaktiivista nestemäistä jätettä sisältäneen säiliön räjähdys, joka johti radioaktiivisten aineiden päästöön. Terveyshaittoja rajoitettiin suojelutoimenpiteillä kuten evakuoimalla alueen väestöä. Ympäristövaikutusten perusteella onnettomuus kuuluu luokkaan 6.

## INES 5 Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus

INES 5 -luokan onnettomuuksissa ympäristöön vapautuu pienehkö osuus ydinvoimalaitoksen sisältämistä radioaktiivista aineista (jodi-131-ekvivalentteina suuruusluokkaa sadoista tuhansiin terabecquereleihin). Tällainen päästö johtaisi suojelutoimenpiteiden osittaiseen käynnistämiseen terveyshaittojen todennäköisyyden vähentämiseksi. Luokan 5 onnettomuus voi olla myös ydinlaitoksen vakava vaurioituminen ilman, että merkittäviä määriä radioaktiivisia aineita vapautuu ympäristöön. Kysymykseen voi tulla ydinvoimalaitoksen reaktorin laaja vaurio, suuri hallitsematon tehonnousu (kriittisysonnettomuus), tulipalo tai räjähdys, jonka seurauksena merkittävä määrä radioaktiivisia aineita leviää laitoksen tiloihin.

Luokkaan 5 on luokiteltu vuonna 1979 USA:ssa Three Mile Islandin ydinvoimalaitoksessa ja vuonna 1957 Windscalessa Isossa-Britanniassa sattuneet onnettomuudet. Three Mile Islandin onnettomuudessa menetettiin auki juuttuneesta varoventtiilistä niin paljon jäähdytysvettä, että reaktori kuivui, ylikuumeni ja suli osittain. Radioaktiivisia aineita levisi runsaasti laitoksen sisätiloihin, mutta päästöt ympäristöön olivat vähäiset. Laitoksen sisäisten vaikutusten perusteella onnettomuus kuuluu luokkaan 5. Windscalessa ydinaseplutoniumia tuottanut kaasujäähdytteinen grafiittireaktori syttyi palamaan. Tulipalon seurauksena radioaktiivisia aineita vapautui ympäristöön, minkä perusteella onnettomuus kuuluu luokkaan 5.

Tshekkoslovakiassa vuonna 1977 tapahtunutta A1-prototyyppireaktorin sydämen sulamisonnettomuutta ei ole virallisesti luokiteltu, mutta se saattaisi sydämen vaurioitumisen ja laitostilojen saastumisen perusteella kuulua luokkaan 5 tai mahdollisesti luokkaan 4.

Yksityiskohtaiset kuvaukset onnettomuuksista esitetään kohdassa 6.3.

## INES 4 Laitosonnettomuus

Luokkaan INES 4 kuuluvassa onnettomuudessa radioaktiivisten aineiden päästö ympäristöön aiheuttaa laitoksen ympäristössä asuvalle eniten altistuneelle henkilölle yli millisievertin suuruusluokkaa olevan säteilyannoksen. Tällainen päästö saattaa aiheuttaa tarvetta joihinkin laitoksen ulkopuolisiin suojelutoimenpiteisiin kuten paikalliseen elintarvikkeiden valvontaan. Luokan 4 onnettomuus voi olla myös merkittävä ydinlaitoksen vaurioituminen ilman, että merkittäviä määriä radioaktiivisia aineita vapautuu ympäristöön. Esimerkki tällaisesta onnettomuudesta on ydinvoimalaitoksen reaktorin osittainen sulaminen tai vastaava tapahtuma muilla ydinlaitoksilla. Onnettomuus saattaa aiheuttaa pitkäaikaisen keskeytyksen laitoksen käyttöön. Luokkaan 4 kuuluvat myös onnettomuudet, joissa yksi tai useampi laitoksen työntekijöistä saa säteilyannoksia, jotka todennäköisesti johtavat nopeasti kuolemaan.

INES-luokkaan 4 kuuluvien onnettomuuksien tarkkaa lukumäärää ei ole käytettävissä, koska kaikkia tapahtumia ei ole luokiteltu taannehtivasti. Ydinvoimalaitostapahtumista tähän luokkaan on luokiteltu Saint Laurentin kaasujäähdytteisellä ydinvoimalaitoksella Ranskassa vuonna 1980 tapahtunut onnettomuus, jossa reaktorirakenteista irronnut metallilevy tukki kahden polttoainepin jäähdytysvirtauksen. Tästä oli seurauksena vakavia polttoainevaurioita. Sen sijaan radioaktiivisten aineiden päästöjä ympäristöön ei tapahtunut. INES-luokka määräytyi onnettomuuden aiheuttamien laitoksen sisäisten vaikutusten perusteella.

Muilla ydinlaitoksilla sattuneista onnettomuuksista INES-luokkaan 4 on luokiteltu Windscalen jälleenkäsittelylaitoksella vuonna 1973, Tokaimuran ydinpolttoainetehtaalla vuonna 1999 ja argentiinalaisella tutkimusreaktorilla vuonna 1983 sattuneet onnettomuudet.

Isossa-Britanniassa sijaitsevalta Windscalen (nykyinen Sellafield) laitokselta vapautui vuonna 1973 radioaktiivisia aineita laitoksen tiloihin prosessisäiliössä tapahtuneen lämpöä tuottaneen kemiallisen reaktion seurauksena. Onnettomuus luokiteltiin luokkaan 4 laitoksen sisäisten vaikutusten perusteella.

Japanissa Tokaimuran ydinpolttoainetehtaalla vuonna 1999 sattuneen kriittisysonnettomuuden seurauksena kolme työntekijää altistui merkittävästi säteilylle. Kaksi työntekijöistä menehtyi myöhemmin. Tehtaan välittömässä läheisyydessä asuvat evakuoitiin ja kauempana asuvia keho-



tettiin pysymään sisätiloissa. Suurin tehtaan ulkopuolisen yksittäisen henkilön saama säteilyannos oli 16 mSv. Radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön eivät kuitenkaan olleet merkittävät. Onnettomuus luokiteltiin luokkaan 4 työntekijöiden saamien säteilyannosten ja ympäristön asukkaiden arvioitujen annosten perusteella.

Buenos Airesissa Argentiinassa tapahtui vuonna 1983 RA-2-tutkimusreaktorissa tehon äkillinen lyhytaikainen nousu (kriittisysonnettomuus). Syynä onnettomuuteen oli, ettei turvallisuusohjeita noudatettu tehtäessä reaktorisydämeen muutoksia. Onnettomuus aiheutti 3–4 metrin päässä työskennelleen ohjaajan kuoleman. Työntekijän kuolemaan johtaneen säteilyannoksen perusteella onnettomuus on sijoitettu luokkaan 4.

Tutkimusreaktoreilta on tiedossa myös ennen INES-luokituksen käyttöönottoa sattuneita onnettomuuksia, joissa on menehtynyt laitoksen henkilökuntaan kuuluvia ihmisiä (katso kohta 6.2) ja jotka siten voitaisiin luokitella INES luokkaan 4.

Lisäksi radioaktiivisten aineiden käsittelyssä on sattunut onnettomuuksia, joissa on menetetty ihmishenkiä ja jotka siten ovat luokkaa 4. Esimerkkinä on Egyptissä vuonna 2000 sattunut radioaktiivisen lähteen käsittelyyn liittynyt onnettomuus. Voimakkaasti säteilevä radioaktiivinen iridium-192-lähde oli joutunut väärin käsiin ja aiheutti kahden henkilön kuoleman ja viiden muun henkilön merkittävän altistumisen säteilylle.

### INES 3 Vakava turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma

INES 3 -luokan tapahtumissa radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön ylittävät viranomaisten hyväksymät päästörajat ja aiheuttavat laitoksen ympäristössä asuvalle eniten altistuvalla henkilöllä vajaan millisievertin säteilyannoksen. Laitoksen ulkopuolisia suojelutoimenpiteitä ei tarvita. Kysymyksessä voi olla myös tapahtuma, josta seuraa työntekijöille välittömiä terveyshaittoja aiheuttavia säteilyannoksia tai huomattava määrä radioaktiivisia aineita (aktiivisuus muutamia tuhansia terabecquerelejä) leviää laitoksen sisätiloihin siten, että ne voidaan ottaa talteen ja varastoida jätteenä. Tähän luokkaan luetaan myös tapahtumat, joissa yksittäinen turvallisuusjärjestelmän lisävika saattaisi johtaa onnettomuuteen tai tarvittavat turvallisuusjärjestelmät olisivat toimintakyvottomia estämään onnettomuuden häiriötilanteen seurauksena.

Esimerkkinä luokan 3 tapahtumista on Vandellosin ydinvoimalaitoksella Espanjassa vuonna 1989 ollut tulipalo. Tapahtumasta ei aiheutunut radioaktiivisten aineiden päästöjä eikä myöskään polttoainevaurioita tai laitoksen tilojen saastumista. Useat turvallisuutta varmentavat järjestelmät vioittuivat tulipalossa, minkä perusteella tapahtuma kuuluu luokkaan 3. Tapahtumaa kuvataan tarkemmin kohdassa 6.5.

## INES 2 Merkittävä turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma

Luokan 2 tapahtumassa on merkittävä puute turvallisuuteen vaikuttavissa tekijöissä, mutta turvallisuus on edelleen varmistettu mahdollisesta lisäviasta huolimatta. Tähän luokkaan kuuluvat myös tapahtumat, joissa työntekijän annosraja ylittyy tai radioaktiivisia aineita vapautuu merkittävästi laitoksen sisätiloissa alueille, joihin niiden ei ole suunniteltu pääsevän, ja saastuneet tilat vaativat puhdistuksen ennen uudelleen käyttöönottoa.

Suomen ydinvoimalaitoksilla on vuoteen 2002 mennessä ollut seitsemän luokkaan INES 2 sijoitettua tapahtumaa. Ne ovat tapahtuneet vuosina 1981–1993. Kahta lukuunottamatta tapahtumat ovat sattuneet ennen INES-asteikon käyttöönottoa, ja luokittelu on tehty jälkeinpäin. Suomen INES 2 -luokan tapahtumat on kuvattu kohdassa 6.6.

## INES 1 Poikkeuksellinen turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma

Luokan 1 tapahtuma merkitsee olennaisesti normaalista poikkeavaa toimintaa tai laitoksen käyttötilaa, joka voi olla seurausta laiteviasta, käyttövirheestä tai puutteellisista menettelytavoista. Luokkaan 1 kuuluu esimerkiksi ydinvoimalaitoksen primaaripiirin pienen putken katkeaminen edellyttäen, että kaikki vuodon varalle olevat turvallisuusjärjestelmät toimivat suunnitellusti. Luokkaan 1 voi kuulua myös jonkin turvallisuusjärjestelmän usean rinnakkaisen osan toimimattomuus, vaikka turvallisuusjärjestelmää ei kyseisessä tilanteessa tarvittaisikaan.

INES 1 -luokan tapahtumia on suhteellisen paljon ja ne raportoidaan yleensä vain kansallisesti. Kansainvälisesti raportoidaan vuosittain muutama yleisesti kiinnostava INES 1 -luokan tapahtuma. Esimerkiksi Suomen ydinvoimalaitoksilla on vuosina 1990–2002 sattunut yhteensä 35 luokkaan 1 kuuluvaa tapahtumaa.

## INES 0 Poikkeuksellinen tapahtuma

Tapahtuman turvallisuusmerkitys on niin vähäinen, että sitä ei voida sijoittaa varsinaiselle asteikolle. Luokkaan 0 kuuluu esimerkiksi reaktorin nopea pysäytys (pikasukku), jos kaikki laitoksen järjestelmät toimivat tilanteessa suunnitellulla tavalla.

### 6.2 | Tutkimus- ja sotilasreaktoreiden onnettomuudet

---

Useimmat vakavaan reaktorivaurioon johtaneet onnettomuudet ovat tapahtuneet muilla kuin sähköntuotantoon tarkoitetuilla reaktoreilla. Onnettomuuksia on tapahtunut tutkimusreaktoreilla sekä sotilaallisessa käytössä olevien ydinsukellusveneiden reaktoreilla ja ydinaseiden valmistukseen tarkoitettua plutoniumia tuottavalla reaktorilla. Ydinvoimalaitoksilla tapahtuneita onnettomuuksia käsitellään kohdassa 6.3.

#### Tutkimusreaktorit

Erilaisten reaktoreiden varhaisessa kokeilu- ja testausvaiheessa tapahtui useita onnettomuuksia, jotka aiheutuivat puutteista reaktoreiden turvajärjestelmien suunnittelussa.

Vakavin tällainen onnettomuus tapahtui Yhdysvalloissa vuonna 1961, kun tutkimuskäyttöön tarkoitettua SL-1-reaktoria huollettaessa yksi huoltomiehistä veti ilmeisesti vahingossa yhden reaktorin kolmesta säätösauvasta ulos sydäimestä. Tämän seurauksena reaktorin teho kasvoi nopeasti saaden aikaan paineiskun, joka repi irti osan reaktorin säätösauvayhteistä. Paineisku myös hajotti reaktorin sisäosat ja irrotti osan sen ulkopuolisesta instrumentoinnista ja eristeistä. Onnettomuudessa kuoli kaikkiaan kolme onnettomuuden aikana reaktorirakennuksessa työskennellyttä henkilöä. Onnettomuuden säteilyvaikutukset reaktorirakennuksen ulkopuolella jäivät vähäisiksi, koska päästöistä suurin osa pidättyi reaktorirakennukseen ja reaktorin pienen koon (3 MW) ja pitkän huoltoseisonkin takia onnettomuudessa vapautuneiden fissiotuotteiden määrä oli suhteellisen vähäinen.

SL-1-reaktorionnettomuuden lisäksi tiedossa on kaksi tapausta, joissa onnettomuus tutkimusreaktorissa on aiheuttanut vakavia henkilövahinkoja. Nämä tapahtuivat Boric Kidric -instituutissa Jugoslaviassa vuonna

1958 ja RA-2-reaktorilla Buenos Airesissa vuonna 1982. Jälkimmäinen onnettomuus tapahtui, kun reaktori tuli kriittiseksi muutostöiden aikana säätövirheen takia. Onnettomuudessa kuoli henkilö, joka oli tapahtumahetkellä noin neljän metrin päässä reaktorista. Onnettomuus luokiteltiin ydinlaitostapahtumien kansainvälisellä vakavuusasteikolla eli INES-asteikolla (katso kohta 6.1) luokkaan 4 työntekijän kuoleman aiheuttaneen säteilyannoksen perusteella.

Tutkimusreaktoreissa tapahtuneista onnettomuuksista ei ole aiheutunut päästöjä, jotka olisivat vaikuttaneet ympäristössä olleiden henkilöiden säteilyannoksiin. Yksittäisissä tapauksissa reaktorilla työskennellyt henkilöstö on altistunut säteilylle ja reaktorin kärsimät vahingot ovat olleet niin vakavia, että reaktorin jatkokäyttö on edellyttänyt hyvin mitattavia korjauksia tai käyttö on keskeytetty pysyvästi. Tällaisia onnettomuuksia on tapahtunut muun muassa vesijäähdytteisessä, luonnonuraania käyttäneessä NRX-reaktorissa Kanadassa vuonna 1952, koehyötöreaktorissa EBR 1:ssä Yhdysvalloissa 1955 ja Lucens Vadin kiehutusvesityyppisessä koereaktorissa Sveitsissä vuonna 1969. Lucens Vadissa reaktori, joka oli rakennettu kallion sisään, vaurioitui onnettomuudessa niin pahasti, että sen käyttö lopetettiin ja luola suljettiin pysyvästi.

## Windscaalen plutoniumintuottoreaktori

Ensimmäiset ydinreaktorit kehitettiin tuottamaan plutoniumia ydinräjäh-teisiin, joten ei ole yllättävää, että myös ensimmäinen laajoja ympäristövaikutuksia aiheuttanut reaktorionnettomuus tapahtui sotilaskäytössä olleessa laitoksessa.

Kyseinen onnettomuus tapahtui Windscalessa Englannissa vuonna 1957. Windscalessa oli onnettomuuden tapahtuessa käytössä kaksi grafiittihidasteista ja ilmajäähdytteistä reaktoria, joita käytettiin ydinaseissa tarvittavan plutoniumin tuottamiseen. Grafiitin eräs ominaispiirre on niin sanotun Wigner-energian muodostuminen, jolla tarkoitetaan neutronien liike-energian osittaista varastoitumista grafiittihilan hilavirheisiin alle 300 °C lämpötilassa. Mikäli energiaa on varastoitunut paljon, saattaa sen yhtäkkinen vapautuminen johtaa grafiitin lämpötilan suureen nousuun. Tämän välttämiseksi grafiittia lämmitetään tasaisin väliajoin siihen varastoituneen energian purkamiseksi hallitusti.

Tällainen Wigner-energian purkaminen oli käynnissä 7.10.1957 reaktorilla numero 1, kun ohjaajat totesivat, että grafiitin lämpötila on laskemassa, vaikka sen olisi pitänyt nousta. Grafiitin lämmitystä reaktorin avulla päätettiin lisätä, jolloin Wigner-energian vapautuminen nopeutui hallitsemattomasti, grafiitin lämpötila nousi liikaa ja grafiitti syttyi palamaan. Tämän seurauksena polttoaineen suojakuoret puhkesivat ja myös uraani syttyi palamaan. Onnettomuuden eteneminen saatiin pysäytettyä, kun reaktoriin pumpattiin vettä, joka sammutti tulipalon ja varmisti polttoaineen jäähtyksen.

Onnettomuuden syynä oli reaktorin instrumentoinnin puutteet. Wigner-ilmiotä ei tunnettu reaktorin rakentamisen aikaan. Tämän takia reaktoriin ei asennettu riittävästi lämpötilamittauksia niin, että jokaista kanavaa olisi voitu kunnolla valvoa. Myös operaattoreiden koulutus ja reaktorin käyttöä koskeva ohjeistus olivat puutteellisia.

Windscales reaktorissa ei ollut suojarakennusta, jonka vuoksi fissiotuotteiden päästöt olivat huomattavia. Onnettomuudessa on arvioitu ympäristöön vapautuneen 700 TBq  $^{131}\text{I}$ :tä, 40 TBq  $^{137}\text{Cs}$ :ää, 10 TBq  $^{106}\text{Ru}$ :ta ja 10 000 TBq  $^{133}\text{Xe}$ :a. Onnettomuuden seurauksena havaittiin radioaktiivista jodia laitoksen ympäristön tiloilta kerätyssä maidossa, ja maidon käyttöä rajoitettiin noin 100 km<sup>2</sup> alueella. Suojelutoimenpiteiden ansiosta onnettomuuden annosvaikutukset jäivät vähäisiksi.

## Sukellusvenereaktorit

Ydinkäyttöisiä sukellusveneitä on erilaisten onnettomuuksien seurauksena uponnut ainakin kuusi kappaletta. Viimeisin uponnut sukellusvene on Kursk, joka upposi aluksen keulaosassa sattuneiden torpedoräjähdyksen seurauksena Kuolan edustalle syksyllä 2000. Kursk on keulaosaa lukuun ottamatta nostettu ja siirretty Murmanskiin tutkimusten jälkeen romutettavaksi.

Meren pohjaan jääneistä ydinsukellusveneistä voi ajan kuluessa tulla radioaktiivisten aineiden päästöjä ympäristöön. Päästöjen vaikutukset jäävät kansainvälisten arvioiden mukaan kuitenkin erittäin vähäisiksi ja paikallisiksi.

Ydinsukellusveneiden uppoamiset eivät ilmeisesti ole johtuneet reaktori-onnettomuuksista vaan muista syistä kuten tulipaloista. Uppoamiset ovat aiheuttaneet satojen ihmisten kuoleman. Sukellusveneissä on lisäksi ta-

pahtunut useita reaktorionnettomuuksia, joissa kymmeniä ihmisiä on kuollut säteilyaltistuksen seurauksena.

Pääosa sukellusveneonnettomuuksista on tapahtunut avomerellä käytön aikana, mutta pahoja onnettomuuksia on sattunut myös huoltojen aikana. Eräs tällainen tapahtui 10.8.1985 sukellusveneellä Chazhma-lahden tukikohdassa lähellä Vladivostokia. Aluksen molemmat reaktorit oli ladattu ja piiri täytetty vedellä, kun toisen reaktorin kannen tiivisteessä havaittiin vuotoa. Piirin tiivistämistä päätettiin yrittää nostamalla ja laskemalla reaktorin kansi uudelleen paikoilleen sukellusveeneen vieressä olleen huoltoaluksen nosturilla. Ennen kuin kansi ja siihen kiinnitetyt säätösauvat nostettiin ylös, reaktori olisi tullut tyhjentää vedestä alikriittisyyden varmistamiseksi. Koska kantta oli tarkoitus vain raottaa, reaktoria ei kuitenkaan tyhjennetty vedestä.

