

# YDINVOIMALAITOKSEN SIJAINNIPAIKKA JA YMPÄRISTÖN TURVALLISUUS

**Jukka Rossi**  
VTT Energia

Tutkimuksen yhteyshenkilö Säteilyturvakeskuksessa **Lauri Pöllänen**

STUK:n raporttisarjoissa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-476-7 (nid.)

ISBN 951-712-477-5 (pdf)

ISSN 0785-9325

Edita Oyj, Helsinki 2001

ROSSI Jukka (VTT Energia). Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikka ja ympäristön turvallisuus. STUK-YTO-TR 182. Helsinki 2001. 42 s.

**Avainsanat:** ydinvoimalaitoksen sijoitus, ydinturvallisuus, riskiarviointi, säteilysojelu, ympäristövaikutusten arviointi, periaatepäätös

## TIIVISTELMÄ

Raportin tarkoituksena on antaa lukijalle yleiskäsitys ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaan liittyvistä seikoista. Samalla tarkastellaan ydinvoimalaitoksen ja sen sijaintipaikan vaikutusta ympäristön turvallisuuteen.

Ydinvoimalaitoshankkeen toteutuminen edellyttää monia eri lakeihin perustuvia päätöksiä ja lupia, joihin hankkeen suunniteltu sijaintipaikka ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat suurella määrällä. Aluksi on arvioitava hankkeen ja sen vaihtoehtojen ympäristövaikutukset YVA-menettelyssä. Tämän jälkeen voidaan hakea valtioneuvostolta ydinennergialain mukaista periaatepäätöstä, joka eduskunnan on vielä vahvistettava. Periaatepäätöstä harkittaessa arvioidaan yhteiskunnan kokonaisetua ottaen kantaa mm. laitoksen paikkavaihtoehtoihin ja turvallisuuteen. Peruslähtökohtana on, että ydinennergian käytöstä ei saa aiheutua vaaraa ympäristölle, väestölle tai omaisuudelle. Myönteisen periaatepäätöksen jälkeen valtioneuvostolta voidaan hakea rakentamislupaa ja myöhemmin käyttölupaa, jotka tarvitsevat lisäksi tuekseen eri viranomaisilta mm. rakennuslupan ja ympäristöluvan. Myös eräät kansainväliset sopimukset koskevat ydinvoimalaitoshankkeen toteutusta.

Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan on oltava sopiva sähkön tarpeen ja siirtoverkon kannalta sekä sovelluttava teknisesti laitoksen rakentamiseen ja käyttämiseen. Paikan on oltava riittävän turvallinen toisaalta laitosta mahdollisesti uhkaavien ulkoisten tapahtumien kannalta – vaikkakin laitoksen suunnittelussa voidaan osittain varautua niihin – ja toisaalta väestön kannalta. Sijaintipaikan turvallisuuteen liittyviä vaatimuksia on asetettu valtioneuvoston päätöksessä ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevista yleisistä määräyksistä ja Säteilyturvakeskuksen (STUK) ohjeissa. Kansainvälisellä atomienergiajärjestöllä (IAEA) on ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valintaa koskeva turvallisuusstandardi.

Suomessa on kaksi ydinvoimalaitosten sijaintipaikkaa, Olkiluoto Eurajoen kunnassa ja Hästholmen Loviisan kaupungissa, jotka ovat myös ehdolla uuden ydinvoimalaitosyksikön sijaintipaikaksi Teollisuuden Voima Oy:n (TVO) valtioneuvostolle jättämässä periaatepäätöshakemuksessa. Suomen laitospaikat ovat rannikolla, mutta muualla maailmassa laitospaikkoja on myös sisämaassa. Suomen laitospaikkojen ympäristö on suhteellisen harvaan asuttua verrattuna esim. USA:han ja Saksaan. Ulkoisten tapahtumien osalta Suomi on rauhallista aluetta, esim. kallioperä on vakaa ja voimakkaimpia sääilmiöitä ei esiinny. Raportissa tarkastellaan kotimaisten laitospaikkojen lisäksi USA:n, Sveitsin, Saksan ja Ruotsin laitospaikkoja ja niille asetettuja vaatimuksia.

Ydinvoimalaitoksen suunnitteluun, rakentamiseen ja käyttöön sekä näiden valvontaan osallistuvilla henkilöillä ja heidän organisaatioillaan on keskeinen osa turvallisuuden luomisessa, ylläpitämisessä ja kehittämisessä, joten heidän kyvykkyyteensä ja toimintaedellytyksiinsä sekä organisaatioiden laadunhallintamenetelmiin ja turvallisuuskulttuuriin kiinnitetään erityistä huomiota. Laitoksen turvallisuus

perustuu osaltaan suunnitteluperusteisiin, joiden mukaan laitoksen on selviydyttävä riittäväksi katsotulla tavalla häiriö- ja onnettomuustilanteista. Suunnitteluperusteet sisältävät laitoksen sisäisiä tekijöitä ja ulkoisia tekijöitä kuten tulva, maanjäristys ja lentokoneen törmäys. Laitos pyritään rakentamaan siten, että se ei vaurioituisi onnettomuustilanteessa niin pahoin, että radioaktiivisten aineiden päästöä tapahtuisi ympäristöön. Onnettomuutta mahdollisesti seuraavan päästön aiheuttamia ympäristövahinkoja voidaan vähentää sopivilla pelastus- tai säteilysuojelutoimenpiteillä kuten sisätiloihin suojautumisella, joditableteilla ja evakuoinnilla. Suunnitteluperusteiden ja turvallisuusvaatimusten täyttämisen osoittamiseksi tehtävien determinististen analyysien lisäksi ydinvoimalaitokseen liittyviä riskejä arvioidaan laitoskohtaisissa todennäköisyyspohjaisissa turvallisuusanalyyseissä. Näillä analyyseillä on myös huomattava merkitys laitoksen turvallisuutta parantavana tekijänä. Paljastamalla vikaantumisketjuihin johtavat syyt voidaan niitä poistaa laitteistoa korjaamalla ja uusimalla. Raportissa tarkastellaan ydinvoimalaitoksen normaalien ympäristövaikutusten lisäksi eräitä tapahtuneita ydinvoimalaitosonnettomuuksia sekä laskennallisesti arvioituja mahdollisten onnettomuuksien ympäristövaikutuksia ja -riskejä sekä niiden arviointimenetelmiä.

*ROSSI Jukka (VTT Energy). The site of a nuclear power plant and environmental safety. STUK-YTO-TR 182. Helsinki 2001. 42 pp.*

**Keywords:** nuclear power plant siting, nuclear safety, risk assessment, radiation protection and consequence assessment, decision in principle

## ABSTRACT

The purpose of this report is to give the reader a general view of the things associated with the site of a nuclear power plant. In this context the effect of a nuclear power plant and site on environmental safety is considered.

Planning, construction and operating a nuclear power plant require several judgements and licenses based on different laws. The location of the planned nuclear facility project and environmental conditions contribute in great detail to the compliance arguments of permits. At first the environmental impacts of the siting project and its alternatives shall be investigated in the Environmental Impact Assessment procedure. Then the decision in principle according to the Nuclear Energy Act can be applied from the Council of State, the decision shall further be confirmed by Parliament. When the decision in principle is considered the overall good of society shall be assessed by means of considering i.a. site alternatives and safety. The safety related basic principle is that operation of a nuclear power plant may not cause danger to the environment, public or property. After the affirmative principle approval the construction license and later on the operation license can be applied from the Council of State, these licenses need to be supported i.a. by building and environmental licenses of separate authorities. Also some international contracts concern realisation of a nuclear power plant siting.

The nuclear power plant site shall be suitable for the needs of the electricity production and the transmission system and it shall be technically appropriate for building and operation of a power plant. The site shall be safe enough on the other hand from the view of external events threatening the power plant—although one can be partly prepared for these things in the design of the plant—and on the other hand from the point of public safety. Requirements for the safety of the site are directed in the decision of the Council of State's general guidelines concerning nuclear power plant safety and in the guides of the Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). International Atomic Energy Agency (IAEA) has published the Safety Standard concerning the site selection.

There are two nuclear power plant sites in Finland; Olkiluoto in Eurajoki municipality and Hästholmen in the town of Loviisa; both of these are also proposed for the site of a new nuclear power plant unit in the application for decision in principle submitted to the Council of State by Teollisuuden Voima Oy (TVO). The Finnish sites are located on the coast, but in other countries there are also inland sites. The surroundings of the Finnish sites are relatively sparsely populated compared with e.g. the sites in USA and in Germany. Concerning external initial events, Finland is calm area, e.g. bedrock is stable and severe weather phenomena are not occurring.

Persons and their organisations participating in the design, building and operation of a nuclear power plant as well as controlling these activities have an essential role in creating, maintaining and development of safety. Thus particular attention is paid to their ability and operational preconditions as well as

to the quality control methods and safety culture of their organisations. The safety of the plant is based partly on design basis, according to which the plant shall survive in a sufficient way from incidents and accidents. Design bases include internal events of the power plant and external events such as flood, earthquake and crash of an aeroplane. The power plant is aimed to be constructed in such a way that it would not be damaged in an accident to such extent that radioactive material would be released to the environment. Applying appropriate rescue or radiation protection measures such as local sheltering, iodine tablets and evacuation can mitigate offsite damages possibly followed by the release caused by an accident. In addition to deterministic analyses accomplished to prove out the fulfilment of design basis and safety requirements the risks associated with nuclear power plants are assessed in power plant specific probabilistic safety analyses. These analyses also have a remarkable significance as a factor improving the safety of the plant. By revealing the causes resulting in fault chains those can be removed by repairing and renewing equipment. Besides normal environmental impacts of the nuclear power plant a few nuclear power plant accidents occurred in the past are considered. Furthermore, assessment methods and results of numerical estimation of environmental impacts and risks from hypothetical accidents are described in the report.

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
SISÄLLYSLUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 YDINVOIMALAITOKSEN SIJAINNIPAIKKA	10
2.1 Lupa- ja päätösmentelyt	10
2.2 Sijaintipaikan valintaan liittyviä tekijöitä	11
2.2.1 Sijaintipaikkaa koskevat turvallisuusvaatimukset Suomessa	11
2.2.2 IAEA:n suositukset sijaintipaikan valintaan	12
2.3 Suomen laitospaikkojen ympäristöt	15
2.4 Sijaintipaikat muualla	17
2.4.1 USA	17
2.4.2 Sveitsi	18
2.4.3 Saksa	19
2.4.4 Ruotsi	20
2.5 Sijaintipaikkojen väestömäärien vertailu	22
3 YDINVOIMALAITOKSEN TURVALLISUUS	23
3.1 Yleisiä ydinturvallisuusperiaatteita ja -vaatimuksia	23
3.2 Vakavat reaktorionnettomuudet	25
3.3 Reaktorionnettomuuksien seurausten rajoittaminen	26
3.4 Ympäristövaikutuksia lieventävät toimenpiteet	27
4 ONNETTOMUUSRISKIN ARVIOINTI	29
4.1 PSA-tasojen 1, 2 ja 3 tutkimusmenetelmien kuvaus ja keskeiset tavoitteet	29
4.2 Päästöjen ympäristövaikutusten laskennallinen arviointi	30
5 YDINVOIMALAITOKSEN MERKITYS YMPÄRISTÖSSÄ	33
5.1 Ydinvoimalaitoksen normaalit vaikutukset ympäristössä	33
5.2 Tapahtuneita ydinvoimalaitosonnettomuuksia	33
5.3 Tutkimuksia onnettomuuksien mahdollisista ympäristövaikutuksista	34
5.3.1 Suomalaiset tutkimukset	35
6 YHTEENVETO	38
LÄHDELUETTELO	40





# 1 JOHDANTO

Teollisuuden Voima Oy (TVO) jätti 15.11.2000 valtioneuvostolle periaatepäätöshakemuksen uudesta ydinvoimalaitosyksiköstä. Laitosyksikön sijaintipaikkavaihtoehtoina ovat Suomen nykyisten ydinvoimalaitosten sijaintipaikat Hästholmen Loviisan kaupungissa ja Olkiluoto Eurajoen kunnassa. Periaatepäätöksen valmistelua hoitaa kauppa- ja teollisuusministeriö, joka on pyytänyt lausuntoja eri tahoilta. Mikäli valtioneuvoston päätös on myönteinen, on se viipymättä saatettava eduskunnan tarkastettavaksi, jolloin eduskunta voi joko vahvistaa sellaisenaan päätöksen tai kumota sen.

Tämän tutkimusraportin tarkoitus on antaa lukijalle yleiskäsitys ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaan liittyvistä seikoista sekä ydinvoimalaitoksen ja sen sijaintipaikan vaikutuksesta ympäristön turvallisuuteen. Vastauksia annetaan esimerkiksi seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä vaatimuksia sijaintipaikalle on asetettu?
- Mikä merkitys sijaintipaikalla on ydinvoimalaitoksen turvallisuuden kannalta?
- Millaisille paikoille ydinvoimalaitoksia on rakennettu?
- Millaisia ympäristövaikutuksia – toteutuvia ja mahdollisia – ydinvoimalaitoksella on, miten näitä vaikutuksia arvioidaan ja miten haitallisia vaikutuksia ehkäistään ja rajoitetaan?
- Miten sijaintipaikka hyväksytään, ja mitä sijaintipaikkaan liittyviä selvityksiä tarvitaan tällöin?

Ydinvoimalaitoshankkeen toteutuminen Suomessa edellyttää monivaiheista lupa- ja päätösmenettelyä. Myös kansainvälisiä sopimuksia tulee noudattaa. Myönteinen periaatepäätös olisi vasta ensiaskel lupa- ja päätöskehjussa, joka lopulta mahdollistaisi laitoksen rakentamisen ja käyttöönoton. Hankkeen kohteena olevan laitoksen sijaintipaikka ja sen ympäristöolosuhteet vaikuttavat suuressa määrin lupien myöntämiseen. Sijaintipaikalle asetetaan sekä yleisiä että laitoksen turvallisuuteen liittyviä vaatimuksia. Ympäristön säteilyturvallisuuteen liittyvien vaatimusten arvioinnissa lähtökohtana ovat sekä laitoksen sisäiset että ulkoiset tapahtumat. Peruslähtökohta on, että ydinvoiman käytöstä ei saa aiheutua vaaraa ympäristölle, väestölle tai omaisuudelle.

Tässä raportissa tarkastellaan ydinvoimalaitosta, sen ympäristöä sekä näiden vuorovaikutusta. Raportissa käsitellään sijaintipaikalta vaadittavia ominaisuuksia, lupa- ja päätösmenettelyä, sijaintipaikkaratkaisuja, ympäristövaikutusten arviointimenetelmiä sekä reaktoriturvallisuutta. Lisäksi luodaan katsaus tehtyihin ympäristövaikutusten arviointeihin ja esitellään ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan ympäristöriskeihin vaikuttavia tekijöitä erityisesti Suomen olosuhteita ajatellen. Edelleen pyritään arvioimaan, riippuvatko sijaintipaikan ympäristöriskit joistakin tunnetuista ympäristön piirteistä.

## 2 YDINVOIMALAITOKSEN SIJAINNIN

### 2.1 Lupa- ja päätösmenettelyt

Seuraavassa tarkastellaan ydinvoimalaitoksen lupa- ja päätösmenettelyjä erityisesti sijaintipaikan hyväksynnän ja sijaintipaikkaan liittyvien selvitysten kannalta.

Ydinenergialain 6 §:ssä vaaditaan, että ”ydinenergian käytön on oltava turvallista eikä ihmisille, ympäristölle tai omaisuudelle saa aiheutua vahinkoa”. Tämän vaatimuksen täyttymistä valvotaan ydinvoimalaitoksen rakentamista ja käyttöä edeltävissä lupa- ja päätösmenettelyissä sekä laitoksen rakentamisen, käytön ja käytöstä poiston yhteydessä.

Ydinvoimalaitoshankkeen varsinaisia lupamenettelyjä edeltää hankkeen ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) ja valtioneuvostolta haettava periaatepäätös siitä, että laitoksen rakentaminen on yhteiskunnan kokonaisedun mukaisinta.

Ydinvoimalaitoshankkeen varsinaisten vaihtoehtojen lisäksi YVA:ssa tarkastellaan hankkeen sijaintipaikkavaihtoehtoja. Jo tässä vaiheessa tarvitaan monipuolisia tietoja ympäristöstä koskien esim. radioaktiivisten aineiden päästöjen kulkeutumista ja vaikutusten arviointia, onnettomuusriskiin vaikuttavia laitoksen ulkoisia tekijöitä ja väestöön kohdistuvien säteilysuojelutoimenpiteiden (pelastustoimenpiteiden) toteuttamismahdollisuuksia.

Ydinvoimalaitoshanketta koskee Yhdistyneiden kansakuntien (YK) Euroopan talouskomission (ECE) ns. Espoon sopimus (Yleissopimus valtioiden rajat ylittävien ympäristövaikutusten arvioinnista, 25.2.1991, SopS n:o 67/1997). Suomen YVA-lain mukaan ympäristöministeriön on ilmoitettava hankkeesta niille valtioille, joiden alueella hankkeesta todennäköisesti aiheutuu merkittäviä ympäristövaikutuksia. Kyseiset valtiot voivat halutessaan osallistua hankkeen YVAan.

Periaatepäätöshakemukseen liitetään ympäristövaikutusten arvioinnista valmistuva YVA-selostus, jossa esitetään muun muassa

- tiedot hankkeen sijainnista
- selvitys ympäristöstä
- arvio hankkeen ja sen vaihtoehtojen ympäristövaikutuksista sekä
- ehdotus toimiksi, joilla ehkäistään ja rajoitetaan haitallisia ympäristövaikutuksia.

Suunniteltua sijaintipaikkaa koskien periaatepäätöshakemukseen liitetään YVA-selostuksen lisäksi

- yleispiirteinen selvitys paikan omistus- ja hallintasuhteista
- selvitys paikan ja sen lähiympäristön asutuksesta ja muista toiminnoista sekä kaavoitusjärjestelyistä
- arvio paikan sopivuudesta tarkoitukseensa ja laitoksen sijoittamisesta aiheutuvista rajoituksista maankäytölle lähiympäristössä
- selvitys suunnitteluperusteista, joita hakija aikoo noudattaa ympäristövahinkojen välttämiseksi ja ympäristörajoituksen rajoittamiseksi.