Kun kantta oli nostettu muutamia senttimetrejä, heilauttivat ohi kulkeneen torpedoveeneen synnyttämät aallot huoltoalusta ja nosturia niin, että kansi nousi ylös ja veti samalla säätösauvat ulos reaktorista. Tämän seurauksena reaktori tuli kriittiseksi ja sen teho kasvoi räjähdysmäisesti. Syntynyt paineiskun heitti osan polttoaineesta ulos reaktorista ja rikkoi huoltokatoksen, jossa sukellusvene oli. Räjähdys surmasi kymmenen henkilöä. Lisäksi useat kymmenet saivat huomattavan suuria säteilyannoksia. Onnettomuudesta aiheutunut päästö kulkeutui tuulen mukana useiden kymmenien kilometrien päähän telakasta, mutta lähialuetta lukuun ottamatta ympäristövaikutukset jäivät vähäisiksi.

Sukellusveneiden lisäksi maailmassa on rakennettu runsaasti ydinkäyttöisiä pinta-aluksia. Pääosin ne ovat sota-aluksia, mutta lisäksi on rakennettu kahdeksan ydinkäyttöistä jäänmurtajaa ja neljä kokeellista kauppa-alusta. Ydinkäyttöisissä pinta-aluksissakin on ollut useita häiriötilanteita, mutta seuraukset eivät ole olleet yhtä vakavia kuin sukellusveneissä.

### 6.3 Vakavat ydinvoimalaitosonnettomuudet

Sähköntuotantoon rakennetuissa ydinvoimalaitoksissa on tapahtunut kolme onnettomuutta, joissa reaktori on vaurioitunut niin pahoin, että sitä ei ole voitu ottaa enää uudestaan käyttöön. Kaikissa näissä kolmessa tapauksessa suuri osa reaktorissa olleesta polttoaineesta on kokenut vakavia vaurioita, polttoaineen suojuoret ovat menettäneet tiiveytensä ja osa

polttoaineesta on sulanut.<sup>3</sup> Kaksi onnettomuudesta sattui kaupallises-  
sa tuotantokäytössä olleilla ydinvoimalaitoksilla: Three Mile Islandin  
laitoksella Harrisburgissa Yhdysvalloissa 28.3.1979 ja Tshernobylin  
laitoksella Ukrainassa silloisessa Neuvostoliitossa 26.5.1986. Kolmas  
onnettomuus tapahtui A-1-reaktorissa silloisessa Tshekkoslovakiassa  
vuonna 1977.

## A-1 (Tshekkoslovakia)

Tshekkoslovakiassa sijainnut A-1 oli neuvostoliittolaisten suunnittele-  
ma ja rakentama reaktori, jonka lämpöteho oli 560 MW. A-1 reaktori oli  
prototyyppi ja ainoa laatuaan maailmassa. Reaktoria ei ollut saatu toi-  
mimaan tuotantokäytössä, ennen kuin se vaurioitui onnettomuudessa.  
Reaktorissa käytettiin polttoaineena luonnonuraa, hidastimena ras-  
kasta vettä ja jäähdytteenä hiilidioksidia. Reaktorin ympärillä ei ollut  
kaasutiivistä suojarakennusta. Onnettomuus tapahtui 22.2.1977, kun  
reaktoriin oltiin lataamassa uutta polttoainennippua reaktorin tehon ol-  
lessa alennettu. Latauksen jälkeen operaattorit huomasivat nipun ulos-  
tulolämpötilan olevan poikkeuksellisen korkea, mutta olettivat sen joh-  
tuvan instrumenttiviasta ja aloittivat reaktorin tehonnoston. Poistaak-  
seen korkeasta ulostulolämpötilasta tulleen hälytyksen operaattorit kyt-  
tivät mittauksen pois päältä. Tehonnoston aikana nippu ylikuumeni ja  
osa polttoaineesta suli puhkaisten nippua suojanneen kotelon, joka  
erotti kaasujäähdytteen ja hidastimena toimineen raskaan veden. Kote-  
lon puhkeamisen seurauksena raskasta vettä virtasi nippuun, jolloin  
reaktorin teho hidastimen vähentyessä laski. Polttoaineen suojakuori-  
materiaali oli magnesiumin ja berylliumin seosta, joka syttyi palamaan  
joutuessaan veden kanssa kosketuksiin. Vaurioituneesta kanavasta vet-  
tä levisi myös muualle reaktoriin, minkä seurauksena myös muut poltto-  
aineniput ylikuumenivat. Onnettomuuden eteneminen päättyi, kun  
operaattorit pysyivät reaktorin, jolloin raskas vesi kykeni jäähdyttä-  
mään polttoaineen.

Onnettomuuden teknisenä syynä oli reaktoriin ladatun polttoainenipun  
osittainen tukkeutuminen. Polttoainennippua koottaessa oli nipun sisällä

---

<sup>3</sup> Ydinvoimalaitosonnettomuuksien kulku on pyritty jälkikäteen selvittämään mahdollisimman tar-  
koin käytettävissä olevien tietojen perusteella. Kaikkia ilmiöitä ja niiden syitä ei aina ole voitu selvit-  
tää täysin luotettavasti, ja eri lähteissä esitettyjen kuvausten yksityiskohdat vaihtelevat jonkin ver-  
ran. Tässä kirjassa on esitetty onnettomuuksien yksinkertaistettu kuvaus arvioimatta vaihtoehtoisia  
selityksiä.

varastoinnin aikana asetettu kosteuden poistoon käytetty silikageelipussi rikkoutunut. Pussista karanneita silikageelipalloja oli poistettu nipusta imuroimalla ja nippu oletettiin puhtaaksi ja koottiin valmiiksi latausta varten. Nippuun oli kuitenkin jäänyt silikageelipalloja, jotka reaktorissa estivät osin jäähdytekaasun virtauksen nipun läpi. Operaattorit olisivat voineet vielä pelastaa tilanteen pysäyttämällä reaktorin havaitessaan jäähdytteen lämpötilan kohoamisen, mutta sen sijaan he päättivät kytkeä mittauksen pois ja jatkaa reaktorin käyttöä.

Onnettomuuden seurauksena reaktori vaurioitui korjauskelvottomaksi. Polttoaineesta karanneet fissiotuotteet kontaminoivat primaaripiiriin, ja vuotaneen höyrystimen kautta aktiivisuutta kulkeutui myös sekundaaripiiriin. Osa polttoaineesta vapautuneista jalokaasuista pääsi ympäristöön. Päästöjen laatua ja suuruutta ei ole raportoitu, mutta onnettomuudesta ei aiheutunut pitkäaikaisia maaperän tai elintarvikkeiden käytön rajoituksia. Laitoksen henkilöstölle aiheutuneet säteilyannokset onnettomuudesta olivat vähäisiä.

Onnettomuuden seurauksena viisi laitoksella työskennellyttä siirrettiin toisiin tehtäviin ja seitsemän henkilön palkkaa alennettiin muutamien kuukausien ajaksi.

### Three Mile Island 2 (USA)

Länsimaiden ainoa vakava ydinvoimalaitosonnettomuus sattui 28.3.1979 Three Mile Islandin ydinvoimalaitoksella Harrisburgissa Pennsylvaniassa. Laitoksella oli kaksi painevesireaktoriyksikköä, joiden sähköteho oli noin 800 MW. Onnettomuus sai alkunsa kakkosyksikön (TMI-2) toimies- sa 97 prosentin teholla ja henkilökunnan tehdessä huoltotöitä pääsyöttö- vesijärjestelmässä. Töiden yhteydessä tehdyn virheen takia vettä höyrysti- miin pumpaava syöttövesijärjestelmä pysähtyi kokonaan. Koska apu- syöttövesijärjestelmän eräät venttiilit olivat virheellisesti kiinni, pysähtyi syöttöveden virtaus täysin. Syöttövesivirtauksen lakattua alkoi veden pin- ta höyrystimissä laskea ja samalla hidastui lämmönsiirto primaaripiiristä sekundaaripiiriin. Tämän seurauksena primaaripiiri alkoi lämmetä ja sen paine nousta. Primaaripiirissä olevan paineistimen pinta nousi ja paine kohosi, kunnes paineistimen ulospuhallusventtiili avautui. Venttiilin avautuessa primaaripiiristä alkoi purkautua suojarakennukseen vesihöy- ryä noin 800 kg minuutissa. Näin oli syntynyt vuoto, joka tuli aiheutta- maan primaaripiiriin osittaisen tyhjentyksen, reaktorin kuivumisen ja lopulta sulamisen.



Pääsyöttövesipumppujen pysähtyessä laitoksen automatiikka sulki turbiinille johtavien höyrylinjojen venttiilit ja pysäytti turbiinin. Primaari-piirin paineen noustessa vielä paineistimen ulospuhallusventtiilin avautumisen jälkeenkin laitoksen automatiikka pysäytti reaktorin ajamalla säätösauvat sisään. Ulospuhalluslinjan venttiilin ollessa auki reaktorin pysäyttäminen käänsi primaari-piirin paineen nopeaan laskuun: piirin paine laski 150 barista noin 100 bariin parissa minuutissa. Primaari-piirin paineen laskiessa olisi paineistimen ulospuhallusventtiilin tullut sulkeutua, mutta se juuttuikin auki.

Paineen laskiessa alle 113 barin laitoksen automatiikka käynnisti korkea-paineisen hätäjähdytysjärjestelmän, joka pystyy pumppaamaan primaari-piiriin vettä 3 800 litraa minuutissa. Järjestelmän käynnistyminen pysäytti primaari-piirin paineen laskun, kun piiriin tuli vettä likimain samaa tahtia kuin sieltä vuodon kautta poistui. Reaktorin kannalta tilanne oli turvallinen: vettä piirissä oli riittävästi ja jälkilämpöteho siirtyi veteen ilman, että polttoaineen lämpötila nousi merkittävästi.

Aika turbiinin pikasulusta	Tapahtuma
4 sekuntia	Paineistimen ulospuhallusventtiili avautuu primaari-piirin paineen nousun takia
8 sekuntia	Reaktorin automaattinen pikasuku kohonneen primaari-piirin paineen takia.
4 minuuttia	Reaktorin automaattinen pikasulku kohonneen primaari-piirin paineen takia
5 minuuttia	Paineenalennuslinjan vesitankin varoventtiili aukeaa ja primaari-piiriin vettä alkaa virrata suojarakennukseen
8 minuuttia	Operaattorit säätävät korkeapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän virtausta pienemmäksi
9 minuuttia	Paineenalennuslinjan vesitankin murtolevy rikkoontuu ja primaari-piiriin veden virtaus suojarakennukseen lisääntyy
73 minuuttia	Operaattorit avaavat varasyöttövesijärjestelmän virheellisesti kiinni olleet venttiilit palauttaen sekundaari-piiriin jäähdytyksen
100 minuuttia	Operaattorit pysäyttävät toisen kahdesta pääkiertopumpusta
138 minuuttia	Operaattorit pysäyttävät viimeisen käynnissä olleen pääkiertopumpun, jolloin vesi ja höyry erottuvat ja veden pinta primaari-piirissä asettuu likimain sydämen yläreunan tasolle
160 minuuttia	Paineistimen ulospuhalluslinjan eristysventtiili suljetaan ja vuoto primaari-piiristä loppuu
174 minuuttia	Suojarakennuksessa mitattujen annosnopeuksien havaitaan kasvaneen selvästi. Laitoksella julistetaan laitoshätätila
204 minuuttia	Operaattorit käynnistävät toisen pääkiertopumpusta ja reaktori peittyy vedellä. Laitoksella julistetaan yleishätätila
224 minuuttia	Osa (noin 20 tonnia) reaktorin keskelle muodostuneesta sulasta vajoaa painesäiliön pohjalle
10 tuntia	Reaktorin vaurioituessa vapautunut vety palaa suojarakennuksessa

**TAULUKKO 6.2** Tapahtumat Three Mile Islandin onnettomuuden aikana 28.3.1979 alkaen turbiinin pikasulusta kello 4.00

Operaattoreiden näkökulmasta tilanne ei kuitenkaan näyttänyt hyvältä. Laitoksen tila muuttui yhtäkkiä normaalista, rauhallisesta tehoajosta häiriöksi, jossa tapahtumat etenivät varsinkin alkuvaiheessa oli erittäin nopeasti: pääsyöttövesipumppujen pysähtymisestä vuodon syntyyn kului noin 15 sekuntia ja korkeapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän käynnistymiseen noin kaksi minuuttia. Tässä vaiheessa valvomoon oli tullut automaattisia hälytyksiä niin paljon, että häiriön kulun selvittäminen niiden perusteella oli mahdollista vasta kauan onnettomuuden jälkeen. Kun tilanne hieman rauhoittui hätäjähdytysjärjestelmän käynnistyttyä ja primariipiirin paineen tasaantuessa, operaattoreiden huomion kiinnitti seikka, joka näytti erityisen huolestuttavalta: paineistimen pinta nousi mittausalueensa ylärajalle. Mikäli paineistin täytyisi kokonaan vedellä, vaikeutuisi primariipiirin paineen hallinta merkittävästi. Paineen hallinta tehdään normaalisti paineistimen höyrytilavuuden avulla eli lauhduttamalla tai lämmittämällä höyryä.

Operaattorit reagoivat havaintoonsa saamansa koulutuksen mukaisesti: he vähensivät veden pumppausta primariipiiriin pysäyttämällä toisen hätäjähdytysjärjestelmän pumppuista ja kuristamalla virtausta toimimaan jääneessä hätäjähdytysjärjestelmän haarassa ja kasvattivat veden virtausta primariipiiristä puhdistusjärjestelmään. Näiden toimien johdosta piiriin syötettävän veden virtaus väheni noin 100 litraan minuutissa. Koska piiriin syötettiin nyt vettä huomattavasti vähemmän kuin sieltä virtasi pois vuodon kautta, alkoi veden määrä primariipiirissä vähetä.

Painevesireaktorin primariipiirissä on yleensä paineistimen yläosaa lukuun ottamatta pelkästään vettä, jolloin paineistimen pinta kuvaa tarkasti veden määrää primariipiirissä. Häiriön aikana piirin paine laski kuitenkin niin paljon, että vesi alkoi kiehua reaktorissa. Koska primariipiirin veden joukossa oli tällöin höyryä, ei paineistimen pinta kuvannutkaan enää veden määrää primariipiirissä, vaan veden ja siinä olevien höyrykuplien yhteistä tilavuutta. Höyryn määrän lisääntyessä paineistimen pinta nousi, vaikka veden määrä piirissä itse asiassa väheni jatkuvasti hätäjähdytysveden virtauksen vähentämisen jälkeen. Tässä vaiheessa paineistin ei enää toiminut piirin paineen säätäjänä, vaan yksinomaan astiana, jonka kautta reaktorissa syntynyt höyry kulkeutui ulos piiristä.

Paineistimen pinnan seuranta vei operaattoreiden huomion syrjään oikeista, jotka osoittivat paineistimesta suojarakennukseen johtavan linjan olevan auki. Ulospuhalluslinja päättyy suojarakennuksessa vesisäiliöön. Pienissä vuodoissa piiristä tuleva höyry lauhtuu vesisäiliöön, mutta suurissa vuodoissa, kuten nyt, säiliön vesi lämpenee kunnes alkaa kiehua, jolloin paine säiliössä kasvaa. Tällaisia tilanteita varten säiliössä on mur-

tolevy, jonka rikkoonnuttua primaaripiirin vesi ja höyry pääsevät purkautumaan suoraan suojarakennukseen. Valvomossa havaittiin 20 minuuttia häiriön alun jälkeen, että vesisäiliön paine on kohonnut 13 bariin. Noin 20 minuuttia tämän jälkeen apurakennuksessa oleva käyttömies ilmoitti valvomoon, että pumput, jotka pumpaavat vettä suojarakennuksen lattialta, ovat käynnistyneet automaattisesti. Valvomossa olevat operaattorit päättivät pysäyttää nämä pumput. Noin 20 minuuttia tästä suojarakennuksen ylipaine – joka tavallisesti on nolla – oli noussut 0,17 bariin ja lämpötila 55 °C:sta 83 °C:een. Oireet vuodosta suojarakennukseen olivat ilmeiset. Vuotoa osoittavat mittaukset jäivät operaattoreilta kuitenkin huomaamatta, sillä valvomon näyttölaitteen mukaan paineistimen venttiili oli kiinni. Valvomönäyttö, jonka operaattorit tulkitsivat tarkoittavan, että venttiili on kiinni, itse asiassa osoitti ainoastaan, että venttiili oli saanut sulkeutumiskäskyn paineen laskiessa. Näyttö ei siis kuvannut venttiilin asentoa, vaikka operaattorit niin olettivatkin.

Noin tunti häiriön alun jälkeen tilanne alkoi näyttää entistä huonommalta: primaaripiirin vedestä otettujen näytteiden mukaan piirissä oli liian vähän reaktiivisuuden hallintaan käytettävää booria ja reaktorin neutronivuoantureiden mukaan neutronivuo oli kasvamassa. Merkit viittasivat siihen, että reaktori oli tulossa uudelleen kriittiseksi, vaikka se oli jo kertaalleen pysäytetty ajamalla säätösauvat reaktorisydämeen. Operaattorit reagoivat tähän käynnistämällä hätäboorauksen eli pumpaamalla primaaripiiriin väkevää booriliuosta.

Primaaripiirin veden laimeneminen oli seurausta reaktorissa syntyneen höyryn lauhumisesta eri osiin primaaripiiriä. Reaktori toimi tällöin tislamaana, joka tuotti puhdasta vettä niihin osiin piiriä, erityisesti toiseen höyrystimestä, joissa reaktorissa syntynyt höyry tiivistyi takaisin vedeksi. Niin kauan kuin boorin pitoisuus itse reaktorissa kasvoi eikä toiseen höyrystimeen syntynyttä puhdasta vettä pumpattu suurella nopeudella reaktoriin, ei vaaraa reaktorin uudelleenkriittisyydestä ollut. Operaattorit eivät kuitenkaan tunnistanee laimenemisen syytä eivätkä puhtaan lauhteen pumpaamiseen liittynyttä vaaraa, vaan keskittyivät yrityksiin paineistimen pinnan hallitsemiseksi.

Samoihin aikoihin hätäboorauksen aloituksen kanssa alkoivat primaaripiirin pumput värähdellä ja ne pysäytettiin rikkoutumisen estämiseksi. Noin puolitoista tuntia häiriön alun jälkeen molemmat pääkiertopumput oli pysäytetty. Pääkiertopumput olivat tähän asti pitäneet yllä reaktorin jäähdytystä kierrättämällä veden ja höyryn seosta primaaripiirissä, mutta pumppujen pysähtyessä höyry ja vesi piirissä erottuivat ja puhtaan lauh-

teen muodostuminen nopeutui. Veden pinta reaktorissa asettui likimain polttoainesauvojen yläpään kohdalle.

Veden kiehuminen reaktorissa jatkui, joten pinta laski edelleen. Seuraavan puolentoista tunnin aikana kaksi kolmasosaa reaktorisydäimestä paljastui. Paljastunut sydän kuumeni jälkilämmön vaikutuksesta yli 1 000 °C lämpötilaan, ja polttoainesauvojen suojakuori alkoi hapettua voimakkaasti metallin ja vesihöyryn välisessä reaktiossa. Voimakkaan hapettumisen alettua polttoaineen lämpötila nousi nopeasti sulamislämpötilaan saakka ja reaktorin keskelle alkoi muodostua sula-allas.

Pääkiertopumppujen pysäytyksen jälkeen vesipinta laski myös paineistimessa, joten tilanne näytti valvomossa vähän aikaa hyvältä. Jo noin puoli tuntia myöhemmin saatiin kuitenkin ensimmäiset hälytykset suojarakennuksen aktiivisuustason noususta, joka merkitsi polttoaineaurioiden alkamista. Samoihin aikoihin vastikään valvomoon tullut viereisen laitoksen operaattori sulki yhden paineistimen ulospuhalluslinjan venttiileistä, joka lopulta katkaisi vuodon primaaripiiristä. Onnettomuuden eteneminen kuitenkin jatkui, koska suurin osa reaktorista oli edelleenkin vailla riittävää jäähdystystä.

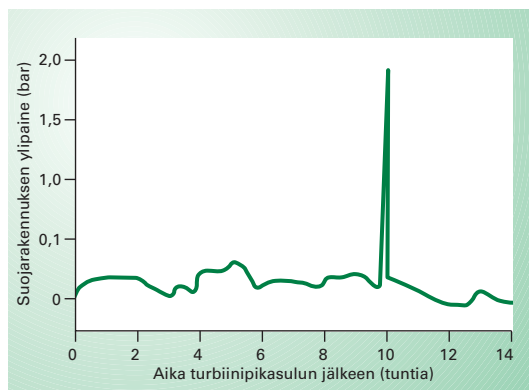
Noin kaksi ja puoli tuntia häiriön alun jälkeen – ja tunti pääkiertopumppujen pysäyttämisen jälkeen – merkit onnettomuudesta kävivät yhä ilmeisemmiksi. Primaaripiiristä otetun vesinäytteen aktiivisuus todettiin mittaamalla 350 kertaa normaalia suuremmaksi ja myös säteilyannosnopeuden näytteenottolinjan läheisyydessä havaittiin kasvaneen selvästi normaalia suuremmaksi. Tässä vaiheessa operaattorit tajusivat, että polttoaine oli vaurioitunut ja julistivat laitoshätätilan. Vajaata tuntia myöhemmin laitoshätätila muutettiin yleishätätilaksi.

Noin 15 minuuttia laitoshätätilan julistamisen jälkeen operaattorit päättivät käynnistää toisen pääkiertopumpuista veden saamiseksi reaktoriin. Pumpua käytettiin 19 minuutin ajan, mutta virtausta reaktoriin tapahtui vain 15 sekunnin ajan, jolloin reaktoriin saatiin noin 30 m<sup>3</sup> vettä. Pumpun virtauksen menetys johtui siitä, että vesi-höyry-seoksen tullessa pumpun imupuolelle se ei pystynyt toimimaan normaalisti vaan kavitoi. Veden pumppaaminen ylikuumentuneeseen sydämeen nosti piirin paineen taas korkeaksi, mutta piiri selvisi paineiskusta ilman uusia vaurioita.

Sydämen tulvittuminen vedellä ei kuitenkaan kokonaan pysäyttänyt onnettomuuden etenemistä, koska vesi pystyi jäähdyttämään vain osittain reaktorin keskellä olevan sula-altaan. Allas laajeni ja vajosi alaspäin,

kunnes polttoainenippuja ympäröivään reaktorisydämen tukirakenteeseen syöpyi noin tunti tulituksen jälkeen reikä, josta noin 20 tonnia sulaa vajosi reaktoripainesäiliön pohjalle. Painesäiliön pohja kuumentui, mutta sula jäähtyi ennen kuin säiliö ehti sulaa puhki. Reaktorin kannalta onnettomuuden eteneminen päättyi tähän.

Primaaripiirin vuoto nosti onnettomuuden aikana suojarakennuksen painetta ja lämpötilaa vain vähän eikä suojarakennuksen rakenteellinen eheys ollut itse vuodon takia uhattuna. Merkittävimmän vaaran aiheutti reaktorin vaurioituessa syntynyt vety, jota muodostuu kuumen metallin reagoitessa veden kanssa. Vetyä vapautui vuodon mukana suojarakennukseen arviolta 460 kg. Noin kymmenen tuntia onnettomuuden alun jälkeen suojarakennuksessa tapahtui vetypalo, joka nosti suojarakennuksen painetta ja lämpötilaa hetkellisesti (kuva 6.2). Automaatiikka käynnisti suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän, joka pumppasi suojarakennukseen vettä jäähdyttämään suojarakennusta tehokkaasti ja lauhduttaen palossa syntyneitä vesihöyryä. Ruiskutuksen ansiosta paine ja lämpötila laskivat nopeasti ja suojarakennus pysyi tiiviinä.



**KUVA 6.2 TMI-2:n suojarakennuksen paine onnettomuuden aikana**

Noin kymmenen tuntia onnettomuuden alusta havaittu lyhytaikainen painehiippu vastaa suojarakennuksessa tapahtunutta vetypaloa.

Onnettomuudesta aiheutuneet radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön johtuivat pääosin vuodoista apurakennuksessa olleista tankeista, jonne primaaripiirin puhdistusjärjestelmä siirsi primaaripiirin vettä koko onnettomuuden ajan. Tankeissa olleesta vedestä haihtui lähinnä jalokaasuja ja jodia, jotka kulkeutuivat ilmaston mukana ympäristöön. Päästöt koostuivat pääasiassa jalokaasuista, joita pääsi ympäristöön 70–370

PBq (2–10 miljoonaa Ci) eli noin neljä prosenttia jalokaasujen kokonaisaktiivisuudesta<sup>4</sup>. Jodipäästöjen suuruudeksi on arvioitu noin 550 GBq (15 Ci) eli 0,00003 prosenttia sydämen jodi-inventaarista. Päästöistä ei aiheutunut merkittävää kontaminoitumista, esimerkiksi alueen lehmien maidon aktiivisuuspitoisuudessa päästö aiheutti vain vähäistä nousua tavanomaiseen tasoon verrattuna. Onnettomuus on luokiteltu INES-asteikolla luokkaan 5.

TMI-2:n onnettomuudella ei ollut merkittäviä ympäristövaikutuksia, sillä reaktoripainesäiliö ja suojarakennus säilyivät ehjinä. Myöhemmin on yritetty myös arvioida, olisiko onnettomuus voinut kehittyä huomattavasti vakavammaksi. Jälkeenpäin arvioiden operaattorien toiminta oli joiltain osin sattumanvaraista eikä perustunut selvään kuvaan reaktorin tilasta.

Sydämen sulaminen saatiin hallintaan, kun operaattorit käynnistivät toisen pääkiertopumpun. Jos päätös pumpun käynnistämisestä olisi tehty selvästi myöhemmin, olisi vaarana ollut reaktoripainesäiliön puhkeaminen sen pohjan liiallisen kuumenemisen ja paineen aiheuttaman virumisen takia.

Operaattorit käynnistivät pumpun siinä pääkiertopiirin osassa, jonka höyrystin oli eristetty onnettomuuden aikana ja jossa oleva veden booripitoisuus ei ollut reaktoriveden kiehumisen seurauksena merkittävästi laimentunut. Mikäli pumppu olisi käynnistetty toisessa pääkiertopiirin haarassa, jonka höyrystimeen tislattua vettä oli kerääntynyt arvioiden mukaan 24 tonnia, olisi vaarana ollut reaktorin uudelleen kriittisyys. Pahimmillaan puhtaan veden pumppaaminen reaktoriin olisi saattanut aiheuttaa paineiskun, joka olisi aiheuttanut esimerkiksi primaariipiirin vaurioitumisen ja vaikeuttanut siten merkittävästi onnettomuuden hallintaa jatkossa.

## Toimenpiteet TMI-2-onnettomuuden jälkeen

Onnettomuuden jälkeen TMI-2-yksiköllä toteutettiin laaja puhdistusohjelma. Suojarakennuksesta poistettiin suuri määrä radioaktiivista vettä ja reaktoripainesäiliöstä purettiin noin sata tonnia polttoainetta ja rakenne- materiaaleja. Keski- ja matala-aktiiviset jätteet siirrettiin Hanfordiin ydintutkimusalueelle Richlandiin Washingtonin osavaltioon varastoita-

<sup>4</sup>1 petabecquerel = 1 PBq = 10<sup>15</sup> Bq = 1 000 TBq = 1 000 000 GBq

vaksi. Reaktorista poistettu korkea-aktiivinen polttoainejäte suljettiin kuljetus- ja varastointisäiliöihin (yli 300 kappaletta). Säiliöt kuljetettiin säilytettäväksi Idahan kansalliseen laboratorioon. Puhdistustyö kesti kaksitoista vuotta ja päättyi vuonna 1991. Puhdistuksen jälkeen reaktorin luoksepääsemättömiin osiin jäi pieniä määriä polttoainetta, noin yksi prosentti sydäimestä. Vuonna 1993 Yhdysvaltain turvallisuusviranomainen NRC hyväksyi TMI-2-yksikön siirtymisen puhdistuksen jälkeiseen valvotun säilytyksen tilaan.

Puhdistuksen aikana onnettomuusreaktorissa tehtiin runsaasti tutkimuksia, joissa selvitettiin polttoaineen, sydämen rakennemateriaalien ja reaktoripainesäiliön käyttäytymistä vakavassa reaktorionnettomuudessa.

Onnettomuusreaktorin vieressä sijaitseva TMI-1-yksikkö oli onnettomuuden aikana pysäytettynä polttoaineen vaihtoa varten, ja se pysyi suljettuna runsaat kuusi vuotta onnettomuuden jälkeen. Vuonna 1985 1-yksikkö käynnistettiin uudelleen, ja sen toiminta on ollut sen jälkeen Yhdysvaltain huipputasoa. 1-yksikön käyttöluva on voimassa vuoteen 2014. Molempien yksiköiden lopullinen käytöstäpoisto (purku) on tarkoitus toteuttaa 1-yksikön käyttöluvan päättymisen jälkeen.

Onnettomuuden aiheuttama ympäristön väestön keskimääräinen säteilyannos 16 kilometrin säteellä voimalaitoksesta oli 0,08 mSv ja suurin arvioitu yksilöannos alle 1 mSv, eli annosrajoja ei ylitetty. Pennsylvanian terveysturvallisuusviranomaiset seurasivat 32 000 lähialueen asukkaan terveydentilaa 18 vuoden ajan vuoteen 1997 ja asukkaiden terveydentilasta tehtiin useita riippumattomia tutkimuksia. Tutkimuksessa ei havaittu mitään merkkejä onnettomuuden aiheuttamista syöpätapauksista. Tilastollisesti arvioiden onnettomuus olisi voinut aiheuttaa enintään yhden syöpätapauksen. Ainut havaittava vaikutus oli psykologinen stressi onnettomuuden aikana ja vähän sen jälkeen. Onnettomuus johti myös useisiin pitkäaikaisiin oikeudenkäyn-teihin.

Onnettomuudella oli pitkällä aikavälillä merkittäviä vaikutuksia ydin-turvallisuusalan tutkimukseen, laitosten käyttötoimintaan ja turvallisuusvalvontaan. Onnettomuuden jälkeen käynnistettiin laajoja vakavien onnettomuuksien tutkimusohjelmia. Niiden perusteella varsinkin Euroopassa useisiin laitoksiin on asennettu vakavien onnettomuuksien hallintaan tarkoitettuja järjestelmiä. Toisaalta onnettomuus

osoitti, että alkujaan pienet häiriöt voivat niiden hallinnan pettäessä kehittyä vakaviksi onnettomuuksiksi. Tarve erilaisten häiriötilanteiden riskimerkityksen arviointiin lisäsi todennäköisyyspohjaisen turvallisuusanalyysin menetelmien kehitystä ja soveltamista ydinturvallisuusosalalla.

Onnettomuuden seurauksena alettiin myös kiinnittää aikaisempaa enemmän huomiota käyttöhenkilökunnan koulutukseen, inhimillisiin virheisiin, valvomon suunnitteluun ja operaattorien tukijärjestelmiin.

### Tshernobyli 4 (Neuvostoliitto, Ukraina)

Ukrainassa (silloisessa Neuvostoliitossa) noin sata kilometriä Kiovasta pohjoiseen sijaitsevassa Tshernobylin ydinvoimalaitoksessa oli neljä sähköteholtaan noin 1 000 MW:n laitosyksikköä, joissa käytettiin kanavatyypistä grafiittihidasteista RBMK-reaktoria (kuvat 6.3, 6.4). Laitoksen yksikköä 4 oltiin ajamassa huoltoseisokkiin 25.4.1986. Alasajon yhteydessä oli tarkoitus toteuttaa laitoksen käyttöönotto-ohjelmaan sisältynyt koe, joka oli aikanaan jäänyt tekemättä.

Kokeessa oli tarkoitus testata laitoksen käyttäytymistä tilanteessa, jossa yhteys ulkoiseen sähköverkkoon katkeaa ja höyryvirtaus turbiinille on katkaistu. Tavoitteena oli varmistaa, että päägeneraattori kykenee syöttämään sähkövirtaa pääkiertopumpuille ja hätäjäähdytysjärjestelmän pumpuille niin kauan (40–50 s), että varavoiomadieselit käynnistyvät. Koe oli tarkoitus tehdä 25 prosentin tehotasolla reaktorin lämpötehon ollessa 700 MW, kun yksi turbiini on käynnissä ja toinen pois käytöstä.

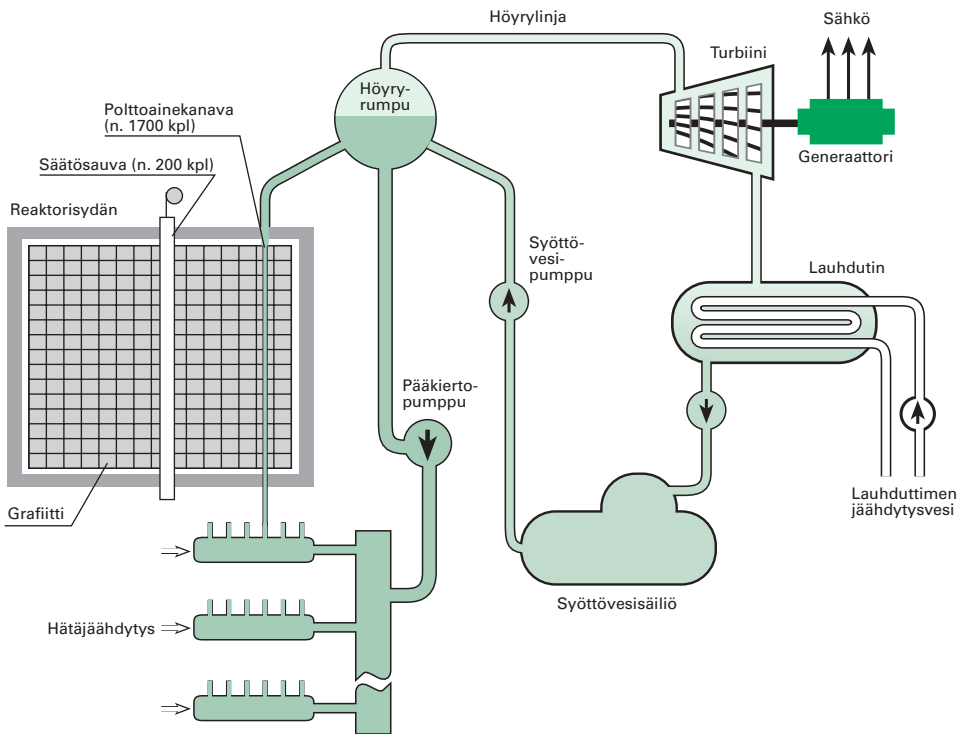
Tehon alentaminen aloitettiin 25.4. kello 1.00, mutta se jouduttiin keskeyttämään kello 13.00 noin 50 prosentin tasolle yhdeksäksi tunniksi Ukrainan alueen sähkön tarpeen kattamiseksi. Kun tehon laskua jatkettiin, putosi lämpöteho operaattorivirheen takia 30 MW:iin. Tehoa saatiin nostettua niin, että reaktorin lämpöteho oli 200 MW, jolle tasolle se saatiin stabiloitua ennen kokeen aloittamista 26.4. kello 1.23.

Tehon nostoa hankaloitti reaktorin ”myrkyttyminen” ksenonilla tehon laskun viivästymisen takia. Reaktorissa syntyy käytön aikana ksenonin isotooppia  $^{135}\text{Xe}$ , joka absorboi neutroneita. Tehoajolla neutronivuo on riittävä pitämään yllä uraanin fissioreaktiota ksenonin aiheuttamasta neutronien hävikistä huolimatta, mutta tehoa alennettaessa ksenonia hä-



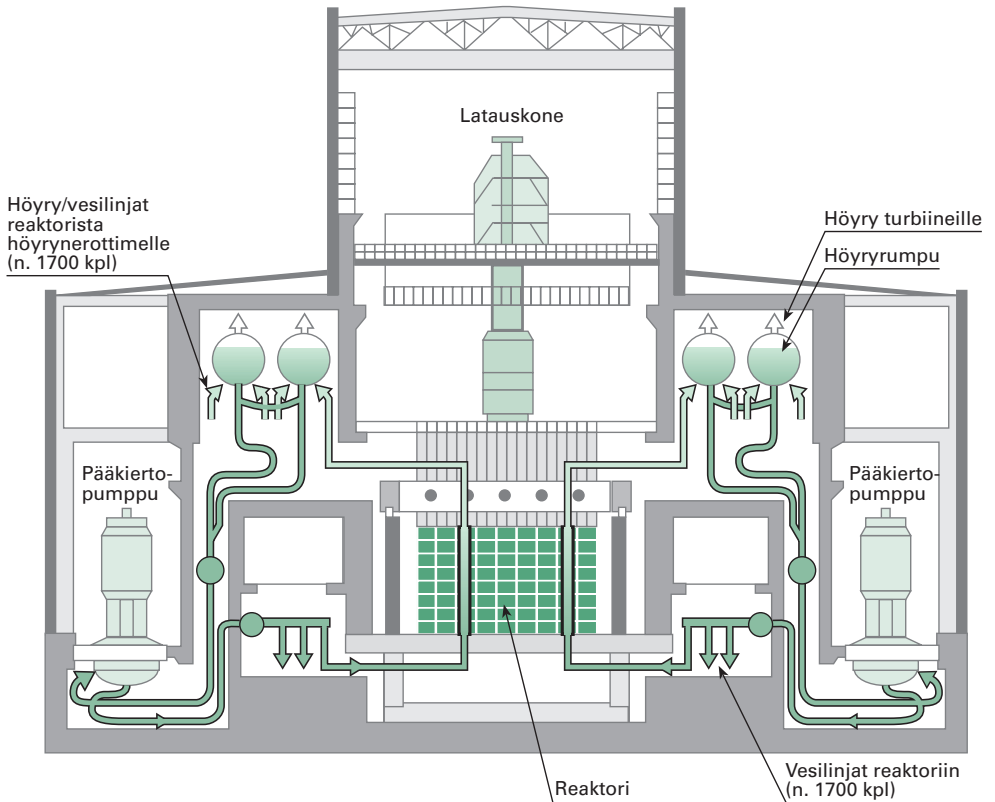
viää hitaammin kuin sitä syntyy, joten ksenonin määrä reaktorissa kasvaa. Mitä suuremmaksi määrä tulee, sitä suurempi osuus vapaista neutroneista kuluu ksenonin reaktioihin, joten uraanin fissioreaktion ylläpitäminen vaikeutuu (vertaa kohta 2.1).

Kokeen alkamisen viivästyminen vuoksi reaktorin tehoa nostettaessa jouduttiin ksenonin vaikutusta kompensoimaan vetämällä reaktorista ulos poikkeuksellisen suuri määrä säätösauvoja. Tästä huolimatta reaktorin tehoa ei saatu nostettua tasolle, jolla koe oli alun perin suunniteltu tehtävän. Kokeen toteuttamista päätettiin kuitenkin jatkaa.



**KUVA 6.3 RBMK-reaktorin periaatekaavio**

Reaktorin sydän koostuu virtauskanavista, joiden sisällä on polttoaineputket, ja niitä ympäröivistä neutronihidastimena toimivista grafiittilohkoista. Tshernobylin reaktorissa polttoainekanavia oli noin 1700. Reaktorin sydän on erittäin suurikokoinen, sen halkaisija on noin 12 m ja korkeus 7 m. Reaktorin jäähdytteenä on tavallinen vesi, joka virtaa polttoainekanavissa sydämen läpi ja höyrystyy osittain. Höyry-vesi-seos virtaa sydämen yläpuolella oleviin höyryrumpuihin, joissa höyry erotetaan vedestä. Höyry johdetaan turbiinille ja lauhduttimen kautta takaisin höyryrumpujen vesitilaan. Höyryrummuista vesi pumpataan takaisin reaktoriin. RBMK-reaktorin etuna on, että polttoainetta voidaan vaihtaa käytön aikana kanava kerrallaan. Laitos on kuitenkin reaktorifysikaalisesti hankala ja teknillisesti erittäin monimutkainen, koska siinä on kevytvesireaktoreihin verrattuna moninkertainen määrä primaaripiirin putkia, venttiileitä ja liitoksia.



KUVA 6.4 RBMK-laitoksen reaktorirakennuksen poikkileikkaus

Koe aloitettiin sulkemalla turbiinille johtavan höyrylinjan venttiili. Generaattorin alkaessa hidastua myös sen syöttämien pääkiertopumppujen kierrosluku alkoi laskea. Tämän seurauksena jäähdytteen virtaus reaktoriin laski 10–15 prosenttia noin 40 sekunnissa. Jäähdytysvirtauksen vähetessä kiehuminen reaktorissa lisääntyi ja jäähdytteen tiheys laski. RBMK-reaktoreissa reaktiivisuuden ja jäähdytteen tiheyden välinen takaisinkytkentä on positiivinen, joten jäähdytteen kiehumisen lisääntyessä reaktorin teho pyrki nousemaan. Reaktorin säätöjärjestelmä esti tämän ohjaamalla säätösauvoja sisään reaktoriin niin, että reaktorin teho ei noussut hallitsemattomasti. Jäähdytysvirtaus pysytteli riittävänä, joten koe eteni ennakkosuunnitelmien mukaisesti.

Kun aikaa höyrylinjan venttiilin sulkemisesta oli kulunut 36 sekuntia, laukaisivat laitoksen operaattorit reaktorin pikasulun käsioperaationa ilmeisesti tarkoituksena lopettaa koe, joka näytti sujuneen onnistuneesti. Sydämeen menevät säätösauvat eivät kuitenkaan alentaneet reaktorin tehoa, vaan reaktorin teho kasvoi nopeasti, jolloin höyryn määrä jäähdytteessä kas-

voi edelleen. Positiivisen takaisinkytkennän takia veden höyrystyminen nopeutti tehonnousua entisestään. Polttoaineen lämpötila nousi muutamassa sekunnissa niin korkeaksi, että polttoainesauvat vaurioituivat ja myös kanavat, joihin polttoainesauvoista koostuvat niput ladataan, puhkesivat paineistaen ympäröivän reaktoritankin. Paine tankin sisällä kasvoi niin suureksi, että tankin kantana ollut kolmen metrin paksuinen betonilaatta nousi ilmaan. Aikaa pikapysäytysnapin painalluksesta reaktoritankin kannen ylöslentoon kului noin yhdeksän sekuntia.

Laitoksella olleet henkilöt kuuluivat pikapysäytyksen jälkeen kaksi räjähdystä peräkkäin. Räjähdyksistä ensimmäinen aiheutui edellä kuvatuista tapahtumista. Jälkimmäisen räjähdysten syyksi on arvioitu jäähdytysveden ja polttoaineen suojakuorimateriaalin reagoitessa vapautuneen vedyn palamista, kun reaktoritankin kansi nousi paikoiltaan ja vety ja grafiitti pääsivät suoraan kosketuksiin ilman kanssa.