Selvityksiä pidetään ajan tasalla, laajennetaan ja syvennetään tarvittaessa rakentamis- ja käyttöluvia koskevien menettelyjen yhteydessä ja ydinvoimalaitoksen käytön aikana.

Kauppa- ja teollisuusministeriö hankkii periaatepäätöshakemuksesta alustavan turvallisuusarvion Säteilyturvakeskukselta (STUK) ja lausunnot ainakin ympäristöministeriöltä sekä suunnitellun sijaintikunnan kunnanvaltuustolta ja naapurikunnilta. Periaatepäätöksen tekemisen edellytyksenä on sijaintikunnan puoltava lausunto ja se, että esiin ei ole tullut seikkoja, jotka osoittaisivat, ettei ole riittäviä edellytyksiä rakentaa ydinvoimalaitosta siten kuin ydinenergialain 6 §:ssä edellytetään. Eduskunta voi kumota tai vahvistaa periaatepäätöksen sellaisenaan.

Myönteisen periaatepäätöksen jälkeen valtioneuvostolta voidaan hakea ydinvoimalaitoksen rakentamislupaa ja myöhemmin käyttö lupaa. Rakentamis- ja käyttö lupahakemusten yhteydessä STUKille on toimitettava hyväksyttäväksi ympäristön turvallisuutta koskevat yksityiskohtaiset analyysit. Sijaintipaikkaa ja sen ympäristöä koskien ydinvoimalaitoksen rakentamiseen ja käyttöön liittyvät ydinennergialain ja -asetuksen lisäksi muun muassa

- säteilylaki ja -asetus
- maankäyttö- ja rakennuslaki sekä -asetus (rakennuslupa, kaavoitus)
- ympäristönsuojelulaki (ympäristölupa)
- vesilaki (vesilupa)
- pelastustoimilaki sekä -asetus.

Euroopan atomienergiayhteisön (Euratom) perustamissopimuksen artiklan 37 mukaan jäsenvaltion on toimitettava komissiolle yleiset tiedot missä tahansa muodossa olevan radioaktiivisen jätteen hävittämistä koskevista suunnitelmista sen arvioimiseksi, aiheuttaako suunnitelman toteuttaminen veden, maaperän tai ilman radioaktiivista saastumista toisen jäsenvaltion alueella. Komissio antaa lausuntonsa kuuden kuukauden kuluessa kuultuaan asiantuntijaryhmää. Komissio on antanut artiklan soveltamisesta suosituksia, joista viimeisin on vuodelta 1999 (1999/829/Euratom). Artiklan tulkitaan koskevan myös radioaktiivisten aineiden päästöjä, joten ydinvoimalaitoshankkeesta on annettava komissiolle ennen rakentamisluvan myöntämistä tietoja muun muassa laitoksen sijainnista, ympäristön ominaispiirteistä ja päästöistä.

Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ydinturvallisuutta koskeva yleissopimus, joka astui voimaan Suomessa vuonna 1996 (SopS n:o 74/1996), tarjoaa myös mahdollisuuden sopimusvaltioiden väliseen tiedonvaihtoon ydinvoimalaitoshankkeen yhteydessä (STUK 1998a).

Tämän tutkimusraportin valmistuessa Teollisuuden Voima Oy:n (TVO) 15.11.2000 valtioneuvostolle jättämä periaatepäätöshakemus uudesta ydinvoimalaitosyksiköstä (TVO 2000) on kauppa- ja teollisuusministeriön käsittelyssä. Kauppa- ja teollisuusministeriö on pyytänyt hakemuksesta tarvittavat lausunnot. Laitosyksikön sijaintipaikkavaihtoehtoina ovat Suomen nykyisten ydinvoimalaitosten sijaintipaikat Hästholmen Loviisan

kaupungissa ja Olkiluoto Eurajoen kunnassa. Periaatepäätöshakemuksen liitteinä ovat kumpakin sijaintipaikkaa koskevat YVA-selostukset (Forum 1999, TVO 1999).

## 2.2 Sijaintipaikan valintaan liittyviä tekijöitä

Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaan kohdistuu monia erityyppisiä vaatimuksia. Paikan on muun muassa

- oltava sopiva sähkön tarpeen ja siirtoverkon kannalta
- sovelluttava teknisesti laitoksen rakentamiseen ja käyttämiseen, esimerkiksi jäähdytysveden saannin on oltava turvattu ja liikenneyhteyksien järjestettävissä
- oltava riittävän turvallinen toisaalta laitosta mahdollisesti uhkaavien ulkoisten tapahtumien kuten maanjäristysten kannalta ja toisaalta väestön kannalta, esimerkiksi harvaan asuttu ympäristö edesauttaa onnettomuustilanteessa pelastustoimenpiteiden toteutusta
- sovelluttava maankäyttösuunnitelmien osalta laitoksen rakentamiseen.

Seuraavissa kohdissa 2.2.1 ja 2.2.2 tarkastellaan lähemmin ydinvoimalaitoksen sijaintipaikalle Suomen säädöksissä sekä STUKin ohjeissa asetettuja turvallisuusvaatimuksia ja yleisemmin sijaintipaikan valintaa Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) turvallisuusstandardin pohjalta.

### 2.2.1 Sijaintipaikkaa koskevat turvallisuusvaatimukset Suomessa

Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ydinturvallisuutta koskevassa yleissopimuksessa, joka astui voimaan Suomessa vuonna 1996, on esitetty ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valintaan liittyen yleinen vaatimus arvioida kaikkia olennaisia paikkaan liittyviä tekijöitä, jotka vaikuttavat laitoksen turvallisuuteen (STUK 1998a).

Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaa koskevia vaatimuksia on esitetty valtioneuvoston päätöksessä ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevista yleisistä määräyksistä (395/91) ja STUKin ohjeissa YVL 1.10 (VNP 1991a, STUK 2000a).

Valtioneuvoston päätöksen mukaan ydinvoimalaitoksen tärkeimmät turvallisuustoiminnot on

voitava toteuttaa laitospaikalla mahdollisiksi arvioituista luonnonilmiöistä tai muista laitoksen ulkoisista tapahtumista huolimatta. Lisäksi on otettava huomioon laitoksen sisäisistä syistä aiheutuneissa onnettomuustilanteissa vallitsevien olosuhteiden ja luonnonilmiöiden vaikutusten mahdollisiksi katsotut yhdistelmät.

Ohjeen YVL 1.10 mukaan luvanhakijan on karotettava ydinvoimalaitoksen ulkoiset tapahtumat, jotka voivat uhata turvallisuutta kyseisellä sijaintipaikalla sekä arvioitava riskit näistä tapahtumista. Tällöin on otettava huomioon myös vaikutukset jäähdytysveden saantiin ja sähköverkkoyhteyksiin. Kartoituksessa tulee ottaa huomioon vaarallinen teollisuus, liikenne ja poikkeukselliset luonnon tapahtumat kuten esimerkiksi:

- jäähdytysveden sisäänoton jäätyminen tai muu tukkeutuminen
- myrsky
- lumikuormitus
- tulva
- alhainen meren pinta
- maanjäristykset.

Ohjeessa YVL 1.10 vaaditaan, että laitosaluetta ympäröi suojavyöhyke, joka ulottuu noin 5 kilometrin etäisyydelle laitoksesta. Suojavyöhykkeellä on voimassa maankäyttöön kohdistuvia rajoituksia. Sille ei saa sijoittaa tiheää asutusta, sairaaloita tai laitoksia, joissa käy tai oleskelee huomattavia ihmismääriä. Suojavyöhykkeelle ei myöskään tule sijoittaa sellaisia merkittäviä tuotannollisia toimintoja, joihin ydinvoimalaitoksen onnettomuus voisi vaikuttaa. Pysyvien asukkaiden määrä tulisi pitää pienempänä kuin 200. Loma-asutusta tai vapaa-ajan toimintaa voi tällä alueella olla enemmän, mikäli kyseiselle alueelle voidaan laatia asianmukainen pelastussuunnitelma.

Sisäasiainministeriö on määritellyt noin 20 km:n etäisyydelle laitoksesta ulottuvan varautumisalueen, jolle viranomaisten on laadittava väestönsuojelua koskevat yksityiskohtaiset pelastussuunnitelmat. Viranomaiset myös vastaavat pelastussuunnitelmien toteuttamisesta. Toteutuksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota laitospaikan lähiympäristön erityispiirteisiin, kuten esimerkiksi vaikeakulkuihin saaristo-olosuhteisiin ja loma-asutukseen. Varautumisalueella ei saa sijaita sellaista väestömäärää eikä asutuskeskusta,

joita koskevia pelastustoimenpiteitä ei voida toteuttaa tehokkaasti.

Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyturvallisuuksi sekä luvanhaltijan valmiussuunnitelmia (suunnitelmat valmiusjärjestelyistä eli ydinvahtien rajoittamiseksi tarvittavista toimenpiteistä) koskevat lisäksi valtioneuvoston päätös (397/1991) ydinvoimalaitosten valmiusjärjestelyjä koskevista yleisistä määräyksistä ja ohjeet YVL 7.1–7.8 (VNP 1991b, STUK 1992b, 1997a, 1997b, 1997c, 1990, 1992a, 1995a, 1995b):

- YVL 7.1, Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyaltistuksen ja radioaktiivisten aineiden päästöjen rajoittaminen
- YVL 7.2, Ydinvoimalaitoksen ympäristön väestön säteilyannosten arviointi
- YVL 7.3, Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen leviämisen laskennallinen arviointi
- YVL 7.4, Ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelyt
- YVL 7.5, Ydinvoimalaitoksen meteorologiset mittaukset
- YVL 7.6, Ydinvoimalaitoksen päästöjen mittaukset
- YVL 7.7, Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyvalvonta
- YVL 7.8, Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyturvallisuusraportointi.

Ydinvoimalaitoksen ulkoisten tapahtumien huomioon ottamista käsittelevät ohjeet YVL 2.6 ”Maanjäristysten huomioon ottaminen ydinlaitoksissa” (STUK 1988, 2001) ja YVL 2.8 ”Todennäköisyyspohjaiset turvallisuusanalyysit” (STUK 1996a).

## 2.2.2 IAEA:n suositukset sijaintipaikan valintaan

Seuraavassa esitellään Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) turvallisuusstandardin pohjalta (IAEA 1988), kuinka ympäristötekijät suositellaan otettavaksi huomioon ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valinnassa. Standardi on otettu huomioon suomalaisia turvallisuusvaatimuksia kehitettäessä.

Standardin yleiset vaatimukset koskevat

- sijaintipaikkojen valintaa ja niiden sopivuuden

arviointia ydinvoimalaitoksen rakentamista ja käyttöä varten

- sijaintipaikkaan liittyvien turvallisuusvaatimusten määrittelyä
- sijaintipaikan hyväksyttävyyden arviointia tietyille ydinvoimalaitokselle.

Erityiset vaatimukset koskevat

- sijaintipaikan alueen vaikutusta laitokseen
- laitoksen vaikutusta sijaintipaikan alueeseen
- väestöksymyksiä.

IAEA korostaa, että standardi koskee lähinnä niiden sijaintipaikkojen yksityiskohtaista arviointia, jotka on valittu suuremmasta ehdokasjoukosta lopulliseen arviointiin. Lisäksi todetaan, että standardissa on olennaista niiden paikkakohtaisten tekijöiden arviointi, jotka tulee ottaa huomioon, kun laitoksen sijainnista aiheutuvat riskit pyritään pitämään hyväksyttävällä tasolla koko laitoksen käyttöajan ajan. Standardissa käsitellään vain säteilyturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Turvallisuuden osalta sijaintipaikka on hyväksyttävissä, jos laitosta voidaan käyttää niin, että alueen väestöön kohdistuu hyväksyttävän alhainen riski. Standardin vaatimukset koskevat pääasiassa vakavia tapahtumia, joilla on pieni todennäköisyys. Koska IAEA käsittelee sijaintipaikan valintaa maailmanlaajuisesti, eivät kaikki standardin vaatimukset ole merkityksellisiä Suomen olosuhteissa (kuten varautuminen trooppisiin sykloneihin).

Standardin tarkoituksena on antaa arviointiperusteita ja menettelyitä, joiden pohjalta IAEA:n jäsenvaltiot voivat kehittää perusvaatimukset seuraaviin tarpeisiin:

- hakijan esittämien, ehdotettua sijaintipaikkaa koskevien tietojen laajuuden määrittely
- ehdotetun sijaintipaikan arviointi, jolla varmistetaan sijaintipaikkaan liittyvien ilmiöiden ja ominaispiirteiden riittävä huomioon otto
- alueen väestön ominaispiirteiden sekä valmius- ja pelastussuunnitelmien käytännön toimenpanoedellytysten arviointi
- sijaintipaikkakohtaisten suunnitteluperusteiden määrittely
- hakijan ja valvovan viranomaisen roolien määrittely sijaintipaikan arviointia varten.

Laitoksen rakentamista esittävän hakijan on sijaintipaikan osalta osoitettava, että laitos voidaan

rakentaa ehdotetulle paikalle ja että laitosta voidaan käyttää siellä turvallisesti koko suunnittelun käyttöajan ajan. Valvovan viranomaisen on huolehdittava, että sijaintipaikkaan liittyvät tiedot, laskelmat ja arvioinnit mukaan lukien, tarkistetaan riippumattomasti ja perusteellisesti, jotta voidaan varmistua sijaintipaikan turvallisuudesta. Mikäli laitoksella voisi olla merkittävää vaikutusta naapurimaahan, olisi valvovan viranomaisen kiinnitettävä sopivien viranomaisten huomiota kansainvälisten neuvottelujen tarpeeseen.

Ydinturvallisuuden kannalta päätavoitteena ydinvoimalaitoksen paikanvalinnassa on väestön ja ympäristön suojelu onnettomuudessa vapautuvilta radioaktiivisilta aineilta, mutta myös normaalit radioaktiiviset päästöt on otettava huomioon. Sijaintipaikan soveltuvuutta arvioitaessa on otettava huomioon

- alueen luonnosta tai ihmisestä johtuvien ydinlaitoksen ulkoisten tapahtumien vaikutus
- sijaintipaikan ja sen ympäristön ominaisuudet, jotka voivat vaikuttaa radioaktiivisten aineiden siirtymiseen ihmiseen
- väestötiheys ja -jakauma sekä muut ympäristön ominaisuudet, jotka voivat vaikuttaa valmiusjärjestelyjen ja pelastustoimenpiteiden toteuttamiseen sekä yksilö- ja väestöriskien arviointitarpeeseen.

Standardin yleisistä vaatimuksista voidaan todeta, että sijaintipaikan ja sen ympäristön ominaisuuksia tulee arvioida ja seurata koko ydinlaitoksen käytön ajan. Sijaintipaikan turvallisuuteen vaikuttavien luonnon ja ihmisen aiheuttamien laitoksen ulkoisten tapahtumien taajuutta ja suuruutta on tutkittava. Turvallisuuteen liittyvien ympäristötekijöiden muuttumista, erityisesti väestön osalta, on arvioitava ja tarvittaessa alhainen riskitaso on säilytettävä sopivin toimenpitein. Suunnittelun perustana pidettävät ulkoiset tapahtumat on määriteltävä sijaintipaikalle. Ulkoiset tapahtumat eivät saa aiheuttaa suurempaa säteilyriskiä kuin laitoksen sisäiset tapahtumat. Suunnitteluperustaiset ulkoiset tapahtumat otetaan huomioon laitoksen suunnittelussa siten, että laitoksen turvallisuudelle tärkeät rakenteet, järjestelmät ja komponentit säilyttävät toiminnallisuutensa suunnitteluperustaisen onnettomuuden yhteydessä. Sijaintipaikan soveltuvuusarvioissa tu-



lee myös kiinnittää huomiota tuoreen ja käytetyn polttoaineen sekä radioaktiivisen jätteen varastointiin ja kuljetukseen. Normaalikäytön ja onnettomuustilanteiden aiheuttamia mahdollisia säteilyvaikutuksia väestölle on arvioitava ottaen huomioon väestöjakaumat, elinolosuhteet ja ruokailutottumukset. Laadunvarmistusohjelmaa on sovellettava kaikkiin turvallisuutta sekä suunnitteluperustaisten parametrien määrittelyä koskeviin toimintoihin.

Seuraavien ulkoisten tapahtumien huomioonottamiselle on asetettu yksityiskohtaisempia vaatimuksia:

- sateista tai muista syistä aiheutuvat tulvat
- maajärityksen aiheuttamat hyökyaallot
- vesistön säännöstelyjärjestelmän vikaantumisesta aiheutuvat tulvat ja aallot
- maanpinnan siirtymä
- maanvyörymä
- maanpinnan vajoaminen, painuminen tai nouseminen
- maanjäritykset
- maaperän liettyminen
- tornadot
- trooppiset syklonit
- muut merkittävät luonnon ilmiöt ja ääriolosuhteet (vulkanismi, voimakkaat tuulet, lumi, jää jne.)
- lentokoneen törmäys
- kemialliset räjähdykset
- paikkakohtaiset tekijät, jotka vaikuttavat lämmönpoistoon reaktorista pitkällä aikavälillä
- muut merkittävät ihmisen aiheuttamat tapahtumat (haitalliset päästöt, missiilit)
- perustusmateriaalien käyttäytyminen.