Räjähdyksen voimasta reaktorihallin katto repeytyi ja polttoaineen ja grafiitin palasia lensi ympäri laitosaluetta, muun muassa kolmosyksikön reaktorihallin ja kolmos- ja nelosyksiköiden yhteisen turbiinihallin katolle. Kattojen päällystykseen oli käytetty bitumia, jonka kuumat grafiitin palaset sytyttivät tuleen. Ensimmäisten reaktorin räjähdystä seuranneiden tuntien aikana huomattava osa laitospaikalla käytettävissä olleista voimavaroista suunnattiinkin – vaurioituneen reaktorin sammuttamisen ohella – turbiinihallin ja kolmosyksikön reaktorihallin palojen sammutukseen. Kokonaisuudessaan palot saatiin sammutettua – tuhoutunutta reaktoria lukuun ottamatta – noin kello 5 aamulla, jolloin kolmosyksikkö ajettiin alas. Sammutustöihin osallistuneet palomiehet ja käyttöhenkilökunta saivat huomattavan suurin säteilyannoksia; suurin osa onnettomuudessa menehtyneistä oli palomiehiä, jotka yrittivät sammuttaa vesiruiskuilla tuhoutunutta reaktoria.

Vaurioituneen reaktorin palo alkoi rajuna liekkien kohotessa aluksi useiden kymmenien metrien korkeuteen reaktorihallin yläpuolelle. Ensimmäisten kahden vuorokauden ajan tuhoutunutta reaktoria yritettiin sammuttaa ruiskuttamalla sen päälle vettä, mutta yritykset jäivät pääosin tuloksettomiksi.

Vesisammutuksen epäonnistuttua aloitettiin huhtikuun 27. päivän iltana reaktorin sammuttaminen hiekalla, jota pudotettiin reaktoriin helikoptereilla. Materiaalien pudotusta helikoptereista jatkettiin kuuden päivän ajan, jona aikana reaktoriin pudotettiin 2 600 tonnia hiekkaa, savea ja dolomiittia, 2 400 tonnia lyijyä ja 40 tonnia booria. Sammutta-

misessä onnistuttiin ainoastaan osittain, koska reaktoritankin kansi peitti osan reaktorista ja osa sammutusmateriaalista putosi reaktorihalliin. Vaikka reaktoriin pudotettu materiaali sammutti tai ainakin hillitsi grafiitin palamista, se samalla esti jälkilämmön siirtymisen vaurioituneesta polttoaineesta. Tämän seurauksena polttoaineen lämpötila pysytteli korkeana ja fissiotuotteiden päästöt jatkuivat aina toukokuun puolelle saakka.



**KUVA 6.5** Tshernobylin palavaa reaktoria sammutettiin pudottamalla sen päälle hiekkaa helikopterista. (Kuva: Suomen Kuvapalvelu Oy)

Reaktorin jäänteiden jäädyttämiseksi reaktorirakennukseen ruiskutettiin nestemäistä typpeä, joka imi haihtuessaan lämpöä rakennuksesta ja polttoaineesta ja syrjäytti samalla ilmaa, joten grafiitin palaminen vaikeutui. Typen ruiskuttamisella oli mahdollisesti polttoainetta jäädyttävä ja päästöjä vähentävä vaikutus. Ilmeisesti reaktoriin kohdistetut toimet eivät kuitenkaan vaikuttaneet ratkaisevasti päästöjen rajoittumiseen ja loppumiseen.

Päästöt alkoivat vähetä merkittävästi, kun polttoaineesta, grafiitista ja reaktorin muista rakennemateriaaleista koostuva sula syövytti ilmeisesti toukokuun 5. päivänä – 10 päivää onnettomuuden alkamisen jälkeen – tiensä läpi reaktoritankin pohjalaatan vajoten reaktorirakennuksen alempiin kerroksiin. Näissä tiloissa oli luultavasti sekä reaktoripiirin vettä että

sammutusvettä, joka jäähdytti reaktorijäänteet nopeasti. Onnettomuudessa suli polttoainetta hyvin suuri määrä, noin 135 tonnia, joten polttoaineen jäähtyminen tapahtui luultavasti useassa vaiheessa, jonka vuoksi päästöjenkin väheneminen tapahtui asteittain.

Tshernobylin onnettomuus johti useiden ydinturvallisuuden valvonnasta ja voimaloiden suunnittelusta vastanneiden virastojen vastuullisten johtajien erottamiseen tehtävistään. Laitoksen johtaja erotettiin kommunistisesta puolueesta ja hänet asetettiin syytteeseen yhdessä muiden laitoksella vastuullisessa asemassa toimineiden kanssa. Onnettomuuden jälkeen järjestetyssä oikeudenkäynnissä eräitä heistä tuomittiin vankeuteen.

Tshernobylin onnettomuudessa tuhoutuneen nelosreaktorin ympärille on rakennettu suoja, niin sanottu sarkofagi, jonka tarkoituksena on estää radioaktiivisten aineiden leviäminen. Onnettomuuden aiheuttamia radioaktiivisten aineiden päästöjä on esitetty taulukoissa 5.1 ja 7.2. Ympäristö- ja terveysvaikutuksia on käsitelty ”Säteily- ja ydinturvallisuus” kirjasarjan osissa 2 ja 4.

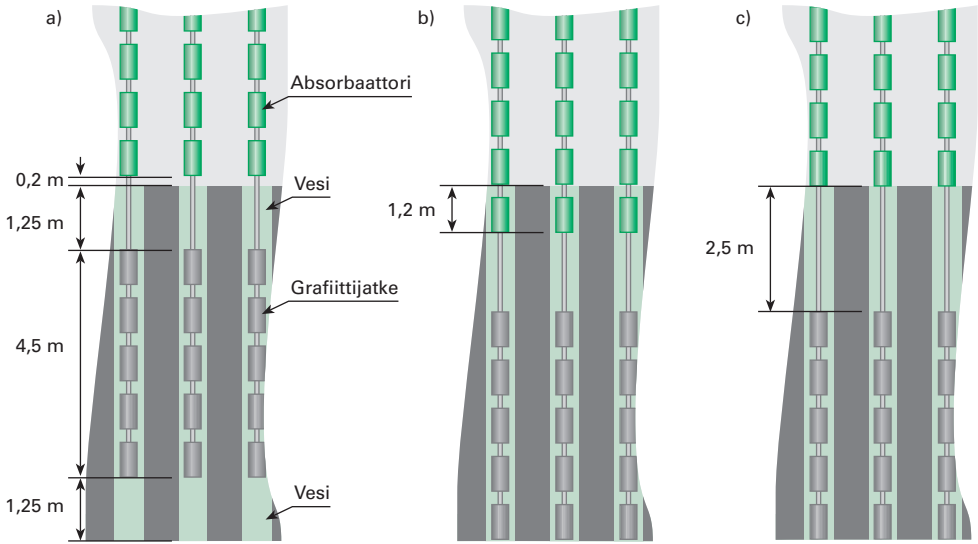
Tshernobylin kakkosyksikkö vaurioitui tulipalossa vuonna 1991 ja sen käyttö lopetettiin. Ykkösyksikkö suljettiin Ukrainan hallituksen päätöksellä vuonna 1996 ja viimeinenkin, kolmosyksikkö, kansainvälisen sopimuksen nojalla vuoden 2000 lopussa.

## **RBMK-laitosten turvallisuuden parantaminen**

Onnettomuuden syyt voidaan nykyisen yleisesti hyväksytyyn käsityksen mukaan kiteyttää seuraavaan kolmeen reaktorin suunnitteluun ja reaktorin tilaan onnettomuuden alkuhetkellä liittyneeseen piirteeseen:

- reaktorille ominainen positiivinen höyryn aukko-osuuden reaktiivisuuseroin
- pikasulkujärjestelmän toiminnasta aiheutunut reaktiivisuuden lisäys
- reaktoripiiriin käyttö toimintapisteessä, jossa reaktorin ominaisuudet olivat epäedulliset reaktiivisuusmuutosten hallinnan kannalta.

Onnettomuuden jälkeen tehtyjen selvitysten mukaan onnettomuuden yhtenä todennäköisenä syynä oli suunnitteluvirhe pikasulkujärjestelmässä. Reaktorin pysäyttämiseen käytettävät säätösauvat muodostuvat kahdesta osasta (kuva 6.6), varsinaisesta säätösauvasta eli absorbaattoriosasta ja sitä seuraavasta grafiittijatkkeesta. Säätösauvat liikkuvat reaktorisydämen läpi erillisissä kanavissa ja niitä jäähdytetään vedellä. Normaalikäytön



**KUVA 6.6 Kaavio RBMK-reaktorin säätösauvojen muutoksista**

a) Ennen Tshernobylin onnettomuutta täysin ulkona olevien sauvojen grafiittijatkeen alapää oli 1,25 metriä sydämen alareunan yläpuolella. Kun sauvat pikasulussa putosivat sydämeen, syrjäytti grafiittijatke vettä. Koska grafiitti on parempi hidastin ja absorboi neutroneja vähemmän kuin vesi, saattoi pikasulku aiheuttaa aluksi reaktiivisuuden kasvua.

b) Pian Tshernobylin onnettomuuden jälkeen määrättiin, että säätösauvat eivät saa olla täysin ulkona sydäimestä vaan niiden tulee olla vähintään 1,2 metriä sisällä sydämessä. Tällöin grafiittijatke ei pikasulun aikana syrjäytä vettä eikä edellä kuvattu hetkellistä reaktiivisuuden nousua voi esiintyä.

c) Myöhemmin säätösauvan absorbaattoriosan ja grafiittijatkeen välitankoa pidennettiin niin, että grafiittijatkeen alapää on reaktorisydämen alareunan tasolla sauvan ollessa täysin ulkona reaktorista. Tämän rakenteellisen muutoksen avulla varmistettiin, että pikasulku ei johda hetkelliseen reaktiivisuuden kasvuun.

aikana reaktorin pysäyttämiseen käytettävät säätösauvat ovat kokonaan ulkona reaktorisydäimestä, jolloin grafiittijatke on reaktorisydämessä. Alun perin grafiittijatke oli suunniteltu siten, että se ei ollut täysin reaktorin aktiivisydämen korkuinen. Kun säätösauvat oli vedetty kokonaan ulos reaktorisydäimestä grafiittijatkeen ylä- ja alapuolelle jäi sydänalueella 1,25 metrin korkuinen vesipatsas. Koska reaktorifysikaalisesti grafiitti on parempi neutronien hidastin kuin vesi, pikasulku aiheutti aluksi tehon nousun reaktorin alaosassa grafiitin korvattaessa veden.

RBMK-reaktorien käyttöön, lataustapaan ja säätösauvajärjestelmiin myöhemmin kohdistuneet muutokset on tehty näiden reaktiivisuuskäyttäytymiseen liittyvien epäedullisten ominaisuuksien parantamiseksi. Epäedullisia reaktiivisuusominaisuuksia ei voi kokonaan poistaa, koska

paineputkissa polttoainetta jäähdyttävä vesi toimii tässä reaktoriyypissä reaktorifysikaalisesti neutroniabsorbaattorina. Veden höyrystyminen reaktorin paineputkissa johtaa aina tehon nousuun. Ilmiötä voidaan reaktoriteknisin muutoksin ainoastaan lieventää.

Kaksi viikkoa onnettomuuden jälkeen antoi silloisen Neuvostoliiton valtionkomitea ensimmäiset uudet määräykset RBMK-reaktoreiden käytöstä. Näiden määräysten tarkoituksena oli estää reaktoreiden käyttö vaarallisissa käyttötiloissa. Määräysten mukaan reaktoreita sai käyttää vain peruskuormalla ja niihin sisältyi muun muassa kaiken koetoiminnan kielto käyvillä laitoksilla.

Seuraavien kuukausien aikana annettujen määräysten tarkoituksena oli muuttaa reaktiivisuuskertoimia edullisempaan suuntaan ja poistaa pikasulkujärjestelmän aikaansaama positiivinen reaktiivisuuden lisäys.

RBMK-reaktorien dynaamisia ominaisuuksia voidaan parantaa lisäämällä reaktorissa olevaa absorbaattorisauvojen määrää. Uusien määräysten mukaan reaktoreihin ladattiin 80 kappaletta pysyviä absorbaattorisauvoja. Operatiivisen reaktiivisuusrajan minimiarvoksi määrättiin vähintään 43 sauvaa. Operatiivisella reaktiivisuusrajalla tarkoitetaan täysin tai osittain reaktorissa sisällä olevien säätösauvojen yhteistä reaktiivisuusarvoa. Operatiivisella reaktiivisuusarvolla on suuri vaikutus säätösauvojen tehokkuuteen pikasulun aikana. Säätösauvojen sallituksi yläasennoksi muutettiin taso 1,2 metriä sydämen yläreunan alapuolella, koska säätösauvojen lähtiessä putoamaan sydämen yläreunan tasolta, säätösauvan grafiittijatkkeen alapuolella olevan veden poistuminen reaktorista pikasulun yhteydessä lisäsi reaktiivisuutta.

Pitemmän aikavälin toimenpiteenä alettiin reaktoriin ladata 2,4 prosentin rikastusastetta olevaa polttoainetta poistettavien, alemmaa rikastusastetta olevien polttoainenuppujen tilalle. Tällä toimenpiteellä vaikutettiin höyryn aukko-osuuden reaktiivisuuskertoimeen, joka pieneni sitä mukaa kun korkeamman rikastusasteen polttoainenuppuja ladattiin reaktoriin. Aivan viimeaikoina RBMK-reaktoreiden polttoaineeseen on lisätty palavaa myrkyä, erbiumia, joka entisestään parantaa reaktorin käyttäytymistä sekä normaaleissa käyttötilanteissa että onnettomuuksissa.

Operaattorin mahdollisuutta tarkistaa operatiivinen reaktiivisuusmarginaali parannettiin kehittämällä laskentamenetelmiä ja uusimalla laitos-tietokoneita. Myös uusia suojaussignaaleja otettiin käyttöön.

RBMK-reaktoreihin alunperin suunnitellun säätösauvajärjestelmän sauvojen sisäänmeno-aika reaktoriin pikasulussa oli 18 sekuntia. Pitkä sisäänmeno-aika johtuu osittain siitä, että sauvat joutuvat pudotessaan syrjäyttämään ohjausputkessa olevan veden. Järjestelmään tehtyjen muutosten jälkeen sisäänmeno-aika saatiin lyhenemään 12 sekuntiin. Pikasulkutoiminnan varmistamiseksi reaktoreihin on rakennettu uusi 24 sauvan pikasulkujärjestelmä, jonka sauvat pääsevät pikasulun aikana vapaasti putoamaan kaasun täyttämässä ohjausputkessa. Näitten sauvojen putoamis-aika reaktoriin on noin kolme sekuntia. Reaktorissa on myös osapitkiä säätösauvoja, joiden avulla pyritään hallitsemaan reaktorin pystysuuntaista tehojakautumaa. Näiden sauvojen lukumäärää lisättiin 22:sta 32:een.

Myöhemmin muutettiin myös säätösauvojen rakennetta siten, että niitä voidaan jälleen pitää täysin ulkona reaktorista ilman haitallista positiivista reaktiivisuusvaikutusta reaktoripikasulussa. Tämä toteutettiin lisäämällä säätösauvan grafiittijatkkeen ja absorbaattoriosan välisen osan pituutta, kuva 6.6.

Useimmat Tshernobylin onnettomuuden aikana käytössä olleet RBMK-reaktorit ovat edelleen tuotantokäytössä. Reaktoreihin on tehty ja ollaan tekemässä Tshernobylin onnettomuuden johdosta tehtyjen parannusten lisäksi muitakin muutoksia, joiden tarkoituksena on paitsi reaktoreiden ydinturvallisuuden parantaminen myös reaktoreiden käytön jatkaminen tulevana vuosina. Esimerkkinä käyttöä jatkamiseen tähtäävistä muutoksista mainittakoon Leningradin RBMK-laitoksen ykkösyksiköllä tehty polttoainekanavien uusiminen. Osaltaan RBMK-reaktoreiden perusparannusohjelmien käynnistymiseen ja sisältöön ovat vaikuttaneet Länsi-Euroopan maiden huoli entisen Neuvostoliiton alueelle jääneiden ydinreaktoreiden turvallisuudesta.

RBMK-reaktoreiden perusparannusohjelmien sisältö vaihtelee laitosyksikkökohtaisesti, koska RBMK-reaktoreita voidaan sanoa olevan kolme eri sukupolvea ja samaakin sukupolvea olevat reaktorilaitokset voivat olla keskenään erilaisia. Lisäksi RBMK-reaktorit jäivät Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen kolmen eri maan, Venäjän, Ukrainan ja Liettuan alueelle, tosin Ukrainan RBMK-laitokset on jo suljettu lopullisesti.

Ydinturvallisuuden kannalta merkittävät erot eri reaktorisukupolvien välillä ovat suurten putkistovuotojen varalle rakennetuissa turvallisuusjärjestelmissä. Ensimmäisen sukupolven RBMK-laitoksen hätäjäähdytysjärjestelmän suunnitteluperusteena on halkaisijaltaan 300 millimetrin



putken katkeaminen. Reaktoripiirissä on kuitenkin pääkiertopumpun jälkeiset painekollektorit, joiden halkaisija on 900 millimetriä. Toisen sukupolven laitosyksiköissä on hätäjähdytysjärjestelmät suunniteltu painekollektorin murtuman varalle. Esimerkiksi Leningradin RBMK-laitoksen ensimmäistä sukupolvea olevan ykkösyksikön hätäjähdytysjärjestelmiin tehtyjen parannuksien tarkoituksena on ollut 900 millimetrin putken murtumaa vastaavan vuototilanteen hallinta.

Turvallisuusarvioinneissa hyvin tärkeäksi havaitun reaktoritilan ylipainesuojauksen kapasiteettia on pyritty lisäämään. Alunperin tämän tilan ylipainesuojaus on suunniteltu vain yhden polttoainekanavan vauriotilanteeseen. Jos tilan paine kasvaa liian suureksi, on seurauksena reaktorin yläpuolella olevan massiivisen betonilaatan nouseminen paikaltaan, jolloin kaikki polttoainekanavat vaurioituvat samanaikaisesti kun säätösauvat nousevat kannen mukana pois reaktorista, skenaario, jonka seuraukset eivät paljontaan poikkeaisi Tshernobylin onnettomuudesta. Leningradin laitoksen ykkösyksiköllä on reaktoritilan ylipainesuojausta tehostettu siten, että ylipainesuojauksen on laskettu riittävän neljän polttoainekanavan yhtäaikaisessa vauriossa.

Yksi RBMK-reaktoreiden parannusten perusongelma on länsimaista vaatimustasoa vastaavan suojarakennuksen rakentamisen mahdottomuus. Toisen sukupolven reaktoreilla on tosin niin sanottu onnettomuuden lokalisointijärjestelmä, mikä on osan primaaripiiriä kattava lauhdutusallastyypinen suhteellisen kaasutiivis rakennelma. Onnettomuuden lokalisointijärjestelmä on suunniteltu 300 millimetrin putkivuodon varalle. Ensimmäisen sukupolven laitosyksiköt on suunniteltu varustettaviksi vastaavilla rakennuksilla. Sen sijaan reaktorin yläpuolella olevaa reaktorihallia ja höyryrumpujen huonetiloja voidaan tuskin ympäröidä rakennuksella, jonka suunnitteluvaatimukset vastaisivat länsimaisille suojarakennuksille asetettuja.

Koska suurien putkistovuotojen seurausten hallitseminen on havaittu ongelmaksi, on monilla RBMK-laitoksilla panostettu vuotojen estämispuoleen kehittämällä vuoto ennen murtumaa konseptia siihen liittyvine tarkastus- ja vuodonvalvontamenetelmineen.

Vuonna 1986 tapahtuneen Tshernobylin onnettomuuden jälkeen tehdyillä muutoksilla on huomattavasti parannettu RBMK-reaktoreiden turvallisuutta pienentämällä höyryn aukko-osuuden reaktiivisuuserrointa, poistamalla positiivista reaktiivisuutta aikaansaavan pikasulun mahdollisuus ja lisäämällä pikasulun nopeutta. On hyvin epätodennäköistä, että Tsher-

nobylin luokkaa oleva reaktiivisuusonnettomuus voisi tapahtua näiden muutosten jälkeen. Huolimatta näistä ja reaktoreihin tehdyistä muista parannuksista RBMK-reaktoreiden perusrakenne on kuitenkin sellainen, että vakaviin ympäristövaikutuksiin johtavan onnettomuuden mahdollisuutta ei voi kokonaan sulkea pois.

## 6.4 Muut polttoainevaurioita aiheuttaneet tapahtumat

Edellä kuvattujen laajoihin sydänvaurioihin johtaneiden onnettomuuksien lisäksi ydinvoimalaitoksilta on raportoitu yhdeksän tapahtumaa, joissa pieniä määriä polttoainetta on sulanut tai vaurioitunut vakavasti. Koska vauriot ovat keskittyneet ainoastaan osaan reaktoria, tavallisesti yhteen tai muutamaaan polttoaineenippuun, on laitos voitu ottaa uudelleen käyttöön, kun vaurioitunut polttoaine ja piirissä olleet radioaktiiviset aineet on siirretty muualle. Osa laitoksista on sittemmin suljettu muista syistä. Tähän luokkaan kuuluvat onnettomuudet ydinvoimalaitoksilla on esitetty taulukossa 6.3.

Reaktori	Teho (MW) sähkö (e) tai lämpö (t)	Tyyppi jäähdyte/hidastin	Vuosi	Maa	INES
Enrico Fermi 1	200 (t)	Natrium / boorikarbidi	1966	USA	
Chapelcross 2	50 (e)	Kaasu / grafiitti	1967	Englanti	
Saint Laurent 1	500 (e)	Kaasu / grafiitti	1969	Ranska	
Sosnovyi Bor 1	1 000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1975	Neuvostoliitto	
Beloyarsk 2	1 000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1975	Neuvostoliitto	
Saint Laurent 2	515 (e)	Kaasu / grafiitti	1980	Ranska	4
Tshernobyl 1	1 000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1982	Neuvostoliitto	
Sosnovyi Bor 3	1 000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1992	Venäjä	2
Paks 2 <sup>1</sup>	440 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	2003	Unkari	3

<sup>1</sup> Reaktorista poistetun polttoaineen puhdistuksessa tapahtunut onnettomuus.

**TAULUKKO 6.3** Ydinvoimalaitoksissa tapahtuneita polttoainevaurioita

### Enrico Fermi 1 (USA)

Ainoa hyötöreaktoreissa tapahtunut onnettomuus, jossa polttoainetta on vaurioitunut, tapahtui Enrico Fermi -reaktorissa Yhdysvalloissa 5.10.1966. Reaktorin lämpöteho oli 200 MW. Onnettomuus tapahtui, kun jäähdytteen virtaus kahteen polttoainekanavaan väheni olennaisesti piirissä kulkeutuneen pellinkappaleen tukkiessa osittain kanavien sisäänmenon. Jäähdytteen kierron heikentyessä kanavissa ollut polttoaine ylikuumeni ja suli osittain. Jäähdytys kuitenkin palautui riittäväksi, kun valvomoon saatiin hälytys aktiivisuustason noususta reaktorirakennuksen ilmastointikanavassa ja

reaktori pysäytettiin. Onnettomuudessa vapautuneet radioaktiiviset aineet pidättyivät pääosin piiriin lukuun ottamatta jalokaasuja, joita karkasi piiriin tiivisteissä olleen vuodon kautta reaktorirakennukseen. Päästöt laitoksesta ympäristöön jäivät asetettujen rajojen alapuolelle. Laitos puhdistettiin ja sen käyttö aloitettiin uudelleen kesäkuussa 1970. Pian tämän jälkeen hyötöreaktoreiden kehittelystä Yhdysvalloissa kuitenkin luovuttiin ja laitos suljettiin lopullisesti vuonna 1971.

### **Chapelcross 2 (Englanti)**

Chapelcross on yksi Englannin vanhimmista laitoksista, jossa on neljä pientä, 50 MW(e) kaasujäähdytteistä, grafiittihidasteista reaktoria. Reaktorit otettiin käyttöön 1959–1960. Yhtä reaktoreista oltiin käynnistämässä seisokin jälkeen 11.5.1967, kun primaaripiiriin aktiivisuusmittauksista saatiin hälytyksiä. Niiden syyksi epäiltiin tulipaloa yhdessä kanavassa. Grafiitin tai polttoaine-elementtien lämpötilamittauksissa ei kuitenkaan havaittu mitään epänormaalia. Pysäytyksen jälkeen tehtyjen mittausten perusteella voitiin vaurio reaktorissa paikantaa yhteen kanavaan, joka oli ylösajon aikana ylikuumentunut. Kanavaan oli seisokissa ladattu uudentyyppistä polttoainetta, jonka lämpötila käytön aikana oli korkeampi kuin tavanomaisella polttoaineella. Kanavan pohjalta löydettiin kaksi grafiitin palasta, jotka olivat osin tukkineet jäähdytyskierron. Ylikuumentumisen arvioidaan aiheutuneen mahdollisesti näiden kahden tekijän yhteisvaikutuksesta. Polttoainevauriossa vapautuneet radioaktiiviset aineet pidättyivät kokonaisuudessaan piiriin, joka puhdistettiin seuraavan kahden vuoden aikana. Laitosyksikön käyttö aloitettiin uudelleen toukokuussa 1969, ja se oli edelleen käytössä vuonna 2003.

### **Saint Laurent 1 ja 2 (Ranska)**

Saint Laurentin laitoksella oli kaksi noin 500 MW(e) tehoista reaktoria, joissa käytettiin jäähdytteenä hiilidioksidikaasua, hidastimena grafiittia ja polttoaineena luonnonuraa. Molemmissa reaktoreissa oli noin 3 000 grafiittikanavasta, joiden sisään polttoainesauvoista koostuvat elementit ladattiin päällekkäin niin, että kussakin kanavassa oli 15 noin kymmenen kilon painoista polttoaine-elementtiä. Lataus voitiin tehdä reaktorin käytössä. Reaktorit oli otettu käyttöön vuosina 1969 ja 1971.

Onnettomuuksista ensimmäinen tapahtui 19.10.1969, kun 1-yksikön reaktorilla tehtiin lataustoimia. Erään kanavan latauksen jälkeen piirissä olevat

aktiivisuusmittarit hälyttivät aktiivisuustason noususta ja automaatiojärjestelmä pysäytti reaktorin. Pysäytyksen jälkeen aktiivisuustason nousu taittui, tosin viiveellä, joten pysäytys riitti estämään onnettomuuden etenemisen.

Onnettomuuden jälkeen tehdyissä selvityksissä paljastui, että viimeksi ladattuun kanavaan oli sijoitettu viiden polttoaine-elementin sijasta neljä grafiittista elementtiä, joita käytetään neutronivuon tasoitukseen reaktorissa, ja yksi grafiittinen, jäähdytysvirtauksen rajoittamiseen käytetty elementti, jota tavallisesti käytetään hidastinkanavissa. Latauskone oli ohjelmoitu tekemään lataus väärin eikä virhettä ollut huomattu tarkastuksessa. Latauskoneen automatiikka keskeytti latauksen havaitessaan grafiittielementtejä ladattavan väärään kanavaan, mutta operaattori jatkoi latausta siirtäen latauskoneen käsiohjaukseen.

Väärän latauksen seurauksena jäähdtevirtaus kanavassa väheni niin, että grafiittielementtien alapuolella samassa kanavassa olleista polttoaine-elementeistä viisi ehti ylikuumentua ja sulaa ennen kuin reaktori pysäytettiin. Reaktorissa olleesta 450 tonnista polttoainetta vaurioitui onnettomuudessa noin 50 kg. Vaurioituneesta polttoaineesta vapautuneet fissiotuotteet pysyivät piirissä, joka puhdistettiin ja reaktorin käyttö voitiin aloittaa vuoden kuluttua uudelleen. Puhdistamista helpotti se, että vaurioitunut polttoaine oli lähes tuoretta, joten siihen käytön aikana kertyneiden fissiotuotteiden määrä oli suhteellisen vähäinen.

Onnettomuuksista toinen tapahtui 2-yksiköllä normaalien tehoajon aikana 12.3.1980. Reaktorissa havaittiin merkkejä polttoainevaurioista, joiden vuoksi reaktori pysäytettiin. Seisokin aikana tehdyissä tarkastuksissa todettiin, että kaksi polttoaine-elementtiä (yhteispaino 20 kg) oli sulanut. Ylikuumentumisen aiheutti reaktoriin sijoitetun instrumentoinnin suojalevyn irtoaminen ja kulkeutuminen osin jäähdytyskanavan päälle. Polttoaineen sulamisen yhteydessä vapautuneet fissiotuotteet pidättyivät kokonaan reaktoripainesäiliöön.

Saint Laurentin laitokset suljettiin 1990-luvulla vanhentuneina.

### **Sosnovyi Bor 1 (Neuvostoliitto, Venäjä)**

Leningradin ydinvoimalaitoksella Sosnovyi Borissa Suomenlahden kaakkoisrannalla on neljä RBMK-yksikköä, joista kullakin on kaksi turbiinia. Ykkösreaktorin toinen turbiini pysäytettiin 31.11.1975 huoltoa varten. Operaattorivirheen takia myös toinen turbiini ajettiin alas, jolloin reaktori

riissa tapahtui pikasulku. Reaktori yritettiin käynnistää, mutta pikasulku tapahtui neljä kertaa. Viidennellä kerralla reaktori saatiin kriittiseksi ja toinen turbiini käynnistettiin. Reaktorin teho nostettiin 1 700 MW:iin. Pian käynnistyksen jälkeen yksi polttoainekanaavista alkoi vuotaa ja kanavan ulostulolämpötila nousi nopeasti. Operaattorit reagoivat tähän pysäyttämällä reaktorin. Kanavassa ollut polttoaine vaurioitui pahoin ja myös kanavan alaosaan tuli 600 millimetrin pituinen repeämä. Polttoaineen suojakuorivaurioita tapahtui myös 20:ssä viereisessä kanavassa. Vaurioiden syynä oli tehon liian nopea nosto ja tehon keskittyminen liian yhteen osaan reaktoria.

Polttoainevauriosta aiheutuneiden päästöjen suuruudeksi on arvioitu 60 PBq (1,5 miljoonaa Ci), mutta päästön koostumusta ei ole ilmoitettu. Jos päästöt koostuivat pelkästään jalokaasuista, vastasivat ne noin kymmentä prosenttia TMI-onnettomuuden aiheuttamista päästöistä eivätkä aiheuttaneet merkittäviä säteilyannoksia ympäristössä asuville ihmisille. Päästön mukana ympäristöön mahdollisesti vapautuneen jodin tai cesiumin määristä tai annosvaikutuksista ei ole tietoa.

Muita yhden polttoainekanaavan vaurioon johtaneita onnettomuuksia on tapahtunut RBMK-laitoksilla ilmeisesti ainakin Beloyarskin 2-yksiköllä 1977 ja Tshernobylin 1-yksiköllä vuonna 1982. Näitä tapahtumia ei kuitenkaan ole virallisesti raportoitu. Tshernobylistä virtauskanavan aiheuton sulkeutuminen pysäytti virtauksen kanavaan, jolloin teho tässä kanavassa nousi huomattavasti aiheuttaen kanavan tuhoutumisen. Myös lähimmissä muissa kanavissa tapahtui huomattavia muodonmuutoksia.

### **Sosnovyi Bor 3 (Neuvostoliitto, Venäjä)**

Onnettomuus tapahtui Sosnovyi Bor 3 -yksiköllä 24.3.1992 normaalin käytön aikana, kun jäähydevirtaus yhdessä reaktorin 1 700:sta polttoainekanaavasta osin katkesi jäähytepiirin venttiilistä irronneiden osien takia.

Kyseinen venttiili toimi kanavaan menevän jäähydevirtauksen säätöventtiilinä. Kun kanavassa ei ollut polttoainetta, voitiin venttiili sulkeamalla eristää kanava muusta piiristä esimerkiksi huoltotoimenpiteitä varten. Vaurion aiheuttanut venttiili oli suljettu pari viikkoa ennen onnettomuutta. Ilmeisesti venttiili oli suljettu liiallista voimaa käyttäen, jolloin se oli vioittunut. Kun venttiili huoltotyön päätyttyä avattiin uudelleen ja polttoainetta sisältävä kanava otettiin käyttöön, lähtivät rikkoutuneet venttiilin osat jonkin ajan kuluttua virtauksen mukaan.

Rikkoutuneiden venttiilin osien vaikutuksesta jäähytevirtaus polttoainekanavassa väheni, jolloin polttoaine ylikuumentui vaurioittaen nip-pua ympäröivän metalliputken. Tämän seurauksena höyryä purkautui polttoainekanavia ja grafiittilohkoja ympäröivään reaktorisäiliöön, jolloin automatiikka pysäytti reaktorin ajamalla säätösauvat sisään. Reaktorin tehon laskiessa polttoaineen jäähdytys myös vaurioituneessa nipussa palautui riittäväksi ja onnettomuuden eteneminen pysähtyi.

Polttoaineen ylikuumentuessa vapautuneet fissiotuotteet kulkeutuivat reaktorisäiliöstä höyryn ja polttoainesauvojen vaurioituessa syntyneen vedyn mukana ylipainesuojauslinjan kautta lauhdutustornin vesialtaisuuteen, jollaisia on käytössä uudemmilla RBMK-laitoksilla. Osa fissiotuotteista pidättyi lauhdutusaltaisuuteen osan (muun muassa kaikki jalokaasut ja noin puolet jodista) jatkaessa edelleen lauhdutustornin ilmatilaan. Onnettomuudeksi lauhdutustornin yläosaa oli vastikään korjattu ja huolto-olukut olivat edelleen onnettomuuden tapahtuessa auki, joten lauhdutustornin ilmatilasta oli aluksi suora yhteys ympäristöön. Käyttökäytöstä sulki yhteyden noin tunti onnettomuuden alkamisesta.

Polttoainevaurion seurauksena arvioidaan ympäristöön vapautuneen noin 180 TBq (5 000 Ci) jalokaasuja ja 40–100 GBq (1–3 Ci) jodia. Polttoaineesta jodia vapautui noin sata kertaa enemmän, mutta suurin osa siitä pidättyi reaktorisäiliöön ja lauhdutustorniin.

Onnettomuudesta aiheutuneet päästöt ylittivät laitokselle asetetut päästöraajat, mutta niistä ei aiheutunut merkittävää säteilyaltistusta tai suojautumistarvetta. Laitosalueella annosnopeus kohosi suurimmillaan kymmenkertaiseksi normaaliin taustaan verrattuna ja laitosalueen ulkopuolella ei nousua normaalissa taustasäteilyn määrässä havaittu. Hyvin tarkoilla mittauksilla voitiin kuitenkin havaita radioaktiivisten aineiden pitoisuuksissa nousua Suomessakin asti. Suurimmat pitoisuudet Suomessa mitattiin 12–24 tuntia onnettomuuden jälkeen Kotkassa ja Loviisassa. Mitatut pitoisuudet olivat kuitenkin hyvin pieniä, kertaluokkaa 100 pienempiä kuin Tshernobylin onnettomuuden aikaan.

## **Paks 2 (Unkari)**

Unkarissa Paksin ydinvoimalaitoksen kakkosyksikön vuosihuollon yhteydessä tehdyssä polttoaineen nippujen puhdistusoperaatiossa yksi 30 nipun erä vaurioitui pahoin. Reaktorista poistettuja polttoaineen nippuja puhdistettiin kemiallisesti niiden pinnalle kertyneestä epäpuhtaudesta. Puhdis-

tus tehtiin erillisessä, reaktorin ulkopuolisessa säiliössä. Puhdistusprosessin loppuvaiheessa säiliön aukaisu viivästy ja säiliössä ollut polttoaine pääsi kuumenemaan liikaa. Ilmeisesti koko polttoaine-erä vaurioitui, kun varastoaltaan vesi pääsi säiliön kantta avattaessa kosketuksiin lähes tuhatasteisen polttoaineen kanssa. Alussa vielä vähäiset vauriot havaittiin 10.4.2003, kun säiliöstä pääsi vapautumaan reaktorihallin ilmaan radioaktiivisia jalokaasuja ja jodia. Vaurion laajuus vahvistui vasta, kun säiliön kansi saatiin nostettua paikoiltaan 16.4.2003 ja polttoainevauriot päästiin toteamaan TV-kameralla. Tapaus luokiteltiin seitsenasteisella ydinlaitostapahtumien INES-vakavuusasteikolla kolmosluokkaan kuuluvaksi vakavaksi turvallisuuteen vaikuttavaksi tapahtumaksi.

Ulkoisen säteilyn tasot laitosalueella tai sen lähiympäristössä eivät tapahtuman johdosta nousseet yli normaalin taustasäteilyn kuin yhdellä ympäristön säteilymittausasemalla, jossa havaittiin vähäistä annosnopeuden nousua. Unkarin ydinturvallisuusviranomaisen aloitteesta käynnistettiin tapahtuman jälkeen laitoksen ympäristön valvontamittaukset mahdollisen laskeuman määrittämiseksi. Mittaustulokset olivat alle tuhannesosan Unkarissa mitattuihin Tshernobylin jälkeisiin laskeuma-arvoihin verrattuna.

Unkarin ydinvoimalaitos Paks sijaitsee noin 120 kilometriä Budapestista etelään. Laitos koostuu neljästä neuvostoliittolaista alkuperää olevasta VVER-440-tyyppisestä painevesireaktorista. Yksiköt on otettu käyttöön vuosina 1983–1987 ja ne ovat aikaisemman käyttöhistoriansa ajan kuuluneet luotettavuudeltaan maailman parhaiden ydinvoimalaitosten joukkoon. Kakkosyksikkö oli pysäytetty vuosihuoltoseisokkia varten 29. maaliskuuta ja se oli määrä ottaa huollon jälkeen käyttöön toukokuun alussa. Tapahtuman seurauksena laitoksen käynnistys lykkääntyi. Varastoaltaassa olevan vaurioituneen polttoaineen poiston sekä altaiden ja jäähdytyspiirien puhdistamisen arvioitiin vaativan ainakin vuoden.

Kakkosyksikön vuosihuollon aikaisiin töihin kuului reaktorista poistetun polttoaineen kemiallinen puhdistus sen pinnalle kertyneestä epäpuhtaudesta, joka oli peräisin reaktorin jäädytyspiiriin liuenneista korroosiotuotteista. Korroosiotuotteiden liukeneminen reaktoripiiristä ja kertyminen polttoaineniippuihin oli höyrystimien laajamittaisten dekontaminointien vuoksi ollut muutaman vuoden ajan aiempaa runsaampaa Paks 1, 2 ja 3-yksiköillä. Dekontaminointeja oli tehty vuosihuoltoseisokeissa vuosina 2000 ja 2001 säteilytasojen alentamiseksi höyrystimissä niiden sekundaaripuolella suoritettujen syöttövesijakajien uusinnan vuoksi.

Korroosiotuotekertymä voi vaikeuttaa polttoaine-elementtien läpi tapahtuvaa jäähditysvesivirtausta niin, että tukkeutuneiden nippujen jäähditys ei ole enää riittävää. Tämä aiheuttaa reaktorisydämen epäsymmetristä lämpötilannousua, mikä havaitaan läpi kulkevan veden lämpötilamittauksilla. Tällaisessa tapauksessa joudutaan reaktorin tehoa hieman laskemaan lämpötilojen pitämiseksi hyväksyttävänä niissäkin nipuissa, joiden läpi jäädytysvirtaus on heikentynyt. Saostuman on havaittu hidastavan säätösauvojen liikettä polttoainenipuissa. Kerrostumilla on kokemuksen perusteella myös polttoainevuotoja lisäävä vaikutus.

Paksin ydinvoimalaitoksen tilauksesta oli 1990-luvun loppupuolella ranskalais-saksalaisena yhteistyönä kehitetty polttoaineen kemiallista puhdistusta varten reaktorista ja laitoksen järjestelmistä erillinen puhdistuslaitteisto, jossa pystyttiin kerralla käsittelemään seitsemän polttoainennippua. Puhdistuksessa käytettiin saksalaista patentoitua kemiallista menetelmää ja ranskalaisen yrityksen suunnittelemaa laitteistoa, johon kuuluva puhdistussäiliö oli kehitetty polttoaineen kuljetussäiliöstä. Tässä laitteistossa jokainen nippu sijaitsi omissa virtausputkissaan, joissa tukkeuma- ja puhdistumisaste pystyttiin määrittämään yksilöllisesti. Laitteisto menettelyineen oli Unkarin ydinturvallisuusviranomaisen, HAEA:n, hyväksymä, ja sillä oli vuosina 2000–2001 puhdistettu yhteensä 170 Paks 2:n reaktorista ennaikaisesti poistettua polttoainennippua.

Kahdella viimeisellä käyttöjaksolla saostumat muodostuivat laitoksyksiköillä 1, 2 ja 3 laajemmaksi ongelmaksi niin, että käyttöjaksolla 2002–2003 tehoa jouduttiin laskemaan 80–98 %:iin nimellistehosta ja Paks 3 -yksikkö jouduttiin pysäyttämään helmikuussa 2003 koko latauserän vaihtoa varten. Koska käytöstä ennaikaisesti poistettujen polttoainennippujen lukumäärä oli jo merkittävä ja vaihtolatauksiin oli vaikeuksia löytää sopivan palama-asteen omaavaa käytettyä polttoainetta, haluttiin puhdistuskapasiteettia nostaa.

Paksin ydinvoimalaitos pyysi kesäkuussa 2002 ehdotuksia samalta yritykseltä uudesta polttoaineen puhdistusoperaatiosta lähes 250 polttoainennipulle. Yritys teki ehdotuksen kahdesta vaihtoehdosta: sekä reaktorissa että reaktorin ulkopuolisessa säiliössä suoritettavasta puhdistuksesta. Paks valitsi reaktorin ulkopuolella suoritettavan puhdistusmenetelmän lokakuussa ja toimitti lupahakemuksen viranomaiselle joulukuussa 2002. Uutta, 30 nipun puhdistuslaitteistoa käsiteltiin aiemman seitsemän nipun puhdistuslaitteiston muutoksena. Turvallisuusviranomaisen antoi periaatehyväksynnän sydämen ulkopuoliselle polttoaineen puhdistukselle.



le tammikuussa 2003. Periaatehyväksynnällä Paksin ydinvoimalan turvallisuusosastolle annettiin valtuudet lisensoida ja valvoa myöhempiä polttoaineen puhdistuksen yksityiskohtaisia suunnitelmia ja laitteiston valmistusta, asennusta, koestuksia ja käyttöä.