Edellä mainitusta luettelosta voidaan tarkastella lähemmin joitakin esimerkkejä. *Maanjärityksiin* tulee varautua. Maanjäritysten esiintymistä voidaan arvioida alueella tehtyjen havaintojen pohjalta. Historialliset maanjäritykset tiedetään vain perimätiedon pohjalta mutta viime vuosisadalla niitä alettiin rekisteröidä myös mittausinstrumentoinnin avulla. Alueen geologiset tiedot auttavat myös järitysten arvioinnissa. Suunnitteluperustainen maanjäritys tulee määritellä. Sijaintipaikalla mahdollisesti tapahtuvien *tulvien* seuraukset esimerkiksi sateen, korkean vedenpinnan, padon murtumisen tai hyökyaallon takia on arvioitava. Myös maanjärityksen tai myrskyn aiheuttama hyökyaalto on otettava huomioon. Näiden

esiintymistä voidaan arvioida historian avulla, jonka perusteella voidaan laskea suunnitteluperustainen tulva, jonka vaikutus laitoksen toimintaan tulee arvioida. *Lentokoneen törmäys* ydinvoimalaitokseen kuuluu myös suunnitteluperustaisiin onnettomuuksiin. Törmäysriski riippuu lentoliikenteen määrästä laitoksen lähialueella. Sijaintipaikan lähistöllä tapahtuvan kemikaalien käsittelyn, prosessoinnin, kuljetuksen tai varastoinnin yhteydessä tapahtuva *tulipalo tai räjähdys* voisi aiheuttaa kaasupilven muodostumisen, joka voisi aiheuttaa vaaraa sijaintipaikalla. Kemiallisen räjähdyspainevaikutus ja myrkyllisen päästön vaikutus sijaintipaikan lähistöllä tulee sisällyttää suunnitteluperusteisiin. Kaikissa käyttötilanteissa tulee turvata reaktorin *riittävä jäähditys*. Lämmönpoistoon tarvittava jäähditysvesi otetaan usein merestä, jolloin sen saatavuus katsotaan turvatuksi. Mikäli käytetään jäähdystorneja, jossa kiertovesi jäähdytetään ilmapirtauksella, pitää pystyä korvaamaan ilmaan haihtunut vesi. Usein jäähdystorneihin perustuvat ratkaisut on sijoitettu vesistön tai joen rannalle, jolloin vesitäydennystä on saatavilla.

Standardissa käsitellään yksityiskohtaisemmin myös radioaktiivisten päästöjen vaikutusten arviointiin liittyvien tietojen keräämistä (aineiden leviäminen ilmakehässä, pinta- ja pohjavesissä, väestöjakauma, maa- ja vesialueiden käyttö ja ympäristössä vallitseva radioaktiivisuus). Sijaintipaikan tilastollinen sääjakauma tulee kerätä ja tallettaa tarkoitukseen sopivan instrumentoinnin avulla. Tämän jakauman ja sopivien leviämismallien avulla on arvioitava radioaktiivisten aineiden leviämistä ympäristöön. Radioaktiivisten aineiden leviäminen pinta- ja pohjavesien sekä ilmapirtausten mukana sekä mahdollinen vaikutus väestöön tulee myös arvioida malleilla. Malleissa tulee ottaa huomioon mahdolliset laimentumis- ja rikastumisilmiöt. Ympäristön väestötiedot ja niiden ennuste on pidettävä ajan tasalla. Tämä sisältää vakituisen asujaimiston lisäksi myös vapaa-ajan asukkaat sekä arvioitavat tilapäiset oleskelijat. Sijaintipaikan ympäristössä voidaan harjoittaa selaista toimintaa tai elinkeinoja, jotka voivat häiriintyä ydinvoimalaitoksella tapahtuvan onnettomuuden seurauksena. Jotta sijaintipaikan vaikutukset ympäristöön normaalitoiminnan osalta sekä mahdollisen onnettomuustilanteen osalta voidaan arvioida, tulee ympäristön maan ja vesialueen käyttöä selvittää. Tähän sisältyy:

- maatalouteen käytetyn maa-alueen käyttötavat ja tuotanto
- maidontuotantoon käytetyn maan koko ja tuotanto
- kaupalliseen, asumiseen ja virkistykseen käytetyn maan luokittelu ja koko
- vesialueiden käyttö ammatti- ja urheilukalastukseen, sisältäen saalislajien nimeämisen ja tuoton
- vesialueiden käyttö kaupalliseen tarkoitukseen kuten merenkulkuun, veden tuotantoon tai virkistykseen
- maa- ja vesialueen tarve eläimistölle ja
- suorat ja epäsuorat ravintoaineiden kontaminoitumisreitit.

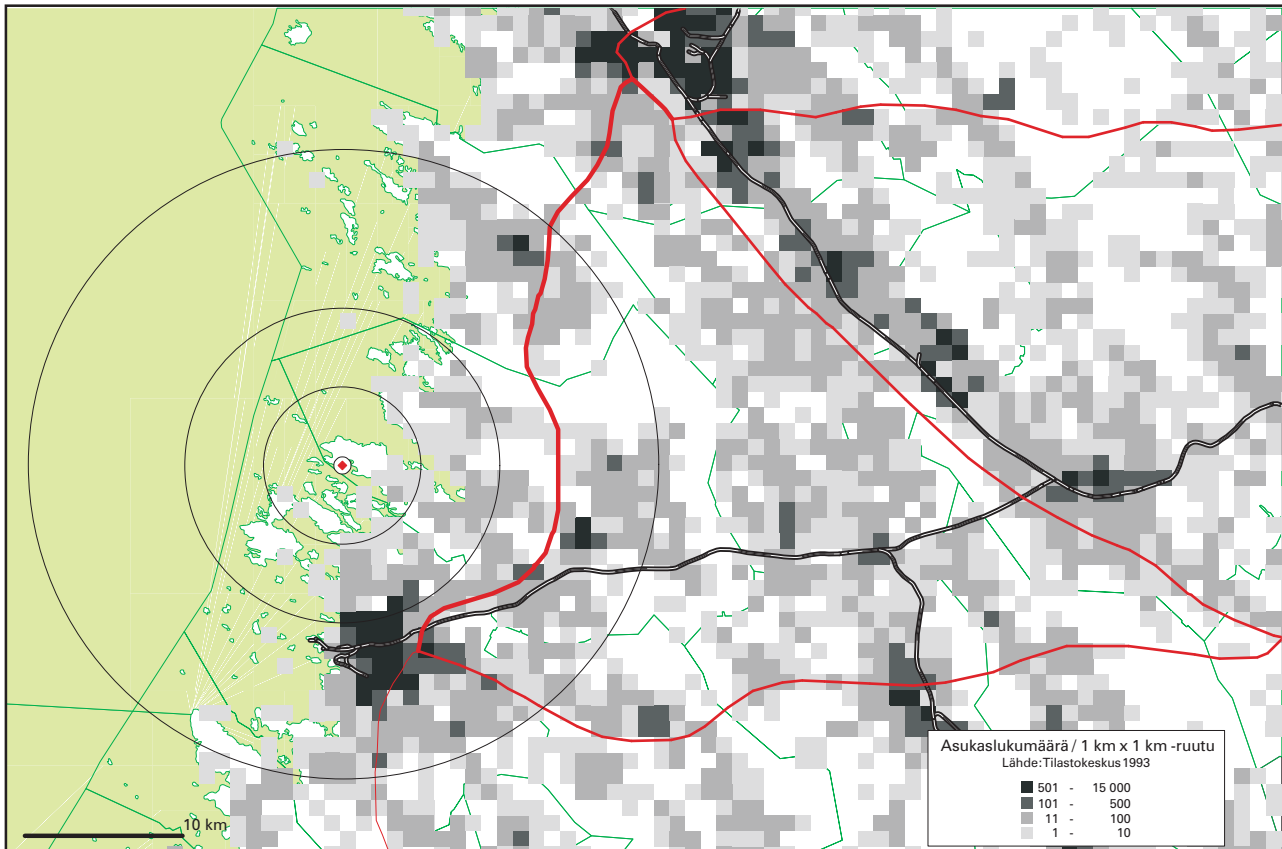
Ennakolta on arvioitava laitoksen säteilyvaikutukset ympäristöön sekä normaalikäytön aikana että onnettomuustilanteissa, jolloin myös mahdollisten pelastustoimenpiteiden vaikutusta on arvioitava. Ennakolta on kartoitettava mahdollisia ulkoisia tekijöitä, jotka voisivat vaikeuttaa valmius- ja pelastussuunnitelmien toimivuutta. On arvioitava valmius- ja pelastussuunnitelmien toimivuutta myös oletetun vakavan reaktorionnettomuuden yhteydessä. Arvioinnissa on otettava huomioon vä-

estötiheys ja -jakauma, asutuskeskukset, lähialueen teollisuus- ja muilla laitoksilla olevat henkilöt sekä näiden arvioitut tulevat määrät. Lisäksi on otettava huomioon maantieteelliset erikoispiirteet ja vaikeakulkuiset alueet kuten saaristo, joet ja metsät esimerkiksi kelirikon aikaan. Myös radioaktiivisten aineiden päästön vaikutus ympäristön talouteen, teollisuuteen, maatalouteen ja ekologian pitemmällä aikajaksolla on arvioitava.

## 2.3 Suomen laitospaikkojen ympäristöt

Hästholmenin ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten ympäristö on kuvattu niiden ajan tasalla pidettävissä lopullisissa turvallisuusselosteissa (IVO 1996, TVO 1997a) sekä myös uutta ydinvoimalaitosyksikköä käsittelevissä YVA-selostuksissa (Fortum 1999, TVO 1999).

Olkiluodon ympäristön asukastiheysjakauma on esitetty kuvassa 1 (Huovinen 2000). Kuvassa asukastiheys on esitetty kilometri kertaa kilometri ruudukossa. Vakituksia asukkaita on viiden kilometrin säteellä laitoksesta suhteellisen vähän eli noin 70 (TVO 1997a). Noin yhdeksän kilometrin etäisyydellä alkaa Rauman kaupungin vaikutus ja



**Kuva 1.** Olkiluodon ympäristön asukastiheysjakauma (Huovinen 2000). Ympyröiden säteet ovat 5, 10 ja 20 km.

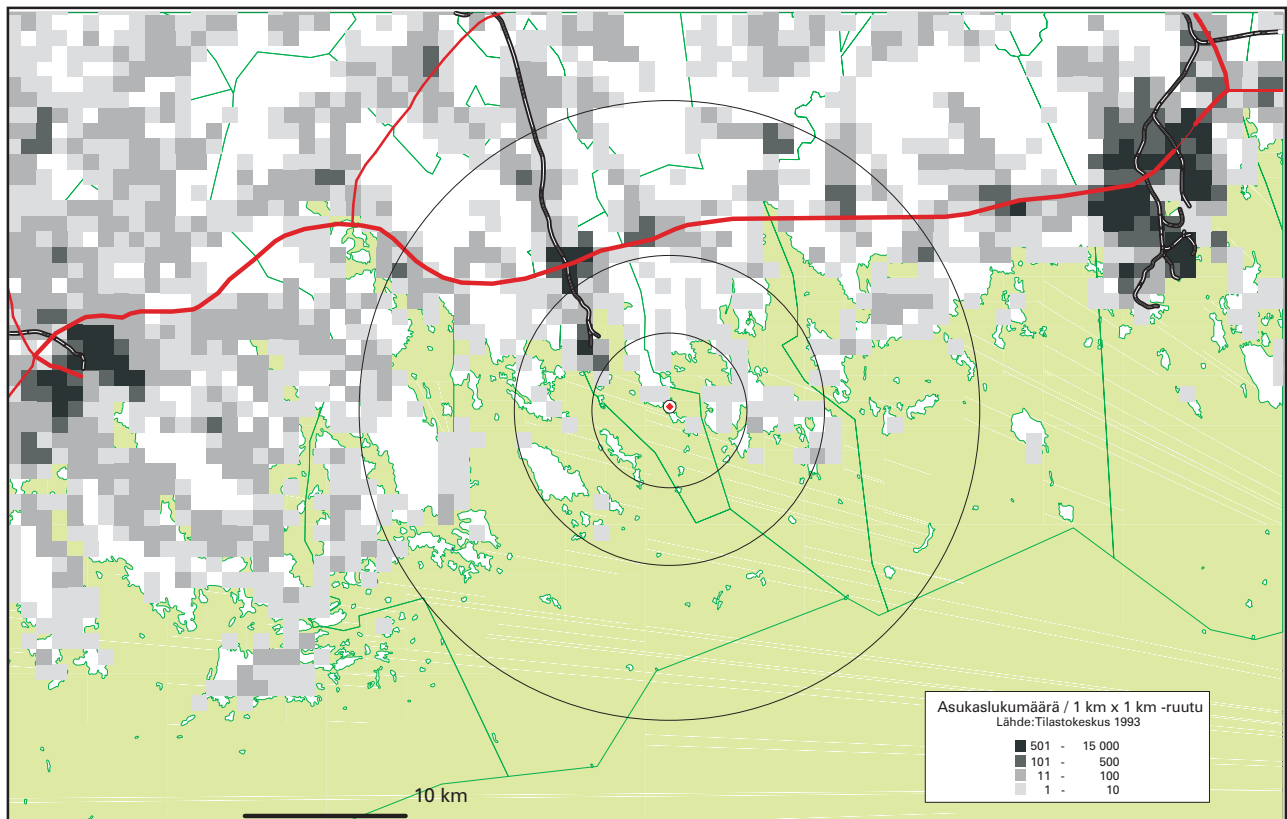
asukastiheys kasvaa yli viiteensataan neliökilometrillä. Raumalla asuu noin 38 000 asukasta. Pori sijaitsee noin 30 kilometrin päässä ja siellä on noin 76 000 asukasta (TVO 1997a). Suuremmista kaupungeista Turku sijaitsee noin 100 kilometrin päässä ja siellä asuu noin 170 000 asukasta sekä Tampere noin 140 kilometrin päässä ja siellä asuu lähes 200 000 asukasta. Helsinkiin on etäisyyttä noin 240 km.

Hästholmenin ympäristön asukastiheysjakauma on esitetty kuvassa 2 (Huovinen 2000). Viiden kilometrin säteellä voimalaitoksesta asuu vakituisesti hieman vajaa 50 asukasta ja 20 kilometrin säteellä noin 13 000 asukasta. Noin kymmenen kilometrin päässä laitoksesta sijaitsevassa Valkon taajamassa asuu noin 1 000 asukasta ja noin 10 kilometrin päässä sijaitsevassa Loviisan kaupungissa noin 8 000 asukasta. Kotka sijaitsee noin 30 kilometrin etäisyydellä ja siellä asuu noin 40 000 asukasta. Lännessä sijaitsevaan Porvooseen (45 000 asukasta) on etäisyyttä noin 35 kilometriä (IVO 1996). Helsingin seudulle on etäisyyttä noin 80 kilometriä ja pääkaupunkiseudulla (Helsinki 551 000, Espoo 205 000 ja Vantaa 178 000) asuu yhteensä noin 930 000 asukasta.

Molempien laitospaikkojen maaseutumaisessa ympäristössä väestötiheys vaihtelee suuresti. Siellä sijaitsee myös huomattava määrä vapaa-ajan asuntoja. Ei voida puhua pelkästään loma-asutuksesta, vaan mökit ovat usein käytössä myös varsinaisen kesäsesongin ulkopuolella esimerkiksi viikonloppuisin.

Hästholmenin ympäristössä viiden kilometrin säteellä arvioidaan olevan 400 lomamökkiä, joissa voidaan arvioida oleskelevan enimmillään 1 100 tilapäistä asukasta. Määrä on 25-kertainen alueen vakituisen asukasmäärään verrattuna. Olkiluodon ympäristössä viiden kilometrin säteellä on 450 lomamökkiä. Jos arvioidaan mökeissä vapaa-aikaansa viettävien määrä Hästholmenin määrien avulla eli 2,75 asukasta/mökki, saadaan 1 200 asukasta eli alueen vakituisiin asukkaisiin verrattuna määrä on 17-kertainen. Loma-asuntoja käytetään ensisijaisesti vapaa-ajan oleskeluun, mutta jos tilapäisten asukkaiden määrät ja oleskeluajat muutetaan keskimääräisiksi arvoiksi vuoden yli, voidaan karkeasti arvioida, että lomamökeissä asuu kaksinkertainen määrä asukkaita verrattuna vakituisen asukasmäärään.

Kummankin laitospaikan ympäristössä alle vii-



**Kuva 2.** Hästholmenin ympäristön asukastiheysjakauma (Huovinen 2000). Ympyröiden säteet ovat 5, 10 ja 20 km.



den kilometrin säteellä on vain vähän *maatalouden tuotantotoimintaa*. Tällä alueella ei esimerkiksi ole yhtään maitoa tuottavaa tilaa, mutta muutama viljaa ja heinää tuottava tila toimii alueella. Laitosten ympäryskunnissa sijaitsevilla tiloilla tuotetaan viljaa, vihanneksia, juureksia, maitoa ja naudanlihaa, mutta tilojen määrä ja samalla tuotanto ovat vuosien kuluessa pienentyneet. Viidestä kahteenkymmeneen kilometrin etäisyydellä laitoksista on tyypillistä maaseutua Loviisan ja Rauman kaupunkeja lukuun ottamatta. Laitosten lähistöllä harjoitetaan myös kalastusta ja kalankasvatusta.

Lähikunnissa työpaikkoja on eniten palvelu- ja jalostusaloilla. Suuremmat *teollisuus- ja tuotantolaitokset* sijaitsevat noin yhdeksän kilometrin päässä laitoksista. Samoilla etäisyyksillä sijaitsevat lähimmät *koulut, sairaalat ja vanhainkodit*. Laitoksille johtavien teiden lisäksi merkittävä maantie-, raide- ja *lentoliikenne* tapahtuu pääosin yli kymmenen kilometrin etäisyydellä. Laitospaikoille kulkee laivareittejä, mutta syvemmät väylät ovat vähintään kilometrin päässä.

Laitospaikoilla vallitsevalle ilmastolle on tyypillistä se, että kuulumme kylmien pohjoisten ja lämpimien eteläisten ilmamassojen raja-alueeseen, johon lounaasta saapuvat matalapaineet tuovat lämmintä ilmaa. Meriveden lämpötila ja mahdollinen jäätyminen talvisin vaikuttaa myös laitospaikkojen sääolosuhteisiin. Meteorologisia tietoja mitataan jatkuvasti laitospaikkojen säämastolla. Leviämisenusteiden osalta näistä tärkeimpiä ovat tuulensuunta ja -nopeus sekä ilman lämpötila eri korkeuksilla ja sateen voimakkuus. Tilastoidun leviämisaineiston perusteella voidaan esimerkiksi todeta, että Olkiluodossa on esiintynyt leviämisuunnan kuukausiriippuvuutta. Keskimääräinen tuulennopeus 100 metrin korkeudella on ollut Hästholmenissa 6–7 m/s vuosina 1982–1993.

Suomessa *tulvia* on esiintynyt lähinnä keväisin Pohjanmaan läpi virtaavien jokien alueella. Syynä on useimmiten jään muodostamien patojen aiheuttama tukkeuma. Meren rannikolla tulvia ei ole esiintynyt, koska meri sinänsä tarjoaa tilaa tulvavesille ja koska alueella ei esiinny pyörremyrskyjä. Vuoroveden aiheuttama merenpinnan korkeusvaihtelu on suhteellisen pientä, eikä suuria hyökyaaltoja esiinny. Vedenpinnan korkeusvaihtelua aiheuttaa tuulen ja ilmanpaineen vaikutuksesta.