Puhdistuslaitteisto asennettiin Paks 2 -laitosyksikölle maaliskuun puolivälissä 2003 reaktorirakennuksen 14 metriä syvään boorihappopitoisella vedellä täytettyyn varastoaltaaseen, niin sanottuun kaivoon numero 1, jonka jäähdytys hoidetaan laitoksen polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmällä. Aluksi prosessin testaamiseksi puhdistettiin kaksi 30 nipun erää polttoainetta, mikä oli poistettu käytöstä yli vuosi aikaisemmin. Paks 2:n huoltoseisokissa oli suoritettu jo kolmen juuri käytöstä otetun polttoainenuppuerän puhdistus, kun kaikkiaan kuudennen erän puhdistus uudella laitteistolla aloitettiin 9.4.2003. Erillisen puhdistus- ja jäähdytyspiirin avulla suoritetun kemiallisen käsittelyn jälkeen säiliön jäähdytyskierto kytkettiin 10.4. kello 16.30 käyttämään sen sijoitusaltaan vettä. Tämä vaihe oli tarkoitettu lyhykestoiseksi, korkeintaan tunnin mittaiseksi, jona aikana oli tarkoitus avata säiliön kansi. Puhdistussäiliötä ei päästy kuitenkaan heti aukaisemaan, sillä toimenpiteessä käytettävää nosturia tarvittiin muissa töissä.

Puhdistussäiliön lämpötila alkoi nousta ja vesi haihtui kiehuessaan säiliön ilmauslinjan kautta. Parin tunnin kierrätyksen jälkeen havaittiin paineistimen pinnannousua sekä säiliön ulostulolämpötilan laskua. Lämpötilan nousua puhdistuspiirissä ei havaittu, sillä lämpötilamittaukset oli sijoitettuna tuolloin jo erotettuna olleeseen puhdistuspiiriin, eikä muitakaan indikaatioita osattu tulkita oikein. Säiliön kuivuttua polttoaineen lämpötila nousi nopeasti useampaan sataan asteeseen aiheuttaen polttoainesauvojen suojakuoren kaasupätiiviyttä. Säiliöstä pääsi vuotamaan radioaktiivisia jalokaasuja ja jodia kakkosyksikön reaktorihalliin myöhään illalla 10.4. ja ne havaittiin kuusi tuntia kierrätyksen kytkennän jälkeen, laitoksen päästöjä valvovien säteilymittausten osoittaessa äkillistä nousua ja reaktorirakennuksen jalokaasuaktiivisuusmittauksien hälyttäessä. Syyksi arvioitiin säiliössä oleva vuotava polttoainenuppu, joka päätettiin poistaa.

Tankin hydraulinen lukitus avattiin 11.4.2003 kello 2.15, jolloin kansi avautui raolleen tankissa olleen ylipaineen vaikutuksesta. Kylmän allasveden päästessä kosketuksiin laskelmien mukaan lähes tuhatasteisen polttoaineen kanssa tapahtui pääosa polttoaineaurioista. Tämä vaihe havaittiin kaivon pinnan nopeasta laskusta (7 cm) ja kuplinnasta altaan pinnalla. Tällöin tapahtui valtaosa jalokaasu-, jodi- ja aerosolipäästöistä.

Huoltohenkilöstö yritti nostaa säilytysaltaassa veden pinnan alla olevan säiliön kantta. Aukaisu kuitenkin keskeytettiin yhden vaijerin katkettua, ja puhdistussäiliö jäi puolittain avonaiseen tilaan. Vaurion vakavuutta ei tällöin pystytty arvioimaan ja tapahtuma luokiteltiin INES-luokkaan 2. Kansi saatiin useiden yritysten jälkeen auki 16.4.2003 ja polttoainevauriot päästiin toteamaan osittain TV-kameralla. Polttoaineniput todettiin pahoin vaurioituneiksi mutta ei sulaneiksi. Voimalaitoksen sekä ydinturvallisuudesta vastaavan viranomaisen valmiusorganisaatiot nostettiin hälytysvalmiuteen ja tehtiin ilmoitukset lähivaltioille. INES-luokka korotettiin 3:een.

Säteilytasot polttoaineen varastoaltaiden läheisyydessä heti vaurion tapahtuttua nousivat useisiin kymmeneen millisieverteihin tunnissa. Annosnopeus yhden metrin korkeudella vedenpinnasta stabiloitui noin 1 mSv:iin tunnissa. Säteilytasot reaktorihallissa altaiden läheisyydessä vaihtelivat 20  $\mu$ Sv/h – 1,4 mSv/h. Tapahtumasta aiheutuneet työntekijöiden henkilökohtaiset säteilyannokset olivat korkeintaan 10 % vuosittaisesta annosrajasta (20 mSv).

Tapahtumasta ei aiheutunut merkittäviä annoksia laitoksen ulkopuolella eikä muiden radioaktiivisten aineiden kuin jalokaasujen ja jodin päästöjä ympäristöön. Jalokaasuvuoto väheni tapahtuman jälkeen päivittäin. Radioaktiivisten aineiden päästöjä mitattiin jatkuvasti sekä poistokaasupiipun päästömittauksilla että laitoksen ympäristön säteilyvalvontaverkon avulla. Ulkoisen säteilyn taso yhdellä mittausasemalla kolmen kilometrin etäisyydellä laitosalueelta nousi 11.4.2003 lyhytaikaisesti hieman yli normaalin taustasäteilyn (0,1  $\mu$ Sv/h), mutta se ei kuitenkaan ylittänyt viranomaisten ilmoitusrajaa (0,5  $\mu$ Sv/h). Unkarin ydinturvallisuusviranomaisen aloitteesta käynnistettiin vaurion vakavuuden paljastuttua huhtikuun loppupuolella laitoksen ympäristön valvontamittaukset mahdollisen laskeuman määrittämiseksi. Maitonäytteissä ei havaittu aktiivisuutta. Ympäristönäytteiden aktiivisuusmittaustulokset olivat alle tuhannesosa Unkarissa mitattuihin Tshernobylin jälkeisiin laskeuma-arvoihin verrattuna.

Avonaisen säiliön jäähdytystä hoidetaan kierrättämällä sen sijoituskaivon vettä kahdella pumpulla. Alikriittisyys on varmistettu pitämällä veden boorihappopitoisuus riittävän korkeana. Kaivon jäähdytystä hoidetaan laitoksen pysyviin järjestelmiin kuuluvalla jäähdytysjärjestelmällä, joka jäähdyttää myös viereistä polttoaineen varastoallasta. Varastoaltaat, niiden jäähdytyspiiri sekä reaktori ja primaaripiiri kontaminoituivat liuenneista fissiotuotteista ja transuraani-alkuaineista, sillä reaktori erotettiin varastoaltaista vasta viikko polttoainevaurion jälkeen.

Vaurioituneiden polttoainenippujen siirtäminen siihen normaalisti tarkoitetuilla laitteistoilla ei ollut mahdollista. Unkarin viranomaiset totesivat, että vaurioituneen polttoaineen saattaminen turvalliseksi on vaativa, kallis ja aikaa vievä operaatio.

Paksin ydinvoimalaitos laati tapahtumasta viranomaisvaatimusten mukaisesti selvityksen kuukauden kuluttua tapahtumasta ja toimitti sen Unkarin ydinturvallisuudesta vastaavalle viranomaiselle (HAEA/NSD), joka perusti välittömästi myös oman tutkintaryhmänsä selvittämään tapahtumaa. Viranomaisen tutkintaraportissa arvioitiin tapahtuman syytä sekä voimayhtiön laatimaa raporttia. Arviot osoittivat, että tapahtumaan vaikutti useita riippumattomia syytä. Teknisten perussyiden selvittämisen todettiin vaativan lisätutkimuksia.

Unkarin hallituksen ja Unkarin ydinturvallisuusviranomaisen pyynnöstä kansainvälinen ydinenergiajärjestö IAEA suoritti tapahtuman johdosta sekä Paksin ydinvoimalaitokselle että HAEA/NSD:n menettelyihin kohdistuneen riippumattoman tarkastuksen kesäkuussa 2003. Tarkastuksessa arvioitiin tapahtumaa IAEA:n ohjeiston perusteella ja annettiin Paksin laitokselle ja HAEA:lle useita suosituksia, joilla vastaavanlaiset tapahtumat voitaisiin jatkossa välttää.

IAEA:n asiantuntijat totesivat, että tapahtuman syntyyn oleellisesti vaikutti se, että puhdistusoperaation suunnittelu, arviointi ja toteutus tehtiin kireässä aikataulussa. Tarkastukset kohdistuivat säteilysuojellisiin seikkoihin, puhdistusprosessiin ja sen tulokseen, eikä ydinturvallisuutta huomioitu riittävästi. Laitteistolle annettiin niin sanottu periaatehyväksyntä, mikä ei edellyttänyt riippumatonta tarkastusta ja arviota. Puhdistussäiliön suunnittelussa ja sen tueksi tehdyissä analyyseissa oli selkeitä puutteita. Alihankkija työskenteli ilman Paksin ydinvoimalaitoksen asianmukaista valvontaa ja puhdistuslaitteiston käyttö oli täysin alihankkijan vastuulla. Puhdistusoperaation käyttöohjeet eivätkä hätä- ja häiriötilanneohjeet olleet riittävät. Paksin laitoksella ja viranomaisella oli liiallinen luottamus arvostettua alihankkijaa kohtaan.

Samantyyppistä korroosiotuotteiden liukenemista ja polttoaine-elementtien tukkeutumista tapahtui 1990-luvun puolivälissä Loviisan kakkosyksiköllä, kun koko primaaripiiri oli dekontaminoitu. Vastaavanlaista polttoaine-elementtien puhdistusta ei tehty ja tukkeutuneeksi todettu polttoaine poistettiin käytöstä. Suomen ydinvoimalaitoksilla ei likaantunutta polttoainetta puhdisteta eikä likaantumisen jälkeen oteta uudelleen käyttöön.

## 6.5 Turvallisuuteen vaikuttaneita tapahtumia

Edellä kuvattujen onnettomuuksien ohella ydinvoimalaitoksilla on sattunut vakavia häiriöitä, joissa polttoaineauriot on vältetty toisinaan hyvinkin pienillä marginaaleilla. Tällaiset tapaukset on yleensä luokiteltu kansainvälisellä INES-vakavuusasteikolla luokkaan 3. Samaan luokkaan kuuluvat myös häiriöt, joista aiheutuu vähäisiä päästöjä ympäristöön, mutta joissa ei ole merkittävää riskiä vakavammista vahingoista.

Tässä luvussa esitellään joitain läheltä piti -tilanteita, joilla on ollut merkitystä ydinvoimalaitosten riskitekijöiden ymmärtämisen kannalta. Lisäksi esitellään Suomen ydinvoimalaitoksilla sattuneet merkittävät turvallisuuteen vaikuttaneet tapahtumat eli INES-luokkaan 2 luokitellut tapahtumat.

### **Brown's Ferry (USA)**

Häiriö tapahtui vuonna 1975 Brown's Ferryn kiehutusvesilaitoksen yksös- ja kakkosyksiköllä, jotka tapahtumahetkellä olivat käynnissä yhteensä 1 100 MW:n sähköteholla. Laitokseen kuuluvaa kolmosyksikköä oltiin parhaillaan rakentamassa.

Brown's Ferryn laitosyksiköiden reaktorirakennus, jonka sisällä on varsinainen suojarakennus, on käytön aikaan lievästi alipaineinen, jonka ansiosta reaktorirakennuksen läpivientien epätiivuus on havaittavissa ilmavirtana reaktorirakennuksen viereisistä tiloista reaktorirakennukseen. Ilmavirran toteamiseen käytettiin tuolloin yleisesti kynttilää, jonka liekki taipuu ilmanvirran suuntaan pienilläkin virtauksilla.

Häiriön alkaessa kunnossapitohenkilöstö oli testaamassa sähkö- ja instrumentointikaapeleiden läpivientejä reaktorirakennuksessa kynttilän avulla. Erään läpiviennin lähellä havaittiin ilmanvirta valvomon alapuolisesta kaapelitilasta reaktorirakennukseen. Vuotoa yritettiin paikata polyuretaanimassalla, joka oli alkuperäistä tiivistemateriaalia paloherkempää. Korjauksessa ei kuitenkaan onnistuttu. Kun tiiveyttä testattiin uudestaan viemällä kynttilä lähelle kohtaa, jossa vuoto oli todettu, imaisi veto liekin läpiviennin sisälle sytyttäen tiivistemateriaalin. Paloa yritettiin aluksi sammuttaa kannettavin sammuttimin ja palohuovin, mutta voimakas veto läpiviennin läpi teki yritykset tehottomiksi. Palo levisi siten

läpiviennin läpi reaktorirakennuksen puolelle. Kaapelitilan automaattiset CO<sub>2</sub>-sammutusjärjestelmät oli tilassa tehtävien huoltotöiden takia kytetty pois päältä, mutta ne saatiin pian käyttöön. Sammutusjärjestelmän avulla tulipalo kaapelitilassa saatiin vähitellen hallintaan, mutta palo jatkui pitkään reaktorirakennuksessa, jossa vastaavaa sammutusjärjestelmää ei ollut.

Kunnossapitohenkilöstö yritti aluksi sammuttaa paloa reaktorirakennuksessa kannettavin CO<sub>2</sub>-sammuttimin. Sammuttimien käyttö aiheutti sammutushenkilöstölle hengitysvaikeuksia, jonka vuoksi sammutus jouduttiin aina välillä keskeyttämään. Keskeytysten aikana palo syttyi aina uudestaan. Lopulta näkyvyys tilassa heikkeni savun takia niin paljon, että sammutus jouduttiin keskeyttämään kokonaan.

Paikallinen palokunta saapui paikalle noin tunti palon alkamisen jälkeen ja aloitti sammutustoimet. Työskentelyä reaktorirakennuksessa kuitenkin hankaloitti ajoittain huomattavasti se, että näkyvyys reaktorirakennuksessa oli savun ja valaistuksen menetyksen takia heikko ja työskentely oli mahdollista ainoastaan happilaitteita käyttäen. Lisäksi suuri osa käytävissä olleista happilaitteista jouduttiin antamaan laitoksen käyttöhenkilöstölle, joka reaktorin jäähdytyksen varmistamiseksi joutui ohjaamaan jäähdytysjärjestelmien venttiilejä paikanpäältä manuaalisesti, kun kaapeleiden palamisen takia normaali ohjaus oli menetetty.

Tulipaloa reaktorirakennuksessa yritettiin sammuttaa jauhesammuttimilla, koska sammutusveden käytön pelättiin johtavan oikosulkuihin ja muihin vikoihin sähköä käyttävissä järjestelmissä. Laitoksen johtaja antoi luvan sammutusveden käyttöön vasta siinä vaiheessa, kun reaktorin jäähdytysjärjestelmien tila oli saatu stabiloitua noin seitsemän tuntia palon alkamisen jälkeen. Vettä ruiskuttamalla tulipalo reaktorirakennuksessa saatiin pian sammutettua ilman häiriöitä reaktorin jäähdytysjärjestelmissä.

Palon seurauksena vaurioitui ykkösyksikön reaktorirakennuksessa noin 1 600 kaapelia, joista yli 600 oli turvallisuuden kannalta tärkeitä. Vaurioituneet kaapelit sijaitsivat noin 10 metrin säteellä läpiviennistä, josta palo sai alkunsa. Pian sen jälkeen, kun reaktori oli pikapysäytetty (noin puoli tuntia palon alkamisen jälkeen), kaapelien vaurioituminen sai aikaan höyrylinjojen eristysventtiilien sulkeutumisen, jolloin myös syöttövesipumput pysähtyivät. Myös sähkönsyöttö apusyöttövesijärjestelmän pumpuille menetettiin, jonka seurauksena vettä voitiin syöttää reaktoriin yksinomaan säätösauvajärjestelmän pumpulla. Tämän kapasiteetti (400 litraa minuutis-

sa) oli kuitenkin riittämätön korvaamaan jälkilämmöntuoton aiheuttamaa reaktoriveden höyrystymistä, joten veden pinta reaktorissa alkoi laskea. Estääkseen reaktorin paljastumisen operaattorit avasivat primaaripiirin ulospuhallusjärjestelmän venttiilit, joiden kautta höyry primaaripiiristä pääsi purkautumaan suojarakennuksen lauhdutusaltaaseen. Ulospuhalluksen avulla primaaripiirin paine saatiin laskettua 18 bariin 20 minuutissa, jolloin lauhdepumpuilla voitiin pumpata uutta syöttövedettä reaktoriin. Pumppauksen avulla voitiin veden pinta reaktorissa pitää koko ajan yli 80 cm reaktorin yläpinnasta, joka on automaattisena käynnistysrajana reaktorisydämen ja suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmille.

Noin kuusi tuntia palon alkamisesta menetettiin ulospuhallusjärjestelmän venttiilien ohjauksessa tarvittava säätöilma, jolloin venttiilit sulkeutuivat ja reaktorin paine alkoi kasvaa. Paineen noustua yli 24 barin eivät lauhdepumput pystyneet enää pumppaamaan vettä reaktoriin, jossa veden pinta alkoi jälleen laskea. Venttiilien ohjaus saatiin palautettua noin kolme ja puoli tuntia myöhemmin, noin kaksi tuntia palon sammutuksen jälkeen, hyvissä ajoin ennen reaktorin paljastumista. Veden pinta reaktorissa saatiin siten takaisin hallintaan, kun paine reaktorissa saatiin alennettua niin että syöttöveden pumppaukseen voitiin käyttää jälleen lauhdepumppuja.

### **Greifswald (Itä-Saksa)**

Greifswaldin VVER-laitoksella syttyi tulipalo 7.12.1975 sähkömiehen aiheuttama sähköjärjestelmään oikosulun, jonka seurauksena kaapeleita syttyi tuleen yhdessä kaapelitunnelissa ja turbiinihallin alatasoilla kulkevilla kaapelireiteillä. Kaapeleiden syttyminen johti pääkiertopumppujen, syöttövesipumppujen ja molempien apusyöttövesipumppujen pysähtymiseen. Tämän jälkeen reaktorista poistui jälkilämpöä viiden tunnin ajan ainoastaan luonnonkierrolla. Alkuvaiheessa jälkilämpöteho poistui veden höyrystyessä sekundaaripiirin höyrystimissä. Veden vähentyessä höyrystimissä primaaripiirin paine ja lämpötila nousivat, kunnes primaaripiirin kuusi varoventtiiliä avautuivat. Venttiileistä yksi juuttui vian takia auki. Vettä primaaripiiriin saatiin ainoastaan yhdellä primaaripiirin lisävesipumpulla. Häiriön eteneminen katkesi vasta 8,5 tuntia palon alusta, kun laitoksella olleet neuvostoliittolaiset sähkömiehet löysivät riittävän pitkän sähkökaapelin ja kytkivät sähköt viereisen yksikön sähkökeskuksesta toiselle apusyöttövesipumpulle. Tällä pumpulla voitiin pumpata vettä höyrystimiin niin, että jälkilämmönpoistoa primaaripiiristä voitiin jatkaa höyrystimien kautta.

Palosta selviäminen oli mahdollista, koska pienillä VVER-laitoksilla, jonka tyyppisiä myös Loviisan laitoksiköt ovat, reaktorin teho suhteessa primaari- ja sekundaaripiirissä oleviin vesimassoihin on poikkeuksellisen suuri; vastaava onnettomuus millä tahansa muun tyyppisellä laitoksella olisi aiheuttanut vakavia reaktorivaurioita. Häiriö luokiteltiin INES-luokkaan 3.

### **Vandellos 1 (Espanja)**

Vandellosin laitoksen ykkösyksikön reaktori oli samantyyppinen kuin ranskalaiset Saint Laurentin laitoksen reaktorit, eli reaktori oli kaasujäähdytteinen ja grafiittihidasteinen ja sen polttoaineena käytettiin luonnonuraania. Laitos oli otettu käyttöön 1972 ja sen omisti ranskalais-espanjalainen yhtiö.

Vuonna 1989 tapahtunut häiriö alkoi turbogeneraattorin värähtelystä aiheutuneella toisen turbiinin pikasululla. Heti tämän jälkeen havaittiin liekkejä toisella turbiinilla. Palo alkoi turbiinin korkeapaineosassa ja generaattorilla. Palon takia operaattorit pysäyttivät reaktorin ja hälyttivät ympäristön palokunnat. Palo eteni turbiinilaitoksella voimakkaasti generaattorin jäähdytykseen käytetyn vedyn vuotaessa ulos ja sytyttäessä voiteluöljyn. Palo kesti kuusi tuntia, mutta laitoksen tila saatiin vakiinnutettua vasta puolitoista vuorokautta palon alkamisen jälkeen. Jälkeenpäin palon syyksi todettiin turbiinin siipien irtoaminen.