Suomen peruskallio kuuluu maapallon vanhimpiin muodostumiin eikä sitä lueta erityisesti *maanjäristyksille* alttiiksi alueeksi, vaikka pieniä värähtelyjä tapahtuu vuosittain. Kallioperä on hyvin rikkonainen, mutta siitä on löydettävissä enintään sadan neliökilometrin kokoisia suhteellisen ehyitä kalliolohkoja. Vanhin havainto maanjäristyksestä on 1600-luvulta ja viime vuosikymmeninä on herkillä mittalaitteilla havaittu muutamia maanjäristyksiä vuosittain. Järjestykset tapahtuvat useimmiten kymmenien kilometrien syvyydessä kallioperässä, mutta on esiintynyt myös pieniä järjestyksiä, jotka ovat tuntuneet talojen tärahtelyinä. STUKin ohjeen YVL 2.6 (STUK 1988, 2001) mukaan uuden ydinvoimalaitoksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon ns. laskentamaanjäristyksen vaikutukset. Laskentamaanjäristyksellä tarkoitetaan vaikutuksiltaan suurinta maanjäristystä, jonka arvioidaan esiintyvän laitospaikalla keskimäärin kerran kymmenen tuhannen vuoden aikana.

## 2.4 Sijaintipaikat muualla

Maailmassa oli vuonna 2000 toiminnassa 438 ydinvoimalaitosreaktoria, joista 146 reaktoria kahdeksassa Euroopan Unionin jäsenvaltiossa. Eniten reaktoreita on USA:ssa (104). Euroopan maista niitä on eniten Ranskassa (59), sitten Iso-Britanniassa 35 ja Saksassa 19. Vaikka Suomessa ja Ruotsissa on päädytty merenrannalla sijaitseviin sijaintipaikkoihin, ei se ole välttämätöntä ja muualla sijaintipaikat vaihtelevat rannikosta sisämaahan. Seuraavassa on käsitelty esimerkkinä sijaintipaikkavaatimuksia ja ratkaisuja USA:ssa, Sveitsissä, Saksassa ja Ruotsissa. Mainittakoon, että myös Venäjällä on asetettu ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valintaa koskevat kriteerit.

### 2.4.1 USA

Yhdysvalloissa sijaintipaikan valinta edellyttää paikallisten, osavaltion sekä liittovaltion viranomaisten hyväksynnän. Ydinturvallisuusviranomaisen (NRC) tarkastaa laitosuunnitelman turvallisuustekijät sekä sijaintipaikan ympäristöön liittyvät näkökohdat. Kuka tahansa yksityinen henkilö voi esittää hankkeen keskeyttämistä, mikäli ehdotetun laitoksen tai sijaintipaikan turvallisuuden osalta esitetään riittäviä perusteluja kes-

keytykselle. Kuulemismenettelyssä lupaa hakevan voimayhtiön on osoitettava, että laitosta voidaan käyttää turvallisesti. Rakentamisluvan myöntää NRC, joka myös valvoo jatkuvasti laitoksen käyttöä ja voi tarvittaessa peruuttaa käyttöluvan, mikäli laitosta ei käytetä luvassa määriteltyjen periaatteiden mukaisesti. Keskustelu uusien ydinvoimalaitosten rakentamisesta on virinnyt USA:ssa keväällä 2001.

NRC määrittelee ohjeessaan (U.S. NRC 1998) yleiset ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaan liittyvät vaatimukset, jotka laitospaikan on täytettävä, jotta se ylipäättensä pääsisi mukaan vaihtoehtoisten laitospaikkojen ryhmään ja sitä kautta tarkempaan arviointiin. Ydinenergialaki sekä ympäristölaki asettavat suurimmassa määrin NRC:n toiminnan ja määräysten rajat. Sijaintipaikan valinnan yhteydessä tulee arvioida geologisia ja seismologisia olosuhteita, ilmastollisia ääritilanteita ja leviämisolosuhteita, laitosalueelle vaadittavaa kokoa ja ympäröivän alhaisen väestötiheyden vaatimaa aluetta, ympäristön väestönmäärää, valmiussuunnittelua, turvaetäisyyttä, tulvia, veden saatavuutta, veden laatua, ympäristössä sijaitsevan teollisuuden, sotilaskohteiden ja kuljetusten yhteydessä tapahtuvien onnettomuuksien vaikutusta, ekosysteemejä, maan käyttöä, esteettisiä vaikutuksia, sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia sekä melua. Kullekin sijaintipaikalle arvioidaan em. ominaisuudet, jonka perusteella ne voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen.

Kunkin em. tekijän on täytettävä erikseen määritellyt vaatimuksia. Esimerkiksi laitosalueen osalta voidaan sallia maantien, rautatien tai vesitien läpikulku laitosalueen kautta, mikäli kulureitillä ei ole vaikutusta laitoksen normaaliin käyttöön. Lisäksi hätätilanteen varalta edellytetään riittäviä järjestelyjä, jotta mainituilla kulureiteillä voidaan toteuttaa riittävä valvonta väestön turvallisuuden takaamiseksi. Lisäksi laitosalueen koon osalta vaaditaan, että yksilön efektiivinen annosekvivalentti ei ylitä arvoa 250 mSv kahdessa tunnissa missään laitosalueen rajalla, kun oletetaan fissiotuotteiden vapautuneen suojarakennukseen. Laitosalueen ulkopuolella sijaitsee alhaisen asukastiheyden alue. Sen koosta edellytetään, että alueen ulkorajalla yksilön annos on oletetun onnettomuuden seurauksena enintään 250 mSv 30 vuorokauden kuluessa. Lisäksi vaaditaan, että etäisyyden vähintään 25 000 asukkaan

taajamaan pitää olla vähintään 1,33-kertaa etäisyys alhaisen väestötiheyden alueen uloimpaan rajaan. Laitosta ympäröivän väestötiheyden osalta suositellaan, että 20 mailin (noin 32 km) säteellä keskimääräinen väestötiheys ei ylitä arvoa 500 asukasta neliömailia (noin 190 asukasta/km<sup>2</sup>) kohden.

USA:ssa on 104 reaktoria 65 sijaintipaikalla. Esimerkki hyvin tyypillisestä USA:n sisämaan laitospaikasta on Limerickin laitos, joka sijaitsee Pennsylvanian osavaltiossa ja josta Philadelphian suurkaupunki sijaitsee 30 km:n päässä. Sijaintipaikan ympäristössä 10 km:n säteellä asuu 130 000 asukasta, joista vajaa 10 000 on tilapäisesti asuvia. Laitospaikka sijaitsee joen kahden puolen. Joen virtaus voi vaihdella suuresti. Reaktorin jäähdytys hoidetaan jäähdytystorneissa kierätettävällä vedellä. Maaperän seismisen historian ja geologisen rakenteen perusteella ei laitospaikalla ole odotettavissa merkittävää maanjäristystä laitoksen elinaikana. Ympäristön maa-alueesta osa on viljeltyä, osa metsää ja loput joutomaata.

## 2.4.2 Sveitsi

Sveitsissä on viisi ydinreaktoria neljällä sijaintipaikalla. Maan väestötiheys on merkittävä, eikä harvaan asuttuja sijaintipaikkoja ole maaston muodon takia.

Sveitsi on allekirjoittanut Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ydinturvallisuutta koskevan yleissopimuksen, jossa on esitetty ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valintaan liittyen yleinen vaatimus arvioida kaikkia olennaisia paikkaan liittyviä tekijöitä, jotka vaikuttavat laitoksen turvallisuuteen (HSK 2001). Sveitsi sitoutuu noudattamaan tiettyjä periaatteita uusien ydinlaitosten osalta. Sijaintipaikan osalta ensinnäkin pitää kehittää riittävät menettelytavat, joilla laitospaikkaan sen koko käyttöiän aikana todennäköisesti liittyviä turvallisuustekijöitä voidaan arvioida. Sijaintipaikan sopivuus katsotaan osaksi yleiskäyttölupaa. Käyttölupaa haettaessa tulee kaikki sijaintipaikan ympäristöön liittyvät seikat sisällyttää turvallisuusanalyysiraporttiin. Näistä tärkeimpiä ovat:

- geologiset, seismologiset, hydrologiset (tulvat) ja meteorologiset seikat
- väestöjakauma, ympäristön teollisuuslaitokset

ja rakennukset

- kuljetusreitit ja niiden käyttötaajuudet ilmassa, maalla ja vedessä sekä lentoväylät.

Sveitsissä ydinturvallisuusviranomaisen (HSK/DSN) arvioi ensiksi lupahakemuksen kohteena olevan, tietyille laitospaikalle sijoitettavan ydinlaitoksen turvallisuuteen liittyvät ulkoiset tapahtumat kuten maanjäristykset, tulvat, salammat, ympäristön teollisuuslaitosten tulipalojen tai räjähdysten vaikutukset. Tämän perusteella voidaan laitossuunnittelulle asettaa lisävaatimuksia. Kiinteitä sijaintipaikalle asetettuja vaatimuksia ei ole, mutta turvallisuuteen liittyvät seikat on aina arvioitava uudelleen mikäli laitoksen ympäristöön ehdotetaan rakennettavaksi uusia kohteita (HSK 2001).

Toiseksi pitää sopivin menettelytavooin arvioida ydinlaitoksen vaikutus ympäristöön, asukkaisiin ja yhteiskuntaan. Tiheän asutuksen takia turvallisuutta ei voida luoda etäisyysperiaatteella. Luvanhaltijan edellytetään ylläpitävän valmiutta estää onnettomuuksia ja pienentää niiden vaikutuksia. Normaalkäytön aikaiset ja suunnitteluperustaisen onnettomuuden annosrajat on annettu HSK:n muissa ohjeissa. Annosarvot riippuvat onnettomuuden todennäköisyydestä.

Kolmanneksi on sopivin toimenpitein varmistettava, että em. kohtien uudelleenarviointi on tehtävissä tarpeen mukaan ydinlaitoksen jatkuvan turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Uudelleenarvioinnit tehdään periaatteessa samoin kuin alustavatkin arvioinnit. Laitoksen turvallisuutta arvioidaan jaksottaisen turvallisuusarvion, suunnitteluperustaisten onnettomuuksien arvioiden tarkistuksissa ja todennäköisyyspohjaisissa turvallisuusanalyseissä (PSA).

Neljänneksi Sveitsi tarjoutuu konsultoimaan muita sopimuksen osapuolia ehdotetun sijaintipaikan lähistöllä siten, että heille tarjotaan tarpeellista informaatiota, jotta toinen osapuoli pystyy arvioimaan laitoksen vaikutuksia heihin itseensä.

### 2.4.3 Saksa

Saksassa sijaintipaikan valintaa koskevat ohjeet ovat peräisin 1970-luvulta (IRS 1976), jolloin varauduttiin 50 suuren ydinvoimalaitoksen rakenta-

miseen. Osavaltioiden lupa- ja valvontaviranomaiset vastaavat Saksan liittovaltion atomienergiain lain toimeenpanosta. Sijaintipaikkojen valintaa koskeva menettely uudistettiin vuonna 1976, mitä kuvataan seuraavassa.

Yhteistyössä Sisäasianministeriön kanssa osavaltioiden lupa- ja valvontaviranomaiset sopivat noudattavansa sijaintipaikkojen ominaisuuksien arvioinnissa reaktori- ja säteilyturvallisuuden osalta yhtenäistä varautumismenettelyä, joka perustui keskitettyyn mahdollisten sijaintipaikkojen tietokantaan. Vielä 1970-luvulle asti voimayhtiöt valitsivat sijaintipaikkaehdokkaat ja hakivat sitten alustavaa tai lopullista käyttö lupaa laitokselle.

Sijaintipaikalle suunnitellun laitoksen ja sen ympäristön osalta arvioitavia asioita olivat muun muassa:

- energian tarve ja kannattavuus
- alueellinen suunnittelu ja osavaltion kehitys
- ydinturvallisuus ja säteilysuojelu
- saastumisen valvonta
- veden saanti.

Ehdolla olevilta sijaintipaikoilta vaadittiin kerättäväksi erityinen tietoaineisto paikan soveltuvuusarvioita varten. Tämän tietoaineiston tavoitteita olivat:

- sopivien ydinvoimalaitosten sijaintipaikkojen valintaa tuli helpottaa
- sijaintipaikkojen esivalinta varmistaisi käyttöluvan hakemisvaiheessa ilmenevien tärkeiden ydinenergiain mukaisten näkökohtien huomioonottamisen
- edesautetaan sopivimpien sijaintipaikkojen valinnoissa ja menettelyä järjeistetään ja nopeutetaan
- osavaltioiden menettelytapoja yhtenäistetään ja helpotetaan rajanläheisten sijaintipaikkojen käsittelyä
- sijaintipaikkatietokantaa pitäisi käyttää karkeana seulontamenetelmänä
- menetelmää tulisi voida kehittää tulevaisuudessa erityisesti sijaintipaikan lähialueille, joissa olisi mahdollista kehittää esim. voimalaitospuistoja
- kehitettävä tietokanta sopii kevytvesireaktortehtoilte aina 1 300 MW:iin asti
- tietokantaa on päivitettävä aika ajoin teknologian kehityksen ja turvallisuustason mukaisesti.

Reaktori- ja säteilyturvallisuuden kannalta sijaintipaikkaan liittyivät ainakin seuraavat ominaisuudet:

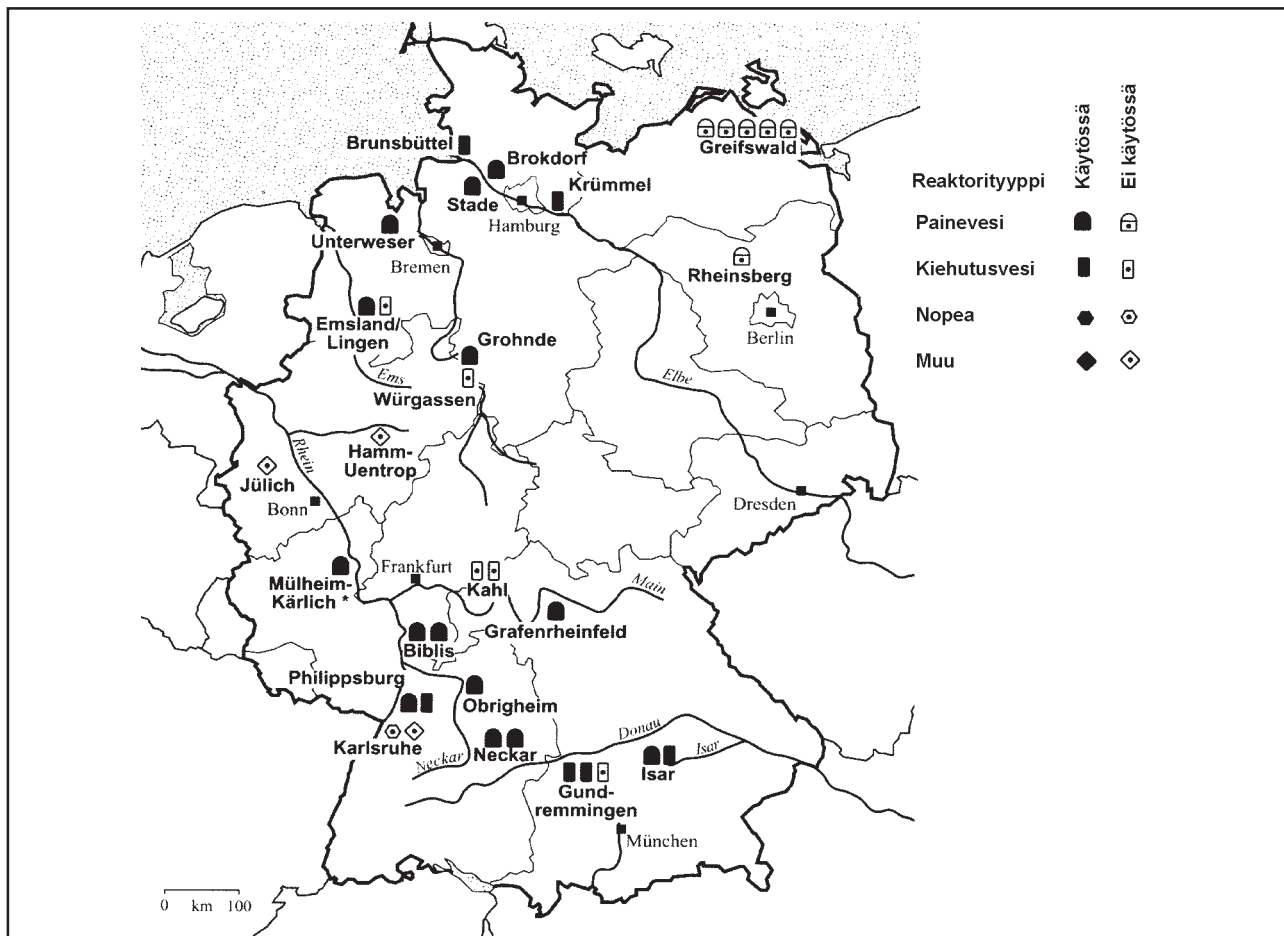
- meteorologiset ominaisuudet
- hydrologiset ominaisuudet
- väestöjakauma
- geologiset ja seismologiset ominaisuudet
- ulkoiset vaikutukset
- kuljetusreitit.

Edellä luetelluille ominaisuuksille annettiin vaihteluvälit kolmessa kategoriassa ja kukin sijaintipaikka luokiteltiin kuuluvaksi johonkin näistä kolmesta kategoriasta kunkin ominaisuuden osalta.

Kuvassa 3 on esitetty Saksassa sijaitsevien ydinvoimalaitosten sijaintipaikat (14 kpl) vuonna 1999 (Kernenergie 2000). Laitokset on sijoitettu enimmäkseen jokien varsille. Saksassa väestötiheydet ovat suuria ja esim. Reinin varrella Wormsin lähellä sijaitsevan Biblisin ydinvoimalaitoksen ympäristössä alle 10 km:n säteellä asuu 120 000 asukasta ja alle 50 km:n säteellä hieman yli 4 miljoonaa ihmistä (530 asukasta/km<sup>2</sup>).

## 2.4.4 Ruotsi

Ruotsissa sijaintipaikan valintaa koskevia määräyksiä löytyy 1970-luvulta. Ruotsissa lakiin pohjautuva lähtökohta 1970-luvulla oli, että alle kahden kilometrin etäisyydelle voimalaitoksesta ei saa rakentaa uusia rakennuksia, vakituisten asukkaiden määrä saa olla enintään muutama sata, eikä vakituisten ja vapaa-ajan rakennusten määrä saa lisääntyä yli 10 prosenttia alkuperäisestä määrästä. Laitosten sijaintipaikkojen lähiympäristöt ovat suhteellisen harvaanasuttuja. Lisärakentaminen on kuitenkin sallittua sillä ehdolla, että valmius- ja pelastustoimenpiteiden suorittamista ei vaaranneta. Näin erivapaudesta saa rakentaa 1–2 km:n säteellä, mikäli turvallisuusnäkökohdat voidaan hyväksyä ja rakentamiselle on erityinen syy. Erityisiä syitä ovat esim. rakennukset, joita vaaditaan voimalaitoksen käytössä, maanviljelyssä tai kalastuksessa. Näillä ehdoilla myös vapaa-ajan viettämisessä liikkuvien sallitaan oleskella alueella. Ongelmana pidettiin ainoastaan kahden kilometrin päässä Ringhalsin laitoksesta sijaitsevaa 2000 asukkaan Buan taajamaa. Poik-

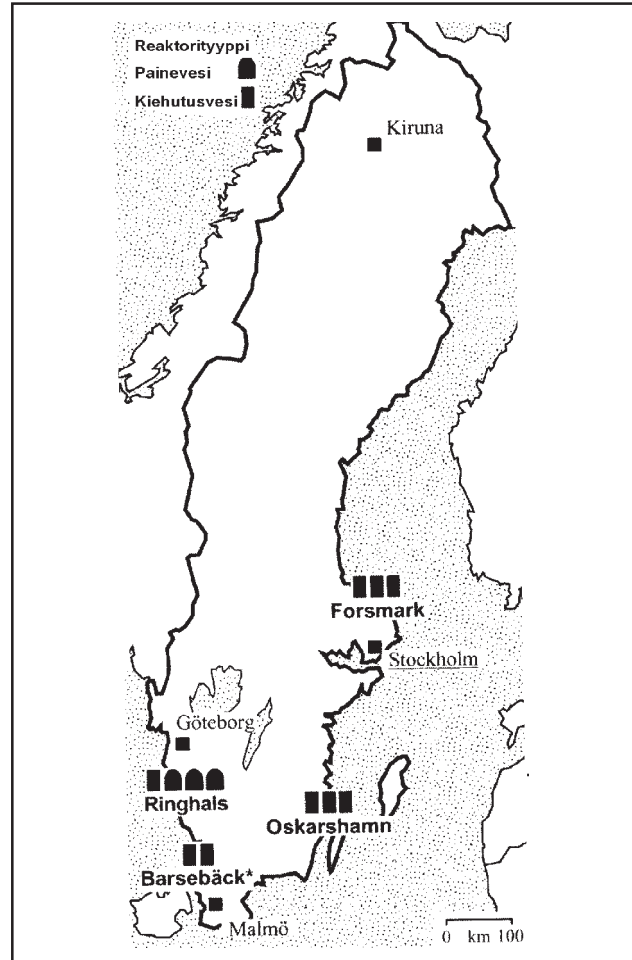


**Kuva 3.** Ydinvoimalaitosten sijaintipaikat Saksassa vuonna 1999 (Kernenergie 2000).

keuksena muista sijaintipaikoista Ringhalsin ympäristön kiinteän ja vapaa-ajan asukasmäärän ylärajaksi asetettiin noin 1000 asukasta alle kahden kilometrin säteellä laitoksesta (Statens Kärnkraftinspektion et al. 1977).

Ohjeiden mukaan etäisyydelle 2–10 km ei tule rakentaa siten, että pelastustoimenpiteet vaarantuisivat. Kriteerinä oli, että väestön evakuointi on voitava suorittaa 6 tunnin kuluessa kussakin 60 asteen sektorissa 5 kilometrin etäisyydellä ja vuorokauden kuluessa 10 kilometrin etäisyydellä. Lisäksi vaadittiin, että teollisuutta ei rakenneta ja kuljetuksia ei tapahdu niin lähellä sijaintipaikkaa, että niistä aiheutuisi räjähdysmiissiili- tai tulipalovaaraa ydinvoimalalle tai sen jäähdytysveden saanti vaikeutuisi. Tälle alueelle ei myöskään tule sijoittaa vaikeasti evakuoitavia laitoksia kuten vankilaa, sairaalaa tai vanhainkotiä.

Kuvassa 4 on esitetty Ruotsissa sijaitsevien ydinvoimalaitosten sijaintipaikat vuonna 1999 (Kernenergie 2000). Ruotsin neljä laitospaikkaa sijaitsevat merenrannikolla ja niillä on toiminnassa 11 reaktoria. Barsebäckin laitoksen toinen reaktori suljettiin vuonna 1999. Barsebäck sijaitsee vain 25 km:n päässä Malmöstä (260 000 asukasta) ja Kööpenhaminasta (490 000 asukasta). Sadan kilometrin säteellä Barsebäckistä (Öresundin alue) on 3 milj. asukasta.

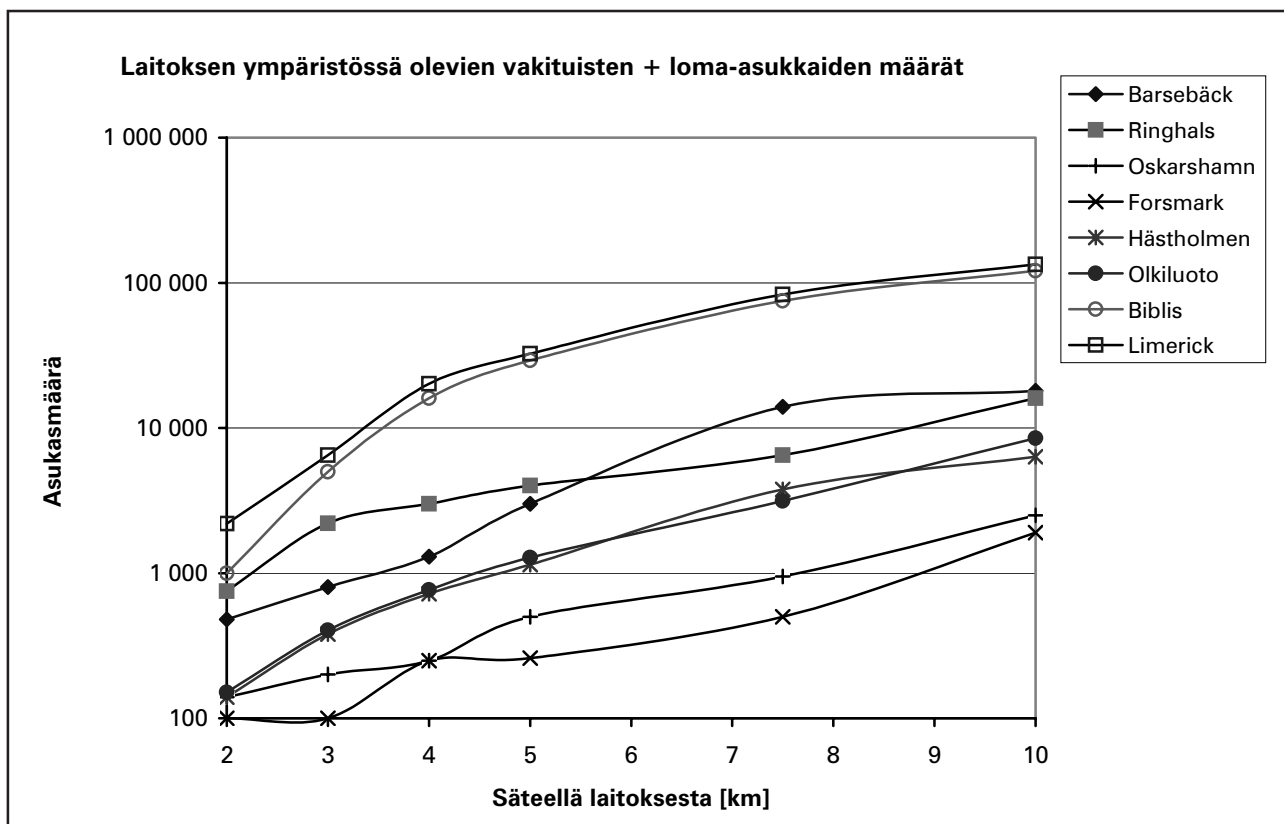


**Kuva 4.** Ydinvoimalaitosten sijaintipaikat Ruotsissa vuonna 1999 (Kernenergie 2000). \*) Barsebäck-1 suljettiin vuonna 1999.

## 2.5 Sijaintipaikkojen väestömäärien vertailu

Kuvassa 5 on esitetty eräiden laitospaikkojen väestömääriä, joihin sisältyy sekä vakituiset että alueella vapaa-ajan vietossa oleskelevat (Biblisin lukuihin sisältyy vain vakituisten asukkaiden määrä). Olkiluodon ja Hästholmenin loma-asukkaiden määrät on arvioitu lomamökkien määristä

ja summattu suoraan vakituisten asukkaiden määrään. Olkiluodon ja Hästholmenin asukasmäärät jäävät alle 10 000 mutta Barsebäckin ja Ringhalsin nousevat yli 10 000 asukkaan alle 10 kilometrin säteellä laitoksesta. Saksalaisen Biblisin sekä amerikkalaisen Limerickin laitoksen sijaintipaikan ympäristön asukasmäärät ovat kertaluokkaa suuremmat kuin pohjoismaisten sijaintipaikkojen.



**Kuva 5.** Eräiden ydinvoimalaitosten sijaintipaikkojen ympäristöjen asukasmäärät, jotka sisältävät myös tilapäisesti alueella oleskelevat muulloin paitsi Biblisin osalta (Suomessa ja Ruotsissa vapaa-ajan asunnoissa oleskelevat asukkaat, Limerickissä muutoin alueella oleskelevat). Ruotsalaisten laitosten tiedot ovat 1970-luvulta, suomalaisten 1990-luvulta samoin kuin saksalaisen Biblisin ja amerikkalaisen Limerickin laitoksen.



## 3 YDINVOIMALAITOKSEN TURVALLISUUS

Ydinvoimalaitoksen normaalikäytön yhteydessä ilmakehään ja pintavesiin, Suomessa mereen, laskevat päästöt viivästetään ja puhdistetaan siten, että niiden aiheuttama säteilyvaikutus ympäristössä on hyvin pieni verrattuna luonnossa normaalisti olevien radioaktiivisten aineiden vaikutukseen. Päästöt mitataan huolellisesti ja varmistetaan, että ne selvästi alittavat asetetut raja-arvot. Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten aiheuttamien suurimpien yksilöannosten ympäristössä on arvioitu olleen viime vuosina 0,001–0,001 mSv vuodessa. Luonnon radioaktiivisten aineiden säteilystä arvioidaan saatavan keskimäärin 3 mSv:n annos vuodessa. Tällä perusteella ydinvoimalaitoksen normaalikäyttö ei vaikuta väestön terveyteen. Ydinvoimalaitoksen päästöjä seurataan mittausten avulla (STUK 1992a) ja päästöjen aiheuttamat annokset arvioidaan laskennallisesti (STUK 1997b). Ympäristön säteilymittausten avulla varmistetaan päästömittausten ja annosarvioiden oikeellisuudesta (STUK 1995a)

Ydinvoimalaitoksen normaalitoiminta sekä käyttöhäiriöt eivät vaatimusten mukaan toimittaessa aiheuta vaaraa ympäristön asukkaille (STUK 1992b, 1996b). Sen sijaan laitoksella mahdollisesti tapahtuvan onnettomuuden seurauksena myös ympäristö voisi joutua vaaralle alttiiksi. Onnettomuustilanne saattaa aiheutua ydinvoimalaitoksen sisäisten tapahtumien (viat ja virheet) lisäksi myös laitoksen ulkoisista tapahtumista. Pahin onnettomuustyyppi eli ns. vakava reaktorionnettomuus tarkoittaa reaktorisydämen vaurioitumista ja siitä mahdollisesti seuraavaa radioaktiivisten aineiden päästöä ympäristöön. Turvallisuusmääräysten mukaan tällaisen päästön todennäköisyyden on oltava erittäin pieni. Onnettomuusriski ja onnettomuuden ympäristöseuraukset sekä niiden laajuus riippuvat ydinvoimalaitoksesta ja sen sijaintipaikasta ympäristöineen.

Ydinvoimaloiden käytön turvallisuuteen pyri-

tään sekä säädöksillä ja yksityiskohtaisilla ohjeilla että tiukalla viranomaisvalvonnalla; tavoitteena on kehittynyt turvallisuuskulttuuri. Ydinvoimateollisuudessa on riskin rajoittamiseksi kehittynyt järjestelmällinen turvallisuusajattelu, jonka lähtökohtana on onnettomuuksien ehkäiseminen ja seurausten rajoittaminen. Myös kehittyneitä laadunhallintamenetelmiä käytetään.

### 3.1 Yleisiä ydinturvallisuusperiaatteita ja -vaatimuksia

Ydinreaktorin toimiessa syntyy radioaktiivisia aineita ydinpolttoaineen halkeamisreaktioissa ja eräiden rakennemateriaalien aktivoituessa säteilyn vaikutuksesta. Aktiivisuus vähenee reaktorin pysäytyksen jälkeen, aluksi varsin nopeasti. Hajotessaan radioaktiiviset aineet kehittävät ns. jälkilämpöä. Tästä johtuen ketjureaktion pysäyttäminen ei vielä ole riittävä tae reaktorin pitämiseksi turvallisessa tilassa. Jos lämmön poissiirtäminen reaktorista häiriintyy esim. jäähdytyspiirin vaurioitumisen tai kiertopumppujen pysähtymisen takia, voi syntyä reaktorisydäntä uhkaava vaaratilanne.

Ydinturvallisuuden peruseriaate on, että radioaktiiviset aineet eivät saa päästä ympäristöön. Päästöjen estämiseksi turvallisuus pyritään varmistamaan moninkertaisesti. Ydinvoimalaitoksissa käytetään vain korkealaatuisia laitteistoja, jotta niiden vikaantumistodennäköisyys olisi mahdollisimman pieni. Onnettomuuksien syntyä ehkäistään myös antamalla käyttöhenkilöstölle mahdollisimman perusteellinen koulutus, muun muassa Loviisan ja Olkiluodon koulutussimulaattorien kaltaisilla apuvälineillä.

Koska häiriötilanteita ei kuitenkaan voida täysin välttää, laitoksilla on erilaisia moninkertaisesti varmennettuja valvonta- ja suojausjärjestelmiä, jotka automaattisesti käynnistävät suoja- ja varo-

toimenpiteitä, jos laitoksen tilassa havaitaan epänormaaleja piirteitä. Näin pyritään estämään häiriön eteneminen onnettomuudeksi. Tärkein suoja-toimi on reaktorin pikapysäytys. Siltä varalta, että laitosta ei saada pelkästään valvonta- ja suo-jalaittein turvalliseen tilaan, reaktorit on varus-tettu ns. hätäjähdytysjärjestelmillä, joiden tehtä-vänä on estää reaktorin ylikuumeneminen. Myös moninkertaisesti varmistettujen hätäjähdytys-järjestelmien täydelliseen peltämiseen on varau-duttu.

Reaktorin ylikuumenemiseen tai vaurioitumi-seen varaudutaan tällöin siten, että tällaisessa äärimmäisessä tilanteessa ydinpolttoaineesta va-pautuvien radioaktiivisten aineiden vapautumista ympäristöön estävät monet peräkkäiset suojaker-rokset:

- polttoaine on keraamisina tabletteina, joissa valtaosa radioaktiivisista aineista normaali-oloissa pysyy
- polttoainetabletit ovat tiiviissä metallisissa suojaputkissa, ns. polttoainesauvoissa
- polttoainesauvat ovat reaktorissa paineastian sisällä ja jäähdytysvesi kiertää putkistossa, jonka kuntoa valvotaan jatkuvasti
- uloimpana on kaasutiivis suojarakennus, jonka on suunniteltu kestävän onnettomuuden ai-kaista painetta ja ulkopuolelta tulevia vaiku-tuksia.

Ydinvoimalaitoksen suojarakennuksen tehtävänä on estää radioaktiivisten aineiden pääsy ympäris-töön.

Suojarakennuksen tiiveys voi äärimmäisen epäsuotuisissa olosuhteissa pettää, jos sen pitkä-aikaista jäähdytystä ei pystytä järjestämään. Suo-malaisten reaktorien turvallisuusjärjestelmiä on täydennetty myös tällaisen tilanteen varalta.

Valtioneuvoston päätöksessä (395/91) on mää-rätty, että ydinvoimalaitosta on käytettävä siten, että säteilyaltistus on niin pientä kuin käytännöl-lisin toimenpitein on mahdollista (ALARA, As Low As Reasonably Achievable) (VNP 1991). Laitokses-ta on tehtävä niin turvallinen kuin järkevin toi-menpitein on saavutettavissa (SAHARA, Safety As High As Reasonably Achievable) (STUK 1996a).