Palon seurauksena erityisesti turbiinilaitoksen alemmille tasoille sijoitetut järjestelmät ja kaapelit, mukaan lukien joukko hätälämmönpoistojärjestelmien kaapeleita, vaurioituivat pahoin. Kaapeleiden tuhoutumisen seurauksena kaksi neljästä reaktorin jäähdytyspuhaltimesta ja höyrystinlohkoista menetettiin, mutta jälkilämpö voitiin siirtää jäljelle jääneiden puhaltimien ja höyrystinlohkojen avulla. Syöttöveden saamisessa höyrystinlohkoihin oli kuitenkin ongelmia, koska palo vaurioitti säätöventtiilien liikuttamisessa tarvittavan paineilmajärjestelmän putkistoa ja sen kompressoreiden sähkönsyöttö menetettiin. Palo rikkoi turbiinihallissa myös pääjäähdytysjärjestelmän merivesiputken palkeen aiheuttaen yhdessä palon sammutukseen käytetyn veden kanssa tulvan turbiinihallin ja reaktorihallin alatiiloissa. Näissä tiloissa sijaittivat kaikki neljä normaaleissa alasaajoissa käytettyä jäähdytyspumppua, jotka tulvan takia menetettiin. Palo on luokiteltu INES-luokkaan 3.

## Davis-Besse 1985 (USA)

Häiriö tapahtui vuonna 1985 Davis-Bessen painevesireaktorilaitoksella. Häiriö käynnistyi toisen syöttövesipumpun pysähtymisestä normaalin tehoajan aikana, joka aiheutti reaktorin ja turbiinin pikasulut noin 30 sekuntia myöhemmin. Pian pikasulkujen jälkeen päähöyryventtiilit sulkeutuivat virheellisesti, minkä seurauksena myös toinen, höyryllä toimiva syöttövesipumppu pysähtyi. Tämän jälkeen menetettiin likimain samanaikaisten operaattorivirheiden ja venttiilivikojen ja pumppujen suojausten takia myös apusyöttövesijärjestelmä kokonaan, joten veden syöttö sekundaaripiirin höyrystimiin katkesi täysin.

Jälkilämmön poiston palauttamiseksi operaattoreiden piti korjata aikaisemmat operaattorivirheet, avata väärin toimineet kaksi venttiiliä ja palauttaa suojaukset apusyöttövesijärjestelmän pumpuissa. Näistä toimenpiteistä ainoastaan ensimmäinen oli mahdollista tehdä valvomosta käsin, muut toimenpiteet tuli tehdä paikan päällä. Apusyöttövesijärjestelmän lisäksi vettä höyrystimiin pyrittiin saamaan normaalisti ainoastaan laitoksen käynnistyksessä käytettävällä syöttövesipumpulla, jonka käyttöönotto edellytti neljän käsikäyttöisen venttiilin avaamista ja sulakkeen sijoittamista paikoilleen pumpun moottorin ohjauspiirissä. Nämä toimenpiteet onnistuttiin tekemään ensin ja näin saatiin vettä toiseen höyrystimeen. Pian tämän jälkeen myös apusyöttövesijärjestelmä saatiin käyttöön.

Operaattorit onnistuivat palauttamaan syöttöveden syötön höyrystimien ollessa jo kuivat, mutta ennen primaaripiirin vesimäärän olennaista vähentymistä. Höyrystinpinnat saatiin nostettua normaalille tasolle noin 30 minuuttia häiriön alun jälkeen, jona aikana veden lämpötila reaktorin ulostulossa oli korkeimmillaan noin 30 °C normaalia korkeammalla. Painestimen ulospuhallusventtiili avautui häiriön aikana ja juuttui auki, mutta vuoto piiristä katkaistiin paineen laskettua sulkemalla toinen, ulospuhallusventtiilin kanssa sarjassa ollut venttiili. Ulospuhallusventtiilin aukijuuttumisen takia paine piirissä laski nopeasti, mutta veden paisumisen ja mahdollisesti reaktorissa tapahtuneen kuplimisen takia pinta painestimessa laski vain lievästi, jonka vuoksi operaattorit eivät käynnistäneet korkeapaineista hätäjähdytysjärjestelmää. Ulospuhalluslinjan sulkuventtiili suljettiin noin 30 sekuntia ulospuhallusventtiilin aukijuuttumisen jälkeen varotoimenpiteenä, vaikka ulospuhallusventtiilin juuttumista ei huomattukaan. Näin vuoto piiristä katkaistiin varhaisessa vaiheessa. Sulkuventtiili avattiin kaksi minuuttia myöhemmin, mutta tästäkään ei aiheutunut vuotoa primaaripiiristä, koska ulospuhallusventtiili oli tällä välin sulkeutunut omia aikojaan.



Johtuen Davis-Bessen laitoksen ominaispiirteistä (pieni sekundaaripiirin vesitilavuus suhteessa reaktorin tehoon) edellä kuvatut tapahtumat etenivät hyvin nopeasti: aikaa reaktorin pikasulusta höyrystimien kuivumiseen ja primaaripiirin ulospuhallusventtiilin aukeamiseen kului alle 15 minuuttia. Häätötilanneohjeiden mukaan höyrystimien kuivuttua operaattoreiden tulisi varmentaa reaktorin jäähdytys käynnistämällä korkeaan primaaripiirin paineeseen pumppaavat lisävesi- ja hätäjäähdytysvesijärjestelmien pumput. Häiriön aikana operaattorit kuitenkin lykkäsivät pumppujen käynnistystä, koska toimet syöttöveden pumppauksen palauttamiseksi olivat käynnissä ja primaaripiirin lämpötilat eivät heidän arvionsa mukaan olleet hälyttävän korkeita. Tarve hätäjäähdytysjärjestelmän pumppujen käynnistämiseksi poistuikin muutamassa minuutissa, kun toiseen höyrystimeen saatiin vettä ja primaaripiirin paine ja lämpötila alkoivat laskea. Kun lisäksi vuotoa primaaripiiristä ei enää ollut – ulospuhallusventtiili oli sulkeutunut sulkuventtiilin ollessa suljettuna – saatiin tilanne pian hallintaan.

Jälkikäteen tehdyissä selvityksissä on perussyiksi häiriön syntyyn nimetty puutteet aikaisempien häiriöiden perussyiden tunnistuksessa ja korjauksessa. Häiriöiden yhteydessä tehtyjen toimenpiteiden puutteellisuus mahdollisti useat samanaikaiset laiteviat tässä nimenomaisessa häiriössä, jonka vuoksi alkutapahtuma – syöttövesipumpun pysähtyminen – laajeni vakavaksi häiriöksi.

### **Barsebäck (Ruotsi)**

Barsebäckin kiehutusvesireaktorilaitoksen kakkosyksikköä oltiin käynnistämässä seisokin jälkeen 28.7.1992, kun päähöyrylinjan varoventtiili avautui tahattomasti piirin paineen ollessa 30 bar ja reaktorin tehon ollessa alle yksi prosentti täydestä tehosta. Venttiili sijaitsi suojarakennuksen kuivatilassa, jonka läpi kulkevat lähes kaikki kiehutusvesireaktoriin menevät putkilinjat. Venttiilin auetessa ulos purkautuva höyry repi irti noin 200 kg putkilinjojen eristeitä. Eristemurskasta puolet kulkeutui kuivatilan alapuolella olevaan märkätilaan, josta kaikki reaktorisydämen hätäjäähdytyksessä tarvittavat järjestelmät ottavat vetensä, mikäli laitoksella tapahtuu putkikatko ja normaali syöttöveden syöttö menetetään. Osa järjestelmistä (reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmä ja suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä) ottaa vetensä märkätilan vesialtaasta aina, osa taas (reaktorin apusyöttövesijärjestelmä) ottaa aluksi vettä erillisestä säiliöstä, mutta imu siirtyy säiliön tyhjentäessä märkätilan altaaseen.

Venttiilin aukeamisen seurauksena automaattinen suojausjärjestelmä pysäytti reaktorin ja käynnisti reaktorin ja suojarakennuksen hätäjähdytysjärjestelmät. Reaktorisydämen ja suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmät ottavat vetensä märkätilan vesialtaasta viiden putkilinjan kautta. Jokaisen putkilinjan märkätilan vesialtaan puoleisessa päässä on imusiivilä, jonka tehtävänä on estää roskien, irrallaan olevien eristeiden ja muiden irtokappaleiden kulkeutuminen hätäjähdytysveden mukana pump-puihin ja edelleen reaktoriin. Häiriön aikana märkätilan altaaseen kulkeutunut eristemurska tukki osittain kaksi viidestä siivilästä. Operaattorit havaitsivat tukkeutumisen aiheuttaman paine-eron kasvun ritilöiden yli ja käänsivät virtauksen väliaikaisesti toiseen suuntaan, jolloin siivilät puhdistuivat ja jäähdytystä voitiin jatkaa normaalisti.

Häiriön aikana reaktorin jäähdytys oli riittävää. Käytettävissä olevien järjestelmien kapasiteetti veden pumppaamiseksi reaktoriin olisi ollut riittävä, vaikka osa järjestelmistä olisi ollut kokonaan käyttökunnottomiakin. Häiriö ei siten vaarantanut reaktorin turvallisuutta suoranaisesti, mutta toi esille vakavan puutteen hätäjähdytysjärjestelmien suunnittelussa.

Hätäjähdytysjärjestelmien tulisi kyetä toimimaan muun muassa tilanteessa, jossa primaaripiirin putki katkeaa reaktorin ollessa täydellä teholla. Tällaisessa tilanteessa eristemurskaa syntyy huomattavasti enemmän kuin Barsebäckin häiriön aikana. Jälkeenpäin on arvioitu, että huomattavassa osassa ydinvoimalaitoksia tällainen häiriö olisi johtanut kaikkien hätäjähdytysjärjestelmien imusiivilöiden tukkeutumiseen, koska siivilät oli mitoitettu alun perin liian pieniksi eikä niitä voitu käytön aikana huuhdella virtauksen suuntaa kääntämällä, kuten Barsebäckissa tehtiin. Sittenmin useilla laitoksilla on imusiivilöiden kokoa ja rakennetta muutettu tukkeutumisen estämiseksi. Käyttöön on myös otettu järjestelmiä, joilla tukkeutuneet siivilät voidaan puhaltaa auki painetypellä häiriön aikana.

Perussyiksi imusiivilöiden tukkeutumiseen paljastui se, että siivilöiden suunnittelussa ei oltu otettu huomioon mineraalivillaeristeiden ominaisuuksien huononemista laitoksen käytön aikana. Koska villaeristeet osoittautuivat imusiivilöiden tukkeutumisen kannalta huonoksi ratkaisuksi, on ne korvattu suurelta osin peltieristeillä.

Ruotsissa reaktoriturvallisuutta valvova viranomainen (SKI) edellytti Barsebäckin häiriön johdosta kesällä 1992, että viiden vanhimman BWR-laitosyksikön (Ringhals 1, Barsebäck 1 ja 2, Oskarshamn 1 ja 2) toiminta tuli keskeyttää siihen saakka, kunnes imusiivilöiden toimintakuntoisuuden takaavat muutostyöt oli tehty ja niiden riittävyys osoitettu. Vaatimuksen joh-

dosta yksiköt olivat poissa käytöstä 6–8 kuukautta ja ne otettiin uudelleen käyttöön syksyllä 1993. Uudemmissa Ruotsin ydinvoimalaitoksilla kuten myös Suomen Olkiluodon voimalaitoksella oli jo alun perin olennaisesti suuremmat imusiivilät ja mahdollisuus siivilöiden puhdistukseen. Olkiluodon tilanne arvioitiin imusiivilöiden toimintaa selvittävien mallikokeiden avulla. Arvion perusteella katsottiin tarpeelliseksi rakentaa imusiivilöiden puhdistamiseksi uusi, aiempaa tehokkaampi järjestelmä. Myös suurimpien putkien eristeitä vaihdettiin tukkimisominaisuuksiltaan Olkiluodon voimalaitoksen olosuhteissa edullisempaan materiaaliin. Nämä toimenpiteet suoritettiin vuosien 1993–1994 aikana.

Barsebäckin johdosta tehtiin muutoksia myös Loviisassa ja ruotsalaisilla painevesireaktoreilla. Loviisassa rakennettiin vuonna 1993 suojarakennuksen lattiakaivot kokonaan uudelleen, imupinta-alaltaan paljon alkuperäistä suuremmiksi, ja nekin varustettiin puhdistusjärjestelmällä. Ruotsalaisilla painevesireaktoreilla on tehty vastaavanlaisia muutoksia.

### **Kuola (Venäjä)**

Kuolan ydinvoimalaitoksella on neljä VVER-440-yksikköä. 22.2.1993 riehuneen myrskyn seurauksena menettivät laitoksen 1- ja 2-yksiköt yhteydet valtakunnalliseen sähköverkkoon. Molemmilla yksiköillä on varavoimalähteinä useita dieselgeneraattoreita, jotka käynnistyvät automaattisesti. Häiriöt paikallisessa sähköverkossa kuitenkin aiheuttivat dieselien automaattisen pysähtymisen noin kello 2.30. Dieselgeneraattorit saatiin käynnistettyä uudelleen, mutta häiriöt verkossa jatkuivat aiheuttaen toistuvia generaattoreiden pysähtymisiä. Dieselgeneraattoreiden katkonainen käyttö kesti klo 6.15 saakka, jolloin kaikki dieselgeneraattorit pysähtyivät lopullisesti. Toistuvat dieselien käynnistykset olivat 1-yksiköllä kuluttaneet loppuun käynnistyksessä tarvittavan paineilman ja luultavasti tilanne oli likimain sama myös 2-yksiköllä, joten mahdollisuudet varavoiman saamiseen laitosalueelta olivat vähäiset. Yhteys ulkoiseen sähköverkkoon saatiin palautettua puoli tuntia myöhemmin, kun sähköä pyydettiin suoraan läheiseltä vesivoimalaitokselta. Häiriön aikana ei reaktorin jäähdytys ollut vajavaista, mutta mikäli ulkoisen sähköverkon palautukseen olisi kulunut useita tunteja, olisi vaarana ollut primääripiirin kiehuminen kuiviin ja reaktorisydämen ylikuumeneminen ja sulaminen. Häiriö luokiteltiin INES-luokkaan 3.

## Wolf Creek (USA)

Häiriö tapahtui vuonna 1994 Wolf Creekin painevesireaktorilaitoksella, kun laitosta oltiin ajamassa alas polttoaineenvaihtoseisokkia varten. Alasajon aikana reaktorin jälkilämpö siirrettiin kierrättämällä primaari-piiriin vettä erityisessä jälkilämmönpoistojärjestelmässä. Järjestelmässä on kaksi piiriä, jotka on tehoajon aikana erotettu primaari-piiristä. Häiriön aikana käytössä oli ainoastaan yksi piireistä, koska toisessa jäähdytteen booripitoisuus oli laskenut tehoajon aikana eristysventtiilivuodon takia liian alhaiseksi. Booripitoisuuden nostamiseksi tämän piiriin vettä tuli kierrättää polttoainealtaisiin.

Häiriö käynnistyi, kun osa vuorossa olleista käyttöhenkilöistä alkoi koestaa venttiiliä, joka erotti toisistaan käytössä ja eristettynä olleet jälkilämmönpoistojärjestelmän piirit. Koestus edellytti venttiilin avaamista. Samanaikaisesti osa vuorosta työskenteli eristettynä olleen piiriin booripitoisuuden nostamiseksi avaamalla eristysventtiilin, joka erotti piiriin polttoainealtaisiin johtavasta linjasta. Molempien venttiilien yhtäaikaista avaamista loi avoimen putkiyhteyden primaari-piiristä polttoainealtaisiin. Linja oli auki 30 sekuntia, jona aikana  $35 \text{ m}^3$  primaari-piiriin vettä virtasi polttoainealtaisiin ja primaari-piiriin paine laski 25 barista 16 bariin. Vuodon syntyä todettiin polttoainealtaiden korkeasta pinnasta saadun hälytyksen ja paineistimen laskevan pinnan perusteella. Vuodon paikannettiin kyseisiin venttiileihin työvuoroon vasta tulossa ollut käytönvalvoja.

Häiriön vakavuutta pahensi se, että kaikki primaari-piiriin hätäjärjestelmät ottivat vetensä saman linjan kautta, jota pitkin vettä kulkeutui polttoainealtaisiin. Kun primaari-piiriin vettä virtasi tätä linjaa pitkin, sen paine laski. Samalla sen kiehumispiste aleni niin, että vuodon aikana vesi yhdyslinjassa hätäjäähdytysjärjestelmien imupuolella oli likimain kiehuva. On epävarmaa, olisiko pumppuja saatu tällaisissa oloissa käynnistettyä, koska käynnistymisen vaikutuksesta veden höyrystyminen pumppujen imupuolella olisi lisääntynyt. Mikäli siis reaktorin jäähdytyksen turvaamiseksi olisi tarvittu lisää vettä primaari-piiriin, kaikki tähän tarkoitettut järjestelmät olisivat mahdollisesti olleet poissa käytöstä.

Pidempään jatkuessaan tilanne olisi edelleen pahentunut. Jälkeenpäin on arvioitu, että viidessä minuutissa suurin osa yhdyslinjassa olleesta vedestä olisi höyrystynyt. Mikäli hätäjärjestelmien pumput olisi tällöin käynnistetty, olisivat pumput imeneet linjasta veden sijasta enimmäkseen höyryä. Valmistajan tekemän arvion mukaan pumput olisivat rikkoutuneet tällöin muutamassa minuutissa, mikäli niiden käyttöä olisi käynnis-

tyksen jälkeen jatkettu. Mikäli samanaikaisesti vuoto primaaripiiristä polttoainealtaisiin olisi jatkunut, olisi reaktorisydän alkanut paljastua noin 30 minuutin kuluessa.

Mikäli pumput käynnistyessään olisivat saaneet imettyä polttoainealtaiden kylmää vettä yhdyslinjaan, olisi vesi lauhduttanut linjassa olevaa höyryä saaden aikaiseksi vesi-iskun pumppuihin. Vesi-iskut olisivat saattaneet vioittaa pumput toimintakyvyttömiksi tai aiheuttaa uuden vuodon primaaripiiriin, jolloin häiriön etenemisen pysäyttäminen olisi vaikeutunut entisestään.

Auki pysyessään vuotolinja primaaripiiristä polttoainealtaisiin olisi aiheuttanut myös suojarakennuksen ohituksen. Mikäli onnettomuus olisi edennyt polttoainevaurioihin saakka, olisi päästöjen rajoittaminen ollut tämän vuoksi erityisen vaikeaa.

Häiriön välittömänä syynä olivat puutteet työlupakäytännöissä, jotka mahdollistivat turvallisuuden kannalta tärkeiden töiden tekemisen samanaikaisesti. Häiriön hallinnan kannalta kuitenkin vakavampia olivat puutteet laitoksen suunnittelussa, joiden seurauksena useat rinnakkaiset hätäjärjestelmät olisivat voineet vikaantua samanaikaisesti yksittäisen virhetoiminnon seurauksena.

### **Davis-Besse 2002 (USA)**

USA:n Davis-Bessen ydinvoimalaitoksella tarkastettiin 16.2.2002 alkanessa huoltoseisokissa reaktoripainesäiliön kannessa olevia säätösauvojen läpivientiputkia, koska eräillä muilla vastaavilla laitoksilla oli näissä putkissa havaittu säröjä. Laitosyksikkö on 900 MW:n tehoinen painevesi-reaktorilaitos, jossa reaktorin tehoa säätävien sauvojen liikuttelamiseen tarvittavien koneistojen nostomekanismit lävistävät reaktoripainesäiliön kannen läpivientiputkien kautta. Putket ovat siis osa painesäiliön painetta kantavaa rajapintaa. Merkkejä säröistä havaittiin kaikkiaan viidessä läpivientiputkessa, joista kolmessa oli jälkiä painetta kantavan rajapinnan läpäisemisestä vuodosta.

Läpivientiputkien korjaus oli tarkoitus tehdä laitteistolla, joka valssamalla muokkaa ja koneistaa läpivientiputken painesäiliön seinämää vasten. Vuotaneet läpivientiputket sijaitsivat painesäiliön kannen keskustan alueella. Kun yhtä läpivienttiä oltiin korjaamassa, jouduttiin työ välillä keskeyttämään ja laitteisto poistamaan läpivientiputkesta. Tällöin läpivientiputki putosi alkuperäisestä asennostaan jääden riippu-

maan kannen yläpuolisesta laipastaan. Putoamisen syiden selvittämiseksi painesäiliön yläpuolisia lämpöeristeitä ja läpivientiputki poistettiin paikaltaan. Kun läpivientikohdan ympäriltä poistettiin vuotaneen primaarijäähdytteen mukana tulleen boorihapon muodostama huokoinen korroosiotuotekerros, noin 150:n millimetrin paksuisessa painesäiliön seinämässä oli nähtävissä läpivientikohtaan liittyvän syvä onkalo, jonka laajuus yläosasta oli noin  $13 \times 18$  senttimetriä. Onkalon pohjalla metallin ainevahvuus oli vain noin 10 millimetriä, mikä vastaa hiiliteräksisen painesäiliön sisäpintaan ruostumattomasta teräksestä hitsatun pinnoitteen paksuutta.