Normaalista vuoden mittaisesta käytöstä väes-tön yksilölle aiheutuvan annoksen raja-arvo on 0,1 mSv. Odotettavissa olevan käyttöhäiriön seu-rauksena vuoden mittaisena ajanjaksona saata-

vasta ulkoisesta säteilystä ja samana aikana ke-hoon joutuvista radioaktiivisista aineista väestön yksilölle yhteensä aiheutuvan annoksen raja-arvo on 0,1 mSv. Odotettavissa olevan käyttöhäiriön voi odottaa esiintyvän yhden tai useamman ker-ran sadan käyttövuoden aikana, muut poikkeaa-mat normaaleista käyttötilanteista luokitellaan onnettomuuksiksi. Onnettomuudet jaetaan kah-teen luokkaan: oletetut onnettomuudet ja vakavat reaktorionnettomuudet. Oletetuista onnettomuuk-sista ydinvoimalaitoksen edellytetään selviävän ilman vakavia polttoainevaurioita ja niin suuria radioaktiivisten aineiden päästöjä, että väestön säteilyaltistuksen rajoittamiseksi tarvittaisiin laa-joja toimenpiteitä. Oletettua onnettomuustilan-etta vastaava väestön yksilön annoksen raja-arvo on 5 mSv (50 × odotettavissa olevan käyttö-häiriön vastaava raja-arvo). Vakaville reaktorion-nettomuuksille on asetettu päästöraja: päästö ei saa aiheuttaa väestölle välittömiä terveyshaittoja eikä pitkäaikaisia rajoituksia laajojen maa- ja vesialueiden käytölle. Cesium 137 -radionuklidin päästön raja-arvo on 100 TBq, eikä muiden nukli-dien laskeumasta saa kolmen kuukauden jälkeen onnettomuudesta aiheutua suurempaa vaaraa kuin cesium-isotoopeista. Suuremman päästön to-dennäköisyyden on oltava erittäin pieni (VNP 1991a, STUK 1992b, STUK 1996b).

Ydinvoimalaitoksen suunnittelun, rakentami-sen ja käytön aikana riskejä arvioidaan todennä-köisyyspohjaisella turvallisuusanalyysillä (Proba-bilistic Safety Assessment, PSA), ks. kohta 4.1. Laitosriskejä pyritään ensin havaitsemaan ja sit-ten poistamaan, jotta laitoksen käyttö olisi turval-lista sen kaikissa käyttövaiheissa. Ydinvoimalai-tosta koskevat muun muassa seuraavat numeeriset suunnittelutavoitteet (STUK 1996a):

- sydänvauriotaajuus pienempi kuin  $10^{-5}$ /vuosi (harvemmin kuin kerran 100 000 vuodessa)
- vakavan reaktorionnettomuuden päästörajan ylitystaajuus on pienempi kuin  $5 \cdot 10^{-7}$ /vuosi (harvemmin kuin kerran kahdessa miljoonassa vuodessa).

Monitasoisen turvallisuuden varmistuksen lisäksi velvoitetaan luvanhaltija ylläpitämään pelastus-valmiutta onnettomuuden varalta. Voimalaitoksen valmiusorganisaation sekä viranomaisen valmi-us- ja pelastustoimenpiteillä voidaan onnettomuu-den tapahtuessa ympäristöseurauksia lieventää,



ks. kohta 3.3.

Ydinvoimalaitoksen rakenteiden ja laitteistojen, sijaintipaikan ja muiden vastaavien seikkojen ohella laitoksen suunnitteluun, rakentamiseen ja käyttöön sekä näiden valvontaan osallistuvilla henkilöillä ja heidän organisaatioillaan on keskeinen osa turvallisuuden luomisessa, ylläpitämisessä ja kehittämisessä, joten heidän kyvykkyyteensä ja toimintaedellytyksiinsä sekä organisaatioiden laadunhallintamenetelmiin ja turvallisuus-kulttuuriin kiinnitetään erityistä huomiota.

### 3.2 Vakavat reaktorionnettomuudet

Reaktorionnettomuuksia ja niiden ympäristövaikutuksia on tutkittu vuosikymmenien ajan. Ympäristön väestön terveys olisi uhattuna sellaisissa onnettomuustilanteissa, joissa suuria määriä radioaktiivisia aineita pääsisi vapautumaan ympäristöön. Ydinvoimalaitos on varustettu moninkertaisin turvallisuusjärjestelmin, joten onnettomuuden kehittyminen päästöön asti on hyvin epätodennäköistä. Turvallisuusperiaatteen mukaan laitoksella varaudutaan käyttöhäiriöihin, oletettuihin onnettomuuksiin sekä vakaviin reaktorionnettomuuksiin. Turvallisuusmääräysten täyttäminen on osoitettava kokeellisin ja laskennallisoin menetelmin. Nämä analyysit ovat luonteeltaan deterministisiä eli analysoidaan tiettyjä onnettomuusketjuja. Analyysihin liittyy myös konservatiivisuusperiaate, joka tarkoittaa, että käytetään oletuksia ja valintoja, jotka muuttavat analyysin lopputulosta epäedulliseen suuntaan. Analyysien tuloksille on asetettu hyväksymisrajat (STUK 1996b).

Ydinvoimalaitosonnettomuuksiin liittyviä ympäristövaikutuksia arvioitaessa joudutaan käsittelemään riskejä. Tässä yhteydessä riski on laskennallinen käsite, jonka toteutuminen on epävarmaa. Riski voi toteutua yhtä hyvin huomenna kuin tuhannen vuoden kuluttua. Voidaan pitää mahdollisena myös sitä, että riski ei muutu todeksi koskaan, koska reaktoria käytetään vain muutamana kymmenen vuoden ajan. Asiyhteydestä riippuen riski voidaan määritellä ja käsittää hie-man eri tavoilla. Koska tässä raportissa keskitytään ydinvoimalaitoksiin ja niiden ympäristöön, riskillä tarkoitetaan radioaktiivisten aineiden päästöstä aiheutuvaa haittaa ympäristölle ja sii-

hen liittyvää todennäköisyyttä. Haitta voi olla terveydellinen, taloudellinen tai sosiaalinen. Sen todennäköisyys määräytyy radioaktiiviseen päästöön johtavan onnettomuusketjun ja sitä seuraavan päästön aiheuttaman altistuksen todennäköisyydestä. Ydinvoimalaitosten yhteydessä riskin aiheuttavan tapahtuman todennäköisyys on pieni, mutta tapahtuman seuraus voi olla laaja-alainen. Asiantuntijoiden käsityksen mukaan ydinvoimalaan liittyvän riskin käyttäytymistä kuvaa se, että mitä suurempi todennäköisyys, sitä pienempi vahinko.

Ainoat onnettomuustyytit, joissa merkittäviä määriä radioaktiivisia aineita voi vapautua ympäristöön uhaten väestön terveyttä, ovat vakavat reaktorionnettomuudet, joiden esiintymistodennäköisyys jää kuitenkin hyvin pieneksi. Ydinreaktorin käytön aikana syntyvät fissiotuotteet ovat valtaosin sitoutuneena polttoaineeseen. Reaktorisydämen sulamiseen johtavalla reaktorionnettomuudella arvioidaan yleisesti olevan merkittävin riski ympäristöseuraamusten osalta. Siksi vakavien reaktorionnettomuuksien ilmiötä ja niiden merkitystä ydinvoimalaitoksen turvallisuuteen on jo tutkittu lähes kahdenkymmenen vuoden ajan. Ydinvoimalaitosonnettomuus saattaa edetä sydämen vaurioitumiseen asti vain hyvin epäsuotuisissa ja epätodennäköisissä olosuhteissa, mikäli laitoksen turvajärjestelmät eivät toimi suunnitellulla tavalla. Suojarakennuksen kestävyys pyritään takaamaan onnettomuuden hallintatoimenpiteillä, joiden avulla laitos pyritään palauttamaan turvalliseen tilaan. Vakaviin reaktorionnettomuuksiin varautuminen kuuluu nykyisin suojarakennuksen suunnitteluperusteisiin. Länsimaisten kevytvesireaktoreiden sydämen vaurioitumiseen johtavan onnettomuuden todennäköisyys on arvioitu pienemmäksi kuin yksi kymmentätuhatta reaktorin käyttövuotta kohden (Jokiniemi et al. 1995).

Mikäli onnettomuustilanteessa reaktorin jäähdytys ei kykene siirtämään kaikkea jälkilämpötehoa pois polttoaineesta, alkaa reaktorisydän vaurioitua. Tämä voi johtaa lopulta sydänmateriaalin sulamiseen ja sen valumiseen reaktoripaineastian pohjalle. Sydämen kuumetessa vapautuu polttoaineesta, säätösauvoista ja rakennemateriaaleista höyrystyviä aineita, jotka muodostavat aerosoleja. Reaktorista vapautunut materiaali kulkeutuu jäähdytysjärjestelmästä suojarakennukseen hiuk-

kasmuodossa lukuun ottamatta jalokaasuja ja mahdollisesti pientä määrää orgaanista jodia, jotka herkästi liikkuvassa muodossa vapautuvat heti vaurioitumisen alusta lähtien suojarakennukseen. Kuumentuneen sydämen läpi virtaava jäähdytysvesi reagoi materiaalien kanssa ja muodostaa vetyä. Polttoainesauvojen suojakuorimateriaalina käytetyn zirkoniumin reagoidessa vesihöyryn kanssa syntyy myös lämpöä, mikä edelleen kiihdyttää sydämen kuumenemistä. Sydänsula voi puhkaista paineastian pohjan ja purkautua suojarakennuksen reaktorikuiluun. Sen jälkeen sula kuormittaa suojarakennusta erityisesti sydänsula-betonireaktion sekä vedyn muodostumisen ja palamisen kautta. Sydämen vaurioitumisen yhteydessä reaktorista vapautuu fissiotuotteita sekä veteen liukenemattomassa että aerosolimuodossa. Osa aerosoleista kiinnittyy pinnoille, mutta osa voisi vapautua ympäristöön suojarakennuksen rikkoutuessa (Jokinieniemi et al. 1995).

Höyryn ja lauhtumattomien kaasujen muodostuminen paineistavat hitaasti suojarakennusta. Nopeaa paineistumista ja lämpötilakuormitusta voi tapahtua mm. vetypalojen, höyryräjähdysten tai korkeapaineisen sulapurkauksen seurauksena. Suojarakennus voi myös vaurioitua räjähdysten aiheuttaman missiilin vaikutuksesta (Jokinieniemi et al. 1995).

### 3.3 Reaktorionnettomuuksien seurausten rajoittaminen

Ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmät on suunniteltu viranomaisohjeissa määrättyjen, niin sanottujen suunnittelun perustana olevien onnettomuustilanteiden pohjalta. Päämääränä on, että laitoksen turvajärjestelmät pystyvät selviämään kaikista suunnittelun perustana olevista onnettomuustilanteista ilman, että suuria määriä radioaktiivisia aineita vapautuu laitoksen ulkopuolelle. Länsimaisilla kevytvesireaktoreilla sydämen häätäjähdysjärjestelmän suunnittelun perustana oleva onnettomuus on ollut suurimman paineastiaan johtavan putken katkeaminen ja sitä seuraava jäähdytteenmenetysonnettomuus.

Vuonna 1979 tapahtuneen Three Mile Islandin onnettomuuden jälkeen myös Suomessa alettiin kiinnittää lisääntyvää huomiota reaktorisydämen sulamiseen johtaviin onnettomuuksiin. Tämän

seurauksena jo vuosia on varautuminen vakaviin onnettomuuksiin ollut olennainen osa ydinvoimalaitoksen suunnittelua. Myös nykyisiin laitoksiin on edellytetty tehtävän muutoksia, joilla pyritään lieventämään mahdollisen vakavan onnettomuuden vaikutuksia ympäristöön. Keskeisenä tavoitteena vakavien reaktorionnettomuuksien hallinnassa on suojarakennuksen eheyden säilyttäminen.

Ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmien ensisijainen tarkoitus on estää laitoshäiriön eteneminen sydänvaurioon johtavaksi vakavaksi onnettomuudeksi. Jos onnettomuus kaikesta huolimatta pääsisi kehittymään sydänvaurioon asti, on vielä monia keinoja pysäyttämään onnettomuuden eteneminen ja lieventämään onnettomuuden seurausvaikutuksia suojarakennukselle ja ympäristölle. Vakavien onnettomuuksien hallinnalla tarkoitetaan laitteita ja toimenpiteitä, joilla pyritään säilyttämään suojarakennuksen eheys vakavan reaktorionnettomuuden yhteydessä. Esimerkiksi primääripiirin hallitulla paineenalenuksella voidaan lieventää suojarakennukselle aiheutuvaa paine- ja lämpökuormaa verrattuna siihen, että primääripiiriin kuuluva reaktorin paineastia rikkoutuu korkeassa paineessa. Hallintajärjestelmillä pyritään täyttämään Valtioneuvoston päätöksessä (395/91) esitetyt vaatimukset päästöjen rajoittamiselle (VNP 1991a).

Sekä Olkiluodon että Loviisan voimalaitoksessa on otettu käyttöön lisäturvallisuusjärjestelmiä. Olkiluodon voimalaitoksella on varauduttu myös siihen äärimmäisen epätodennäköiseen mahdollisuuteen, ettei yksikään hätäjäähdytyslinja toimisi. Kummallekin laitokselle on asennettu suodatin, jonka kautta voidaan johtaa kaasuja ulos ja näin estää reaktorin suojarakennuksen rikkoutuminen paineesta. Paineenalennusjärjestelmän suodatin poistaa tehokkaasti sekä hiukkasmaiset epäpuhtaudet että radioaktiivisen jodin. Modernisoinnin ja tehonkorotuksen yhteydessä vuonna 1998 reaktoriturvallisuuksi parannettiin ylipaine-suojauskapasiteetin osalta asentamalla primääripiiriin kaksi uutta varoventtiiliä ohjausputkistoihin ja automatiikkoineen. Jälkilämmönpoistokapasiteettia kasvatettiin lisäämällä levylämmönvaihtimien lämmönsiirtolevyjä. Reaktorin pääkiertopumppujen sähkökäytöt uusittiin ikääntymisen tuoman epäkäytettävyyden ehkäisemiseksi.

**Taulukko I.** Säteilyaltistusreitit ydinvoimalaitosonnettomuuden eri vaiheissa.

<p><b>Alkuvaihe</b> Hetkestä, jolloin päästön ympäristöön todetaan uhkaavan tai se on jo alkanut, aina muutamaan tuntiin päästön alusta. Altistusreitteinä ovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ulkoinen säteily laitoksesta, päästöpilvestä, laskeumasta tai pilvestä iholle ja vaatteisiin laskeutuneesta radioaktiivisesta materiaalista</li> <li>• sisäinen säteily sisään hengitetystä materiaalista.</li> </ul>
<p><b>Välivaihe</b> Muutaman tunnin kuluttua päästön alusta aina muutamaan vuorokauteen. Altistusreitit ovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ulkoinen säteily laskeumasta, tai päästöpilvestä, jos päästö vielä jatkuu</li> <li>• sisäinen säteily saastuneella alueella tuotetuista ravintoaineista, resuspensiosta tai sisään hengitetystä materiaalista, jos päästö vielä jatkuu.</li> </ul>
<p><b>Myöhäisvaihe</b> Tapahtuu paluu normaaleihin elinoloihin, jolloin altistusreitteinä ovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ulkoinen säteily laskeumasta</li> <li>• sisäinen säteily saastuneella alueella tuotetuista ravintoaineista tai resuspensiosta.</li> </ul>

Vuonna 1998 Loviisan ydinvoimalaitoksen modernisoinnin ja tehonkorotuksen yhteydessä otettiin käyttöön reaktoriturvallisuuksi lisäviä toimenpiteitä ja järjestelmiä. Näistä merkittävimmät koskevat primääripiirin paineenalennusta, suojarakennuksen paineenalennusta, vedyn hallinnan järjestelmää, reaktorikuopan suojaamista sekä paineastian ulkopuolista jäähdytysjärjestelmää onnettomuustilanteessa.

Uusissa ydinvoimalaitostyypeissä voidaan jo suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon varautuminen vakaviin onnettomuuksiin. Uusien rakenneratkaisujen avulla vakavan onnettomuuden todennäköisyys jää hyvin pieneksi. Suunnitteluvaiheessa voidaan ottaa huomioon vakavien onnettomuuksien aiheuttamat kuormitukset ja onnettomuuksien hallinta. Kaasutiivis reaktorin suojarakennus voidaan suunnitella kestäväksi kuormituksia, jotka liittyvät reaktorin sulamiseen. On suunniteltu käytettäväksi myös passiivisia lämmönsiirtojärjestelmiä, esimerkiksi eristyslauhduksia häiriötilanteiden ja onnettomuuksien hallintaan. Passiivisille järjestelmille on tyypillistä yksinkertainen rakenne ja aktiivisten komponenttien vähäisyys tai puuttuminen kokonaan, mitkä tekijät oletettavasti parantavat järjestelmien toiminnan luotettavuutta, mutta toisaalta usein toimintaa ylläpitävät voimat ovat oleellisesti pienempiä kuin aktiivisissa järjestelmissä.

### 3.4 Ympäristövaikutuksia lieventävät toimenpiteet

Siinä hyvin epätodennäköisessä tilanteessa, että onnettomuuden seurauksena ympäristöön pääsisi radioaktiivisia aineita, olisi laitoksen ympäristössä toteutettavien pelastustoimenpiteiden (säteily-suojelutoimenpiteiden) ansiosta mahdollista välttää tai ainakin lieventää päästöstä aiheutuvia seurauksia. Suojelutoimenpiteillä pyritään rajoittamaan akuuttia säteilyaltistusta onnettomuuden alkuvaiheessa ja pian sen jälkeen sekä myöhemmää laskeumasta aiheutuvaa altistusta. Suojelutoimenpiteiden tavoitteena on välttää vakavat välittömät terveysvaikutukset rajoittamalla yksilöannokset vaikutusten ilmenemiselle arvioitujen kynnysarvojen alapuolelle. Satunnaisesti ilmeneviä myöhäisvaikutuksia tulee rajoittaa niin paljon kuin on järkevästi mahdollista pienentämällä kollektiivista annosta (STUK 1995c, 2001b).

Koska onnettomuuden aikatekijät vaikuttavat mahdollisiin altistustapoihin ja säteilyannoksen pienentämiseen tähtääviin suojelutoimenpiteisiin, on päädytty kolmen eri ajanjakson määrittelyyn onnettomuuden seurauksivaikutusten tarkastelussa. Suojelutoimenpiteiden suorittamisen kannalta esitetään taulukossa I kolme aikavaihetta ja niihin liittyvät altistusreitit.

Ydinvoimalaitokselle arvioidaan päästöjä edel-

**Taulukko II.** Säteilysuojelutoimenpiteet onnettomuuden eri aikajaksoilla.

Alkuvaihe	Välivaihe	Myöhäisvaihe
Sisällesuojautuminen	Sisällesuojautuminen	
Joditabletit	Joditabletit	
Evakuointi	Evakuointi	
Kulkurajoitukset	Kulkurajoitukset	Liikkumisrajoitus
	Saastuneen alueen evakuointi	Saastuneen alueen evakuointi
	Henkilöiden puhdistus	
	Ravintoaineiden ja veden valvonta, eläinten ruokinta puhtaalla ravinnolla	Ravintoaineiden ja veden valvonta, eläinten ruokinta puhtaalla ravinnolla
		Alueiden puhdistus

tävän viiveen vaihteluvälin onnettomuuden alusta päästön alkuun voivan olla puolesta tunnista muutamaan vuorokauteen. Myös päästön kesto ja voimakkuus voivat vaihdella tällä vaihteluvälillä. Taulukossa II on esitetty päästön seurauksia lieventävien suojelutoimenpiteiden sijoittuminen eri ajankohtiin.

Ydinvoimalaitoksen käyttöluvan haltijalla ja viranomaisilla on ajan tasalla pidettävät suunnitelmat ydinvoimalaitosonnettomuuksien varalta. Pelastustoimenpiteiden (säteilysuojelutoimenpiteiden) toteuttaminen ydinvoimalaitoksen ympäristössä on viranomaisten vastuulla. Luvanhaltija voi kuitenkin hälyttää lähialueen väestön ja antaa alkuvaiheessa suosituksia suojelutoimenpiteiksi. Ydinvoimalaitoksen valmiussuunnitelma kattaa seuraavat asiat (STUK 1997c):

- valmiustilanteiden luokitus
- valmiusorganisaation kuvaus
- hälytys- ja tiedonvälitysjärjestelyjen kuvaus
- hätätilanteen hallinta ja tilanearvioiden teko
- työntekijöiden turvallisuus ja säteilysuojelu
- valmiustilanteen aikana ydinvoimalaitoksella ja sen ympäristössä tehtävät säteilymittaukset
- tiedottaminen
- tilat, laitteet ja varusteet
- valmiustilanteiden purkaminen ja jälkitoimenpiteet
- selvitys valmiuden ylläpidosta
- pelastustoimintaan liittyvät luvanhaltijan toimenpiteet.

Valtion pelastusviranomaisia ovat sisäasiainministeriö ja lääninhallitukset. Kunnan pelastusviranomaisia ovat palopäällikkö, muut pelastustoimen viranhaltijat sekä kunnan asianomainen toimielin. Muut viranomaiset osallistuvat tarvittaessa pelastustoimintaan, erityisesti Säteilyturvakeskus (STUK) antaa ydinvoimalaitosonnettomuuden yhteydessä suositukset pelastustoimenpiteiksi (säteilysuojelutoimenpiteiksi). Läänit on jaettu yhteistoiminta-alueisiin, joilla on aluepalopäällikkö yhteensovittamassa pelastustoimen suunnittelua ja johtamassa tarvittaessa pelastustoimintaa. Olkiluodon voimalaitoksen osalta yhteistoiminta-alueen johtokeskus on Raumalla ja Loviisan voimalaitoksen osalta Loviisassa. Luvanhaltijoilla ja STUKilla on kiinteitä säteilymittareita voimalaitosten ympäristössä. Lisäksi luvanhaltijoilla, pelastusviranomaisilla ja STUKilla on valmius lähettää säteilymittauspartioita laitosten ympäristöön.

Vuosittain järjestetään valmiusharjoituksia, joissa harjoitellaan valmius- ja pelastussuunnitelmien mukaista toimintaa, testataan valmiutta ja tunnistetaan kehitystarpeita. Sisäasiainministeriö on antanut määräyksen säteilyvaaratilanteessa tarvittavien suojelutoimenpiteiden suunnittelusta ja niistä tiedottamisesta ja siihen liittyvän ohjeen (Sisäasiainministeriö 1997, 1998).

## 4 ONNETTOMUUSRISKIN ARVIOINTI

### 4.1 PSA-tasojen 1, 2 ja 3 tutkimusmenetelmien kuvaus ja keskeiset tavoitteet

Todennäköisyyspohjaisella turvallisuusanalyysillä, PSA, selvitetään laskennallisesti ydinvoimalaitoksen käytön riskejä. Analyysien perusteella arvioidaan onnettomuuksien estämiseen tai lieventämiseen suunniteltuja toimintoja. Näihin toimiin saattaa liittyä useita moninkertaisia turvallisuus- ja apujärjestelmiä. PSA-menetelyä käytetään ydinvoimalaitoksen suunnittelun, rakentamisen ja käytön aikana osaltaan varmistamaan, että laitoksen turvallisuus on riittävä kaikissa laitoksen käyttötiloissa. Suurin hyöty todennäköisyyspohjaisista turvallisuusanalyyseistä saadaan käyttämällä jatkuvasti päivitettävää PSA:ta. Voimayhtiön henkilökunnan osallistuminen PSA:n laadintaan ja hyväksikäyttöön edesauttaa yleistä laitoksen toiminnan ja eri järjestelmien välisten vuorovaikutusten ymmärtämistä. Laitoksen turvallisuutta arvioitaessa todennäköisyyspohjaisia ja deterministisiä turvallisuusanalyysijä käytetään rinnakkain niin, että menetelmät täydentävät toisiaan. Deterministisillä analyyseillä osoitetaan, että järjestelmät ja laitteet täyttävät niille asetetut tehtävät (STUK 1996a).

PSA jakaantuu tasoihin 1, 2 ja 3, joilla pyritään hallitsemaan laajan turvallisuusanalyysin syvyyttä.

- Taso 1 on turvallisuusanalyysin ensimmäinen osa. Siinä määritetään reaktorisydämen vaurioitumistodennäköisyys. Tämä edellyttää vaurioitumiseen johtavien onnettomuusketjujen määrittämistä. Alkutapahtumista otetaan tavallisesti huomioon laitoksen sisäisistä vioista ja häiriöistä alkavat tapahtumat, ulkoisen sähköverkon menetys, tulipalot, tulvat, poikkeukselliset sääolot ja muut ympäristöstä johtuvat tekijät, sekä ihmisen toiminnasta johtuvat

poikkeamat. Yleensä alkutapahtumien tunnistamisessa käytetään apuna

- insinööripäätelyä
  - muiden PSA-tutkimusten tuloksia
  - turvallisuusraportteja
  - laitoksen käyttökokemuksia
  - yleisiä alkutapahtumaluetteloita
  - logiikkadiagrammeja.
- Tason 2 turvallisuusanalyysissä tarkastellaan reaktorisydämen sulamista, onnettomuuden etenemistä ja radioaktiivisten aineiden vuotamista suojarakennuksesta ympäristöön. Siinä selvitetään myös mahdolliset suojarakennuksen ohitusketjut ja arvioidaan reaktorionnettomuuden fysikaalinen eteneminen ja ajoittuminen erityyppisissä onnettomuuksissa, jotka uhkaavat suojarakennuksen eheyttä.
  - Tason 3 turvallisuusanalyysissä selvitetään radioaktiivisten päästöjen aiheuttama riski väestölle ja ympäristölle. Ydinvoimalaitoksen käyttö lupaa varten ei toistaiseksi vaadita täysimittaista todennäköisyyspohjaista ympäristövaiikutusten arviointia. Deterministisin analyysein on kuitenkin arvioitava ympäristön säteilyannoksia erilaisissa häiriö- ja onnettomuustilanteissa.

PSA-analyyysien tulosten on täytettävä ennakolta määritellyt numeeriset suunnittelutavoitteet. Lisäksi koko ydinvoimalaitosta koskevat numeeriset suunnittelutavoitteet ovat (STUK 1996a):

- 1) Sydänvauriotaajuuden odotusarvon on oltava pienempi kuin  $10^{-5}$ /vuosi ja
- 2) Valtioneuvoston päätöksen (395/91) 12 §:ssä tarkoitetun vakavien reaktorionnettomuuksien raja-arvon ylittävän päästön taajuuden on oltava odotusarvoltaan pienempi kuin  $5 \cdot 10^{-7}$ /vuosi. Suojarakennus tulee kuitenkin suunnit-



tella siten, että se hyvin todennäköisesti säilyttää tiiviytensä sekä matala- että korkeapaineisissa sydämen vaurioitumisissa.

PSA tukee sekä ydinvoimalaitoksen suunnittelua ja turvallisuusanalyysiä että ydinvoimalaitoksen turvallisuuden hallintaa ja valvontaa koko käyttöajan ajan. Voimayhtiöt pitävät yllä tietokantaa turvallisuuteen vaikuttavien laitteiden luotettavuudesta, alkutapahtumista ja inhimillisistä virheistä. Voimayhtiöt myös päivittävät PSA-selvityksiään vastaamaan käyttökokemuksia ja laitosmuutoksia.

PSA:n tuloksia käytetään ydinvoimalaitoksen käytön turvallisuutta koskevien päätösten tukena mm. seuraavilla alueilla (STUK 1996a):

- tarkastusten kohdentaminen ja painottaminen
- turvallisuusteknisten käyttöehtojen soveltaminen
- tilannekohtainen laitevikojen riskien arvioiminen
- käyttöhenkilökunnan koulutus
- hätätilanne- ja häiriöohjeiden laatiminen
- laitoksen muutokset
- tapahtuneiden häiriöiden ja vikojen riskiarvion jälkiseuranta
- ennakkohuolto- ja kunnonvalvontaohjelmat.

## 4.2 Päästöjen ympäristövaikutusten laskennallinen arviointi

Radioaktiivisten aineiden päästöjen vaikutuksia ympäristölle voidaan arvioida leviämisen ja annoslaskentamallien avulla (EC 1994, Rossi 1998). Vesistöön tapahtuvat normaalikäyttöön kuuluvat veden liuenneiden radioaktiivisten aineiden päästöt tehdään yleensä viivästettyinä ja hallitusti, jolloin vapautuvien radionuklidien määrää voidaan valvoa. Ilmaan tapahtuvien normaalikäytön päästöjen määrät ovat pieniä kuten myös niiden säteilyvaikutukset väestölle (STUK 2000b).

Onnettomuuksien yhteydessä ilmaan tapahtuvien radioaktiivisten aineiden päästöistä saadaan arvioita esimerkiksi tason 2 PSA:n tuloksista. Sitä kutsutaan yleisesti lähdermiksi. Se määrittelee vapautuvien radionuklidien määrät, päästön korkeuden ja sen ajallisen käyttäytymisen sekä lisäksi mahdollisen päästön yhteydessä vapautuvan lämpöenergian.

Radioaktiivisen päästön vapauduttua ilmaan se leviää tuulen vaikutuksesta ja laimenee ilmakehän turbulenssin sekoitusvaikutuksen seurauksena. Yleisesti leviämisen arviointi suoritetaan tilastollisen teorian avulla. Tärkeimpiä huomioon otettuja fysikaalisia prosesseja leviämisestä aiheutuvien säteilyannosten laskennallisessa arvioinnissa ovat:

- turbulentin diffuusion aiheuttama dispersio ja tuulennopeus
- kuiva laskeuma (depositio) ilman ja maaperän, kasvillisuuden ja rakennusten vuorovaikutuksessa
- märkä laskeuma sateen vaikuttaessa päästöpilveen
- radioaktiivinen hajoaminen ja tytärnuklidien muodostuminen.

Muista tekijöistä, jotka saattavat eräissä tilanteissa vaikuttaa aiheutuviin säteilyannoksiin, voidaan mainita pilvennousema, rakennusten pyörrealueen laimentava vaikutus ja gravitaation vaikutus laskeumaan. Radionuklidien käyttäytymisen maaperässä, vesistöissä, kasvillisuudessa ja rakennuksissa sekä siirtyminen ravintoon vaikuttavat pitemmän ajan kuluessa kertyviin annoksiin.

Laimeneminen on kääntäen verrannollinen tuulennopeuteen. Horisontaaliset ja vertikaaliset dispersioparametrit riippuvat ilmakehän vakauudesta (stabiiliudesta). Gaussin mallissa oletetaan, että kuivan laskeuman vaikutuksesta pitoisuus vähenee tasaisesti kauttaaltaan pilvessä. Tämä pätee kuitenkin vain tilanteessa, missä laskeuma on pieni verrattuna pystysuuntaiseen sekoittumiseen. Käytössä on myös malleja, jotka ottavat paremmin huomioon pilven kulumisen maanpinnalla. Tällöin laskeuman vaikutus kohdistuu voimakkaimmin maanpinnan läheiseen kerrokseen.

Yleisimmin käytetyt ja tärkeimpinä pidetyt altistus- ja annosreitit ovat:

- ulkoinen gammasäteily päästöpilvestä
- pilvessä olevien radioaktiivisten aineiden hengittämisestä aiheutuva sisäinen altistus
- ulkoinen gammasäteily laskeumasta
- ulkoinen beetasäteily iholle tai vaatteisiin laskeutuneista aineista
- laskeumasta resuspension välityksellä hengityselimistöön tulevat radionuklidit
- laskeuma-alueella tuotettujen ravintoaineiden nauttimisesta aiheutuva annos.

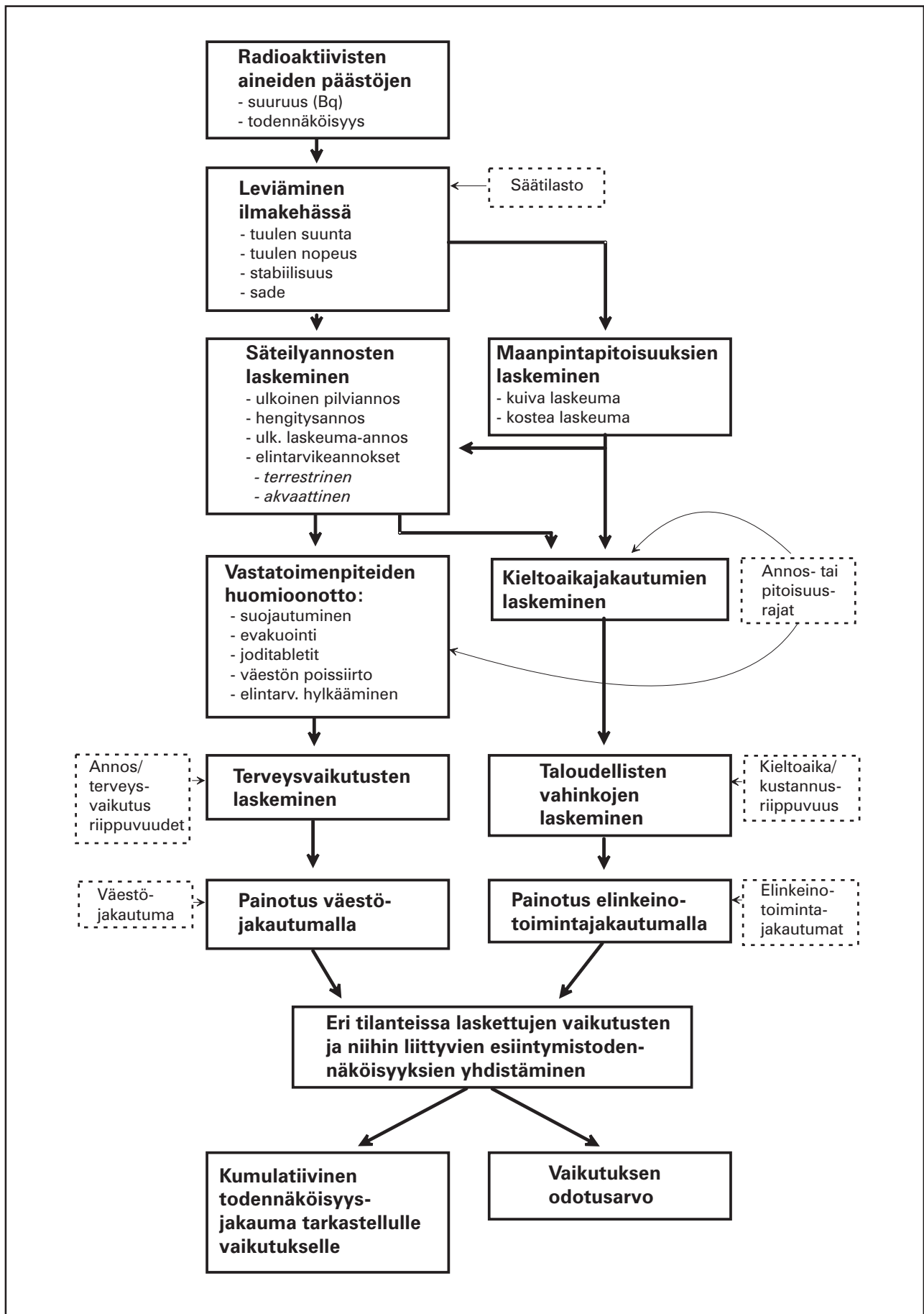
Säteilyannokset lasketaan elinkohtaisina ja halutulle ajanjaksolle. Yleensä lasketaan lyhyen ajan kuluessa kertynyt annos varhaisvaikutusten arvioimiseksi sekä pitkän ajan kuluessa kertynyt annos myöhäisvaikutusten arvioimiseksi. Väestöannos lasketaan summaamalla alueittaiset keskimääräiset yksilöannokset kerrottuna kyseisten alueiden väestömäärillä. Säteilyannokset muunnetaan terveysvaikutuksiksi annosvastefunktioiden avulla. Terveysvaikutuksina voidaan käsitellä varhais- ja myöhäisvaikutukset. Taloudellisia menetyksiä aiheuttavat ympäristössä ensisijaisesti:

- terveyshaitat
- investointien menetykset
- evakuoinnin ja väestönsiirron aiheuttamat kustannukset
- saastuneiden elintarvikkeiden aiheuttamat kustannukset.

Kuvassa 6 on esitetty VTT:llä ympäristövaikutusten arvioinnissa käytössä olevan ARANO-mallin (Ilvonen 1994, Savolainen et al. 1977) laskentajär-

jestys. Ravintoaineiden saastuminen ja niistä aiheutuvassa altistuksessa otetaan huomioon kausivaihtelun vaikutus viljelykseen ja laiduntamiseen (Kakko et al. 1984). Ravintoaineannosten merkitys voi kasvaa suuremmaksi kuin muiden altistusreittien etenkin, jos päästö tapahtuu kasvu- ja laidunkaudella (Partanen et al. 1986). Biosfäärissä tapahtuvaan radioaktiivisten aineiden kulkeutumisen ja ihmisen säteilyaltistuksen tarkasteluun on käytettävissä DETRA-malli (Suolanen 1994, Suolanen 1996). Taloudellisten vaikutusten laskentaa sekä siinä yhteydessä tarvittavia ympäristön investointi- ja kustannustietoja on käsitelty viitteessä (NEA 2000).