Painesäiliön kannen syöpyminen johtui booria sisältävän primaarijäähdytteen pitempiäaikaisesta vuotamisesta joko läpivientiputkessa olleesta säröstä tai putkessa ylempänä olevista laippatiivisteistä painesäiliön kannen ulkopinnalle. Reaktorin tehonsäätöä varten primaarijäähdytteessä on boorihappoa. Hiiliteräksen suojaamiseksi boorihapon vaikutuksilta reaktoripainesäiliö vuorataan yleensä ruostumattomasta teräksestä valmistetulla pinnoitteella. Laimea boorihappo ei ole hiiliterästä syövyttävää. Kun boorihappoa sisältävä vesi vuotaa painesäiliön kuumalle ulkopinnalle, haihtuu siitä vettä ja samalla liuos väkevöityy. Väkevä boorihappo, jopa kiteytyneessä muodossa, syövyttää hapettavissa olosuhteissa voimakkaasti hiiliterästä. Esimerkkejä tällaisista tapahtumista on havaittu aikaisemminkin useilla painevesilaitoksilla.

Davis-Besse-laitoksen primäärijäähdytteen alkuperäistä vuotoreittiä ei vielä ole pystytty tunnistamaan ja lisäksi on epäselvää milloin vuoto on alkanut. Syöpyneen alueen suuruuden perusteella arvioidaan vuodon kuitenkin jatkuneen useita vuosia. Mikäli reaktoripainesäiliön kanteen olisi syöpyneen seurauksena syntynyt repeämä, se olisi jäänyt pintalaltaan niin pieneksi, että hätäjäähdytysjärjestelmät olisivat olleet riittäviä reaktorin jäähdyttämiseksi turvalliseen tilaan. Tapahtuma on luokiteltu INES-asteikolla luokkaan 3.

## 6.6 | INES 2 -luokan tapahtumat Suomen ydinlaitoksilla

Ydinlaitostapahtumien kansainvälisen INES-vakavuusasteikon luokan 2 tapahtumassa on kyseessä merkittävä puute turvallisuuteen vaikuttavissa tekijöissä, mutta turvallisuus on edelleen varmistettu mahdollisesta lisäviasta huolimatta (vertaa kohta 6.1). Tämän luokan tapahtumia on maailman ydinvoimalaitoksilla sattunut muutamia vuodessa. Suomessa vuoteen 2003 mennessä sattunut seitsemän INES 2 -luokan tapahtumaa.

## Loviisa 2, reaktorin pikasulku ja hätäjähdytyksen käynnistyminen, 1981

Virheellisesti lauennut lämpörele pysäytti 1.9.1981 yhden Loviisa 2 -laitosyksikön pääkiertopumpun. Reaktorin tehonsäätäjä rajoitti tämän johdosta reaktorin tehoa ja paine nousi sekundaaripiirissä. Höyrystimen pinnanmittaukset toimivat virheellisesti viidessä höyrystimessä ja tulkitsivat paineen nousun höyrystimen pinnan laskuna. Syynä virhetoimintaan oli epäpuhtauksien kertyminen mittausputkiin. Matalan pinnan signaaleista saatiin reaktori- ja turbiinipikasulut. Turbiinipikasulun johdosta avautuivat turbiinin ohitusventtiilit. Näistä yksi juuttui virheellisesti aukioasentoon ja primaaripiirin paine ja lämpötila alkoivat laskea sekundaaripiirin paineen laskeutumisessa.

Paineistimen pinnan lasku käynnisti pienikapasiteettiset primaaripiirin lisävesipumput. Pinnan edelleen laskeutuminen käynnisti suurikapasiteettisen lisävesipumpun. Kun tämäkään ei pysäyttänyt pinnanlaskua, kaksi hätälisävesipumppua käynnistyi laitosuojaussignaalista. Valvomohenkilökunta pysäytti hätälisävesipumpun 40 sekunnin kuluttua paineistimen pinnan ja primaaripiirin paineen nousua nopeasti.

Kun valvomohenkilökunta havaitsi turbiinin ohitusventtiilin jääneen auki, sitä yritettiin sulkea käsiohjauksella. Koska ohitusventtiili ei sulkeutunut, suljettiin samassa linjassa oleva sulkuventtiili ja paineen lasku sekundaaripiirissä loppui. Primaaripiirin paineen stabiloimiseksi käynnistettiin paineistimen apuruiskutus ja yksi pääkiertopumppu normaaliaruiskutuksen tehostamiseksi. Lisäksi pysäytettiin suurikapasiteettinen lisävesipumppu. Primaaripiirin maksimipaine häiriön aikana oli 132,5 bar ja minimilämpötila 218 °C (normaalikäytön paine on 123 bar ja lämpötila noin 300 °C).

Primaaripiirin nopea paineellinen jäähtyminen aikaansaa reaktoripainesäiliön haurasmurtumariskin. Kyseisessä tapauksessa jäähtyminen saatiin keskeytetyksi niin aikaisessa vaiheessa, että lämpötilan laskusta reaktorilaitoksen komponenteille aiheutuneet kuormitukset eivät muodostuneet esteeksi laitosyksikön uudelleen käynnistämiseksi. Henkilökunnan toimenpiteet estivät primaaripiirin paineen nousun niin korkeaksi, että se olisi edellyttänyt varoventtiilin avautumista.

Tapahtuman jälkeen höyrystimen pinnanmittausjärjestelmän putkiin tehtiin rakenteellisia muutoksia, joilla estettiin epäpuhtauksien joutuminen niihin.

## Olkiluoto 2, reaktorin ylipainesuojausjärjestelmän puhallusventtiilien ohjausventtiilien yhteisvika, 1985

Vika havaittiin, kun 10.9.1985 tapahtuneen reaktoripikasulun yhteydessä todettiin yhden primääripiirin ulospuhallusventtiilin jääneen avautumatta sen sähköisen ohjausventtiilin toimimattomuuden vuoksi. Suoritetuissa testauksissa todettiin yhdessä Olkiluoto 1:n sekä kolmessa Olkiluoto 2:n ohjausventtiilissä vastaava ongelma. Viat aiheutuivat kyseisiin ohjausventtiileihin kertyneistä epäpuhtauksista, jotka estivät magneettimäntien liikkeen. Juuttumiseen vaikuttivat käyttöolosuhteisiin sopimaton nikkelpinnoite ja grafiittipohjainen voiteluaine. Vika korjattiin aluksi vaihtamalla ohjausventtiileihin uudet sisäosat ja myöhemmin venttiileihin tehtiin rakenteellisia muutoksia.

Epäpuhtauksien kertymistä voidaan pitää tyyppivikana, jonka seurauksena useat sähkötoimiset ohjausventtiilit olisivat voineet joutua epäkuuntoon. Ulospuhallusjärjestelmän pääventtiileitä ohjataan sähkötoimisten ohjausventtiilien lisäksi painetoimisilla ohjausventtiileillä, jotka varmistavat pääventtiilien aukeamisen, jos paine nousee tiettyyn raja-arvoon. Sähkötoimisen ohjausventtiilin juuttuminen merkitsee sitä, että pääventtiili on vain yhden ohjauksen varassa ja se avautuu vasta suuremmassa paineessa. Ulospuhallusventtiilejä käytetään reaktorin paineen alentamiseen ja jälkilämmön poistoon muun muassa pikasulun jälkeen.

## Loviisa 2, pää- ja hätäsyöttöveden menetys, 1987

Käynnistettäessä Loviisa 2 -laitosyksikköä 10.8.1987 polttoaineenvaihtoseisokin jälkeen avautui turbiinin generaattorikatkaisija. Reaktorin teho oli tuolloin 54 prosenttia ja ainoastaan toinen turbiini oli käytössä. Kuormanmenetyksen seurauksena höyrylinjan paine alkoi nousta ja turbiinien ohitusventtiilit avautuivat. Turbiinien ohituslinjoista virtasi lauhduttimien kautta syöttövesisäiliöihin käyttötilanteesta johtuen normaalia kylmempää vettä, minkä seurauksena syöttövesisäiliöiden paine laski nopeasti. Paineen laskiessa imupuolella pääsyöttövesipumput pysähtyivät niiden painepuolelta tulleesta suojauksesta.

Ohjaaja havaitsi pääsyöttövesipumppujen pysähtymisen ja käynnisti käsin hätäsyöttövesipumput sekä aloitti reaktorin tehon nopean laskemisen. Ohjaaja tulkitsi pääsyöttövesipumppujen pysähtymisen syyksi virhesignaalin ja yritti käynnistää pumput uudelleen. Kaksi neljästä pumpusta käynnistyi.



Pääsyöttöveden palautumisen seurauksena höyrystimien sekundaaripuolelle tuli runsaasti kylmää vettä, mikä yhdessä suhteellisen suuren höyrinkulutuksen kanssa alkoi jäähdyttää voimakkaasti primaaripiiriä. Tästä johtuen paineistimen pinta alkoi laskea ja ohjaaja joutui käynnistämään lisävesipumpun estääkseen paineistimen pinnan laskun hätäjäähdytyspumppujen käynnistysrajalle. Primaaripiirin lisävesipumppu oli kytketty booritonta vettä sisältävään säiliöön. Ohjaajan havaittua tämän hän pysäytti pumpun noin minuutin käytön jälkeen ja kytki sen booripitoista vettä sisältävään säiliöön. Paineistimen pinnan palauduttua normaalisti jatkettiin laitoksen käyttöä normaalisti, koska sekä generaattorikatkaisijan aukeaminen että pääsyöttövesipumppujen pysähtyminen oli aluksi tulkittu virhesignaalista johtuneiksi.

Tapahtuman jälkiselvittelyssä pääsyöttövesipumppujen pysähtymisen todennäköiseksi syyksi todettiin kavitointi, joka oli aiheutunut syöttövesisäiliöiden nopeasta paineenlaskusta ja sitä seuranneesta syöttövesiputkistossa olleen veden höyrystymisestä. Lisäksi havaittiin, että hätäsyöttövedettä oli saatu vain yhteen höyrystimeen; viidessä muussa höyrystimessä olivat hätäsyöttövesilinjojen säätöventtiilit käsiohjauksella ja kiinni.

Tapahtumaan liittyi useita puutteita turvallisuusjärjestelmien toiminnassa. Syöttövesisäiliön paineensäätö toimi tilanteessa liian hitaasti, mikä johti pääsyöttövesipumppujen pysähtymiseen. Primaaripiirin jäähdyttäminen hätäsyöttövedellä ei myöskään onnistunut suunnitellusti kiinni olleiden venttiilien vuoksi. Boorittoman veden pitempiäaikainen syöttö primaaripiiriin olisi saattanut aiheuttaa reaktiivisuustransientin.

## Loviisa 1, hätäjäähdytysvesisäiliön laimentuminen seisokissa, 1988

Loviisa 1 -laitosyksikön vuosihuollon jälkeiseen käynnistykseen liittyen 25.7.1988 poistettiin hätälisävesisäiliön pinnanmittausputkista ilmaa. Ohjeiden mukaan puhallus olisi pitänyt tehdä booripitoisella vedellä. Inhimillisen virheen seurauksena puhallukseen käytettiin kuitenkin puhdasta vettä.

Puhalluksen jälkeen työtä tehnyt instrumenttiasentaja unohti pysäyttää käynnissä olleen puhtaan veden pumpun, jonka seurauksena puhdasta vettä pumppautui instrumenttilinjojen kautta hätäjäähdytysjärjestelmän vesisäiliöön. Tapahtuma havaittiin säiliön pinnan noususta, minkä jälkeen vastaava pumppu pysäytettiin ja linja erotettiin säiliöstä. Pumppa-

uksen seurauksena säiliöön pumpattiin yhteensä 200 m<sup>3</sup> puhdasta vettä ja säiliön boorihappopitoisuus laimeni arvosta 12,6 arvoon 9,2 g/kg. Laitosyksikön turvallisuusteknisten käyttöehtojen mukaan boorihappopitoisuuden tuli olla 12–13 g/kg.

Tapahtuma ei vaarantanut laitosturvallisuutta, mutta osoitti puutteita niissä toimenpiteissä, joilla varmistetaan laitoksen saattaminen ja pitäminen alikriittisenä riittävän booripitoisuuden omaavan veden avulla.

### Olkiluoto 1, pikasulkujärjestelmän vajaatoiminta primaaripiirissä olleen teräs jauhon vaikutuksesta, 1989

Vika havaittiin, kun reaktorin 7.9.1989 tehtyä pikasulkua seuranneen käynnistyksen yhteydessä havaittiin 15 säätösauvan (yhteensä 121:stä) ulosvedossa ongelmia. Säätösauvakoneistojen tarkastuksissa ja myöhemmin tehdyissä analyyseissä takertelun syyksi osoittautui 0,1–0,5 millimetrin raekoon omaava teräs jauho, joka koostumukseltaan vastasi metallipintojen puhdistuksessa käytettävää puhallushiekkaa. Jauheen todellista alkuperää ei saatu varmuudella selville. Jauhetta saatiin seuranneiden puhdistustöiden yhteydessä kerättyä säätösauvakoneistoista ja jälkilämpöpoistojärjestelmästä, reaktoriveden puhdistusjärjestelmästä, pääsyöttövesilinjasta sekä reaktoripainesäiliön sisäpinoilta yhteensä kolme litraa.

Reaktorissa vallitsevat virtaukset ajavat tällaiset epäpuhtaudet kuonatas-kuihin. Niiden täytyttyä epäpuhtaudet saattavat joutua säätösauvakoneistoihin ja vaarantaa niiden toiminnan. Tässä tapauksessa säätösauvojen ulosvetämisen estänyt metallijauhe oli todennäköisesti säätösauvan mäntäputken ja sitä ohjaavan grafiittilaakerin välissä. Säätösauvojen sisäänmeno reaktoriin ei kuitenkaan ollut vaarantunut, koska sauvojen ulosveto tapahtuu niiden omalla painolla mutta työnnettäessä sauvoja sisään on käytettävissä 6–8 -kertainen voima ulos vedettäessä vaikuttavaan voimaan verrattuna. Selvitysten mukaan epäpuhtauksien aiheuttama kuluminen saattaisi kuitenkin heikentää pikasulkutoiminnon luotettavuutta ja pidentää säätösauvojen sisäänmenoajoja.

Laitosyksikön saattamiseksi toimintakuntoon tehtiin mittavat puhdistustyöt. Reaktorin puhdistamiseksi polttoainesauvat siirrettiin pois reaktorista ja säätösauvat irrotettiin yksi kerrallaan. Näin säätösauvojen varsien ympärillä olevat ohjausputket voitiin imuroida reaktoripainesäiliön sisäpuolelta. Kun ohjausputki oli puhdistettu ja säätösauva siirretty takaisin paikalleen, vastaava painesäiliön alapuolella oleva koneisto irrotettiin ja

puhdistettiin. Kaikki kuluneet koneistojen osat vaihdettiin. Järjestelmät, joista metallijauhetta oli löydetty, puhdistettiin ja huuhdeltiin käyttämällä apuna väliaikaisesti asennettuja suodattimia. Puhdistusta seuranneiden koestusten jälkeen reaktori käynnistettiin ja laitos kytkettiin verkkoon 22.10.1989.

## Olkiluoto 2, ulkoisen sähköverkon menetys kytkinlaitoksella sattuneen tulipalon seurauksena, 1991

Olkiluoto 2 menetti 12.4.1991 yhteydet ulkoisiin sähköverkkoihin sähköjärjestelmien mittamuuntajan tulipalon ja siitä seuranneen 6 kV sähkökiskossa tapahtuneen oikosulun takia. Tulipalo saatiin sammumaan noin tunnissa, mutta siitä aiheutuneiden laitehäiriöiden seurauksena yhteydet ulkoisiin 400 kV ja 110 kV sähköverkkoihin menetettiin noin 7,5 tunnin ajaksi. Tämä aikana turvallisuuden kannalta tärkeiden järjestelmien sähkönsyöttö tapahtui neljän dieselgeneraattorin avulla.

Olkiluodon laitoksen tarvitseman sähkön syöttö tapahtuu 6,6 kV omakäyttöverkon avulla. Omakäyttöverkossa on neljä toisistaan erotettua osajärjestelmää. Jokaista osajärjestelmää voidaan syöttää laitosyksikön omalta generaattorilta omakäyttömuuntajan kautta, 400 kV ulkoisesta verkosta ja 110 kV ulkoisesta verkosta. Jos kaikki nämä syöttömahdollisuudet menetetään, varavoimadieselit käynnistyvät automaattisesti.

Palo sai alkunsa omakäyttöverkon yhden sähkökeskuksen mittamuuttajan riviliittimestä. Palon syttymisen syynä oli ilmeisesti edellisenä vuonna koestuksen yhteydessä syntynyt vika. Tulipalo aiheutti valokaarioikosulun ja yhteyden menetyksen 400 kV ulkoiseen verkkoon sekä laitosyksikön omalle generaattorille. Kun palo levisi viereiseen sähkölaitekaappiin, menetettiin yhteys myös 110 kV verkkoon uuden valokaarioikosulun takia. Laitosyksikön varavoimadieselit käynnistyivät normaalisti. Tapahtumista seurasi myös reaktorin pikasulku.

Palo saatiin sammutettua noin 40 minuutin kuluttua sen havaitsemisesta. Ulkoisen verkkoyhteyden palauttaminen kesti kuitenkin yli seitsemän tuntia, sillä vaurioitunut omakäyttökeskus piti ensin erottaa verkosta kaapeleita irrottamalla.

Tapahtuma paljasti puutteita sähköjärjestelmien suunnittelussa. Omakäyttöverkon osajärjestelmien välillä ei ollut riittäviä sähköisiä erotus-

mahdollisuuksia, joten oikosulku yhdessä osajärjestelmässä esti sähkönsyötön muihinkin osajärjestelmiin. Tapahtuman jälkeen omakäyttöjärjestelmien erottelumahdollisuuksia parannettiin. Myös sähkökeskusten paloerottelua parannettiin. Lisäksi tehtiin muutoksia mittamuuntajien koestus- ja tarkastusmenettelyihin.

## Loviisa 2, sekundaariipiirin syöttövesiputken katkeaminen, 1993

Loviisa 2 -laitosyksikön toimiessa täydellä teholla 25.2.1993 syöttövesijärjestelmään kuuluva laippa murtui päittäin. Putkikatko tapahtui käynnistettäessä yhtä syöttövesipumppua imusuodattimien puhdistamisen jälkeen.

Valvomohenkilökunta teki reaktoripikasulun käsin 13 sekuntia putkikatkon jälkeen. Hätäsyöttövesijärjestelmä toimi suunnitellusti ja vuotokohta saatiin erotettua vajaan yhdeksän minuutin kuluttua murtumasta. Toimenpiteet olivat oikeita, nopeita ja tehokkaita eikä prosessin käyttäytymisessä havaittu ongelmia. Murtuma aiheutti lieviä vaurioita murtumakohdan ympäristössä. Henkilövahingoilta vältyttiin.

Vastaava syöttövesiputken katkeaminen oli tapahtunut Loviisa 1 -laitosyksiköllä 28.5.1990. Tapahtumien yhteydessä laitoksen valvomohenkilökunta sekä prosessi- ja turvallisuusjärjestelmät toimivat suunnitellulla tavalla pysäyttäen reaktorin ja eristäen vuodon.

Kummassakin syöttövesiputken katkeamisessa murtumisen syynä oli voimakas eroosiokorroosion aiheuttama putken seinämän ohentuminen. Loviisa 1:n tapahtuman jälkeen toimeenpantiin useita, muun muassa kunnonvalvontaohjelmaa koskevia korjaavia toimenpiteitä. Loviisa 2:lla oli tunnistettu murtuneeseen laippaan liittyvä tarkastus-tarve. Vuoden 1992 tarkastussuunnitelmasta kyseinen laippa oli kuitenkin jätetty pois, koska se virheellisen tulkinnan vuoksi oletettiin tarkastetun edellisenä vuonna.

## KIRJALLISUUTTA

The International Nuclear Event Scale (INES). User's Manual, 2001 Edition. Jointly prepared by IAEA and OECD/NEA. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.

YVL 1.12 Ydinlaitostahtumien kansainvälinen vakavuusluokitus, Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2002.

Suomen ydinvoimalaitosten käyttöä koskevat raportit STL-B-RTO-81/3, 1981; STUK-B-YTO 22, 1985; STUK-B-YTO 44, 1988; STUK-B-YTO 68, 1990; STUK-B-YTO 89, 1991; STUK-B-YTO 108, 1993; STUK-B-YTO 227, 2003, Helsinki: Säteilyturvakeskus.

Haskin FE. Perspectives on nuclear safety. NUREG/CR-6042. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1997.

Thompson TJ, Beckerley JG (eds.). The Technology of nuclear reactor Safety, Vol. 1, Reactor Physics and Control. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1964.

Nuclear Technology 1989; 87.

Takano M et al. Reactivity accident of nuclear submarine near Vladivostok. Journal of Nuclear Science and Technology 2001; 38: 143-157.

ALARA 2/1996, Tshernobyl-teemanumero.

Borovoi A, Sich A. The Chernobyl accident revised, Part II: The state of the nuclear fuel located within the Chernobyl sarcophagus, Nuclear Safety 1995, Vol 36, No 1.

Proceedings of seminar on comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl, Luxemburg, 1-5 October 1990, Vol. 1. Commission of the European Communities.