ARANO-mallilla on osallistuttu myös kansainvälisiin laskentaohjelmien vertailuihin, joista viimeisimmän 1990-luvun alussa suoritettun mukaan ARANO:n laskentatulokset sijoittuivat hyvin muiden vertailussa mukana olleiden laskentaohjelmien antamien tulosten joukkoon (EC 1994, Rossi 1994).



Kuva 6. ARANO-laskentamallin laskentajärjestys (Ilvonen 1994).



## 5 YDINVOIMALAITOKSEN MERKITYS YMPÄRISTÖSSÄ

### 5.1 Ydinvoimalaitoksen normaalit vaikutukset ympäristössä

Ydinvoimalaitoksen normaaleille radioaktiivisten aineiden päästöille ja niistä aiheutuville ympäristön väestön säteilyannoksille asetetaan niin matalat raja-arvot, ettei päästöillä ole merkitystä ympäristössä. Radioaktiivisten aineiden päästöt suomalaisista ydinvoimalaitoksista ovat olleet viime vuosina selvästi alle niille asetettujen rajojen. Ydinvoimalaitoksen normaalit vaikutukset ympäristössä ovat siten tavanomaisia jäähdytysveden, liikenteen, jätteiden, rakennusten ja rakenteiden vaikutuksia sekä sosiaalisia vaikutuksia, joista ainoastaan taloudelliset vaikutukset rakennusvaiheessa on arvioitu merkittäviksi Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten osalta (Fortum 1999, TVO 1999).

Uuden laitosesikön mahdollinen sijoittaminen Olkiluotoon tai Hästholmeniin muuttaisi jossain määrin ympäristöä. Sähkön siirto asiakkaille vaatisi todennäköisesti uusia voimajohtoja ja kytkinasemia, laitosaluetta rakennettaisiin lisää, liikenne kasvaisi ja jäähdytysveden laskeminen mereen laajentaisi lämpenevän vesialueen kaksinkertaiseksi nykyiseen verrattuna. Radioaktiivisten aineiden normaalit päästöt ilmakehään ja mereen voidaan olettaa yhtä suuriksi kuin nykyisten laitosten, jolloin niistä ei arvioiden mukaan olisi ympäristön väestön terveydelle haittaa (Fortum 1999, TVO 1999).

### 5.2 Tapahtuneita ydinvoimalaitosonnettomuuksia

Kaupallisessa käytössä ydinvoimalaitoksissa on tapahtunut kaksi vakavaa reaktorionnettomuutta. Vuonna 1979 Three Mile Islandin painevesilaitoksella Harrisburgin lähellä USA:ssa tapahtunut onnettomuus johti reaktorisydämen osittaiseen

sulamiseen, mutta onnettomuuden ympäristövaikutukset jäivät pieniksi. Pahin onnettomuus on vuonna 1986 tapahtunut Ukrainassa sijaitsevan Tšernobylin ydinvoimalan nelosreaktorin räjähdys, josta seurasi vakavia ympäristövaikutuksia.

Three Mile Islandin laitoksella reaktorin jäähdytys häiriintyi eräiden alkutapahtumien seurauksena, minkä johdosta ensiöpiirin jäähdytysvesi alkoi kumentua ja paine nousta. Turvajärjestelmät sammuttivat reaktorin ja varoventtiilit päästivät vettä ja höyryä ensiöpiiristä alentaen sen painetta. Kun paine oli alentunut tarpeeksi, olisi varoventtiilien pitänyt sulkeutua, mutta yksi niistä juuttuikin auki, josta pääsi edelleen vettä ulos. Hätjähdytysjärjestelmä käynnistyi automaattisesti uudelleen ja tilanne olisi ollut muuten hallinnassa, mutta henkilökunta, joka ei heti tienynyt yhden varoventtiilin aukiolosta, arvioi tilanteen väärin ja pysäytti hätjähdytyksen. Lopulta tapahtumat johtivat reaktorisydämen osittaiseen sulamiseen. Osa radioaktiivisista aineista pääsi suojarakennukseen ja koska sitä ei oltu suljettu täysin tiiviisti tarpeeksi aikaisessa vaiheessa, pääsi osa radioaktiivista aineista apurakennukseen ja sieltä edelleen ulkoilmaan. Kuitenkin päästöt ympäristöön jäivät vähäisiksi. Ympäristössä laskennallisesti arvioitu suurin yksilöannos oli hieman alle 1 mSv (UNSCEAR 1993). Onnettomuuden vaikutukset ympäristössä olivat lähinnä psykologisia, mutta itse laitoksen puhdistustyöt olivat varsin mittavat ja onnettomuus aiheutti suuria tappioita voimayhtiölle.

RBMK-reaktorityyppiä on rakennettu vain entisessä Neuvostoliitossa ja se on vesijähdytteinen mutta grafiittihidasteinen. Tšernobylin ydinvoimalan nelosreaktorin räjähdys tapahtui sen jälkeen, kun reaktoria ajettiin normaaliin huoltoseisokkiin ja siinä yhteydessä haluttiin ulkoisen sähköverkon menetyksen varalta testata, pystyisikö yksi turpiini tuottamaan riittävästi sähköä reak-

torin kiertopumppujen pyörittämiseen ja alasajon toteuttamiseen. Voimalan työntekijät sulkiivat laitoksen turvajärjestelmän, pienensivät vähitellen reaktorin tehoa, ainoan sähköä tuottavan turpiinin kierrosluku laski, pumppujen sähköteho ja pumppausteho pienenevät. Veden virtauksen vähetessä se höyrystyi entistä enemmän reaktorissa, jossa kevytvesireaktoreista poikkeavien fyysikaalisten ominaisuuksien takia ketjureaktio vain kiihtyi veden vähetessä, koska grafiittihidastus toimi edelleen. Tehon karkaamisen seurauksena oli sarja räjähdyskappaleita, jotka tuhosivat koko reaktoriyksikön. Räjähdysten ja niitä seuranneen 10 päivää jatkuneen grafiitin palamisen seurauksena muodostui valtava radioaktiivisten aineiden pilvi, joka levisi ilmapirtausten mukana ympäri Ukrainaa, Valko-Venäjää, Venäjää ja Eurooppaa.

Voimalan ympäriltä noin 30 kilometrin säteeltä siirrettiin pois 110 000 ihmistä. Myöhemmin asutuskelvottomiksi asetettiin lisää alueita ja poissiirretyn väestön määrä kasvoi ainakin 200 000:een. Alueen siivoukseen ja tuhojen korjaukseen osallistui 650 000 ihmistä. Säteily sairautteen kuoli välittömästi 30 ihmistä, jotka olivat onnettomuuden ensivaiheiden hallintaan osallistuneita. YK:n UNSCEAR-raportin mukaan on toistaiseksi ilmennyt 1800 lasten kilpirauhassyöpätapausta niillä, jotka altistuivat onnettomuuden aikana (UNSCEAR 2000). Näitä tapauksia lukuun ottamatta ei ole osoitettu säteilyaltistuksesta johtuvia vakavia terveystahaittoja. Kuitenkin onnettomuudella on suuri negatiivinen psyykinen vaikutus tuhansiin ihmisiin. Onnettomuuden aiheuttamat taloudelliset kustannukset ovat kymmeniä miljardeja markkoja. Tšernobylin kolmesta ehjästä reaktorista viimeinen suljettiin vuonna 2000.

### 5.3 Tutkimuksia onnettomuuksien mahdollisista ympäristövaikutuksista

Ydinvoimalaitosten ympäristövaikutuksia on arvioitu sekä deterministisissä että todennäköisyyspohjaisissa analyyseissä. Laajimmat PSA-tason 3 analyysit on tehty Yhdysvalloissa.

Ensimmäinen todennäköisyyspohjainen koko ydinvoimalaitoksen kattava riskitutkimus oli yhdysvaltalaisen ydinturvallisuusviranomaisen (Nuclear Regulatory Commission) WASH-1400

(ns. Rasmussenin raportti) vuodelta 1975 (U.S. NRC 1975). Tämä kahta yhdysvaltalaisista laitosta koskeva laaja selvitys antoi sysäyksen PSA-menetelmien kehitykselle. Siinä arvioitiin amerikkalaisten kiehutus- ja painevesireaktorilaitosten onnettomuusmahdollisuuksia lähtien niiden alkusyiden määrittämisestä. Onnettomuusketjuja kuvattiin tapahtumapuilla ja niiden fyysikaalinen eteneminen arvioitiin aina suojarakennuksen vikaantumismahdollisuuteen asti. Myös kokeita tehtiin ilmiöiden selvittämiseksi. Lopputuloksena todettiin, että sydämen sulamiseen johtavat onnettomuudet johtavat suurimpiin päästöihin. Yksittäiset päästöt jaoteltiin päästöluokkiin päästömäärien sekä päästön ajoituksen ja keston sekä vapautuvan lämmön perusteella. Radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön ja sitä seuraavat väestön säteilyannokset arvioitiin kehitettyjen mallien avulla. Lopputuloksissa kiinnittää huomiota päästömäärien suuret vaihtelurajat, jotka kuvastuvat ympäristöriskeissä.

Seuraava huomattava PSA-tutkimus oli NRC:n NUREG-1150-selvitys vuodelta 1990 (U.S. NRC 1990), jossa arvioitiin viiden yhdysvaltalaisen laitoksen riskiä. Menetelmäkehitystä oli tapahtunut erityisesti vakavien reaktorionnettomuuksien tutkimuksessa, riskien arviointimenetelmissä sekä epävarmuusanalyyseissä. Laitosten arvioidut riskit väestölle jäivät pienemmiksi kuin WASH-1400:ssa. Kaikkien viiden laitoksen todettiin täyttävän NRC:n turvallisuustavoitteet. Onnettomuuden alkutapahtumina todettiin maanjäristyksillä ja tulipaloilla olevan merkitystä laitoksen sisäisten alkutapahtumien ohella. Tämä johtuu siitä, että ne tekevät samanaikaisesti useita turvajärjestelmiä toimintakyvyttömiksi. Alkutapahtumina ei käsitelty inhimillisiä virheitä, joissa operaattorit omalla toiminnallaan saattavat käynnistää onnettomuuden, eikä onnettomuuksia alhaisella tehotasolla ja seisokin aikana. Suojarakennusten eheyttä vaarantavat ilmiöt ovat laitoskohtaisia. Ympäristön suojelutoimenpiteistä erityisesti sisälesuojautumisella ja evakuoinnin ajoituksella todettiin olevan suurin merkitys varhaisvaikutuksiin. Raportissa todetaan, että tulokset ovat hyvin laitoskohtaisia, eikä niitä pidä suoraan yleistää muihin laitoksiin.

Lähteessä (U.S. NRC 1997) laskettiin todennäköisyyspohjaisesti ympäristövaikutuksia NUREG-1150:n lähde-termeistä. Herkkyystarkasteluina

laskettiin säteilysuojelutoimenpiteiden vaikutusta välittömiin terveysvaikutuksiin, myöhäisvaikutuksiin ja väestösiirtoon eri sijaintipaikoilla. Laskelmat osoittivat, että NRC:n turvallisuustavoitteet toteutuvat NUREG-1150-lähdetermien osalta.

Muita merkittäviä ulkomaisia riskitutkimuksia ovat saksalainen ja ranskalainen, jotka kuitenkin rajoittuvat tasolle 1 (Heuser et al. 1990, Brisbois et al. 1991). Suomessa voimayhtiöt ovat tehneet tasojen 1 ja 2 tutkimuksia (mm. TVO 1997b, Kattainen et al. 1997).

### 5.3.1 Suomalaiset tutkimukset

Ensimmäiset suomalaiset ympäristövaikutusten laajemmat arvioinnit käynnistyivät 1970-luvulla. Tyypillistä näissä tutkimuksissa käytetyille päästöille oli, että ne olivat hyvin vakaviin reaktorionnettomuuksiin liittyviä ja siten paljon suurempia kuin YVL-ohjeissa määritellyt päästön raja-arvot. Päästoluokkien valinta perustui tuolloin lähinnä ulkomaisiin selvityksiin. Lisäksi sään vaikutusta tuloksiin tarkasteltiin laskemalla tulos erilaisissa leviämistilanteissa ja ottamalla lopullisissa tuloksissa huomioon eri tilanteiden esiintymistaajuus. Laskentamenetelmien kehitystyön ohessa suoritettiin ydinvoimalaitosten sijaintipaikkatutkimus, jonka liitteessä 5 (Mankamo et al. 1976) arvioidaan erityisesti ydinvoimalaitosonnettomuuksien aiheuttamia terveysvaikutuksia ja taloudellisia vahinkoja. Tutkimuksessa käytettiin WASH-1400-raportin lähdetermejä mutta ympäristötiedot perustuvat eteläisen Suomen olosuhteisiin ja sää tietoihin. 1980-luvun tutkimuksista mainittakoon erityisesti väestöön kohdistuvien säteilysuojelutoimenpiteiden tehokkuuden arvioinnit (Rossi et al. 1986, Rossi 1990, Rossi et al. 1990). Laskentoja suoritettiin Loviisan ja Olkiluodon voimalaitosten sijaintipaikoille käyttäen myös niiden reaktoreiden aktiivisuusinventareja ja ympäristötietoja. 1990-luvulla ei ole suoritettu laajoja ydinvoimalaitosten onnettomuuksien todennäköisyyspohjaisia ympäristövaikutuslaskentoja.

Rossi et al. (1986) käsitteli nopeiden suojelutoimenpiteiden, sisällesuojautumisen ja evakuoinnin vaikutusta säteilyn varhaisvaikutuksiin muutamassa yksittäisessä leviämistilanteessa. Tuloksissa todetaan, että sisällesuojautuminen pienentää merkittävästi akuuttien terveysvaikutusten mää-

rää, mutta sisällesuojautumista seuraava nopea evakuointi ei enää oleellisesti tuo etua varhaisvaikutusten määrää laskettaessa. Hyvän sisällesuojautumisen ansiosta evakuoinnin ajoituksella ei ole suurta merkitystä. Tilanne on täysin toinen, jos päästön tiedetään uhkaavan ja evakuointi voidaan toteuttaa ennen päästön alkua. Silloin voidaan evakuoinnin ansiosta parhaassa tapauksessa välttää kokonaan altistuminen. Evakuointiin liittyy kuitenkin tekijöitä, joita ei voida etukäteen varmuudella tietää. Esimerkkinä mainittakoon onnettomuuden kehittymisen arviointi ja säätilanteen muutokset.

Säteilysuojelutoimenpiteiden tehokkuutta sekä erityisesti pitkän ajan kuluessa toimeenpantujen suojelutoimenpiteiden tehokkuutta on arvioitu mm. lähteessä (Rossi et al. 1990). Tuloksista voidaan päätellä, että suojelutoimenpiteiden tehokkuus riippuu voimakkaasti päästön suuruudesta.

Stabiilin jodin käyttö estettäessä radioaktiivisen jodin kerääntymistä kilpirauhaseen on hyödyksi, mikäli päästössä on jodia. Joditablettien käytön tehokkuus riippuu päästön koostumuksesta. Jos päästö koostuu jalokaasuista, ei joditableteista ole hyötyä, koska annos aiheutuu ulkoisesta säteilystä.

Pitkän ajan kuluessa kertyviä annoksia aiheuttaa hengitetyistä radioaktiivisista aineista sekä maahan laskeutuneista radioaktiivisista aineista ja saastuneista maataloustuotteista. Ravintoainesten suuruus riippuu suuresti siitä, mihin vuodenaikaan onnettomuus tapahtuu. Jos radioaktiiviset aineet laskeutuvat suoraan kasvuston päälle, siirtyy merkittävä osa niistä ravintoaineiden mukana suoraan elintarvikkeisiin. Jos laskeutuminen tapahtuu kasvukauden ulkopuolella, tapahtuu siirtyminen hitaammin ja pitoisuudet jäävät pienemmiksi (Partanen et al. 1986, Rossi 1990, Rossi et al. 1990).

Loviisan tason 2 PSA-laskelmiin valittiin onnettomuusluokat, joiden esiintymistaajuus on vähintään  $1 \cdot 10^{-9}$  reaktorivuotta kohden (Kattainen et al. 1997). Lähtötietoina käytettiin tason 1 PSA:n sydänvaurioon johtavia onnettomuusketjuja ja tason 2 PSA:n onnettomuusluokkia. Onnettomuusluokkien päästöt laskettiin lähdetermimallilla, jonka lähtötietoina ovat onnettomuuden alkutapahtumat, laitoksen järjestelmien toimivuus, suojarakennuksen tapahtumat onnettomuuden aikana sekä fissiotuotteiden pidättymiseen vaikutta-

vat tekijät. Lähdetermimallilla laskettiin tapahtumaketjuille suojarakennuksesta vapautuvien fissiotuotteiden määrät sekä päästöä kuvaavia tekijöitä kuten päästön alkuaika, kesto ja korkeus. Ajoituksen huomioonottamista pidettiin tärkeänä monien onnettomuustapausten hitaan etenemisen takia. Onnettomuuden tapahtumat onkin jaettu kolmeen aikajaksoon. Fissiotuotteet jaettiin yhdeksään ryhmään. Kuvassa 7 on esitetty Loviisan tason 2 PSA:n tuloksia (Pärssinen et al. 1997).

Kuvasta 7 nähdään, että Loviisan päästötaajuudet jäävät arvon  $1 \cdot 10^{-5}$ /reaktorivuosi alle. Jalokaasujen vapautumisosuudet pysyvät suurina kaikissa päästöluokissa. Jodien, cesiumien ja telluurien vapautumisosuudet vaihtelevat 10 prosentin molemmin puolin mutta muiden aineiden osuudet jäävät kertaluokkia pienemmiksi. Päästön viiveet ovat tyypillisesti muutamasta tunnista kymmeneen tunteihin. Muutamassa nopeasti tapahtuvassa päästöluokassa jäävät jodien, cesiumien ja telluurien päästöosuudet alle prosentin. Päästökorkeudet vaihtelevat 20 ja 60 metrin välillä.

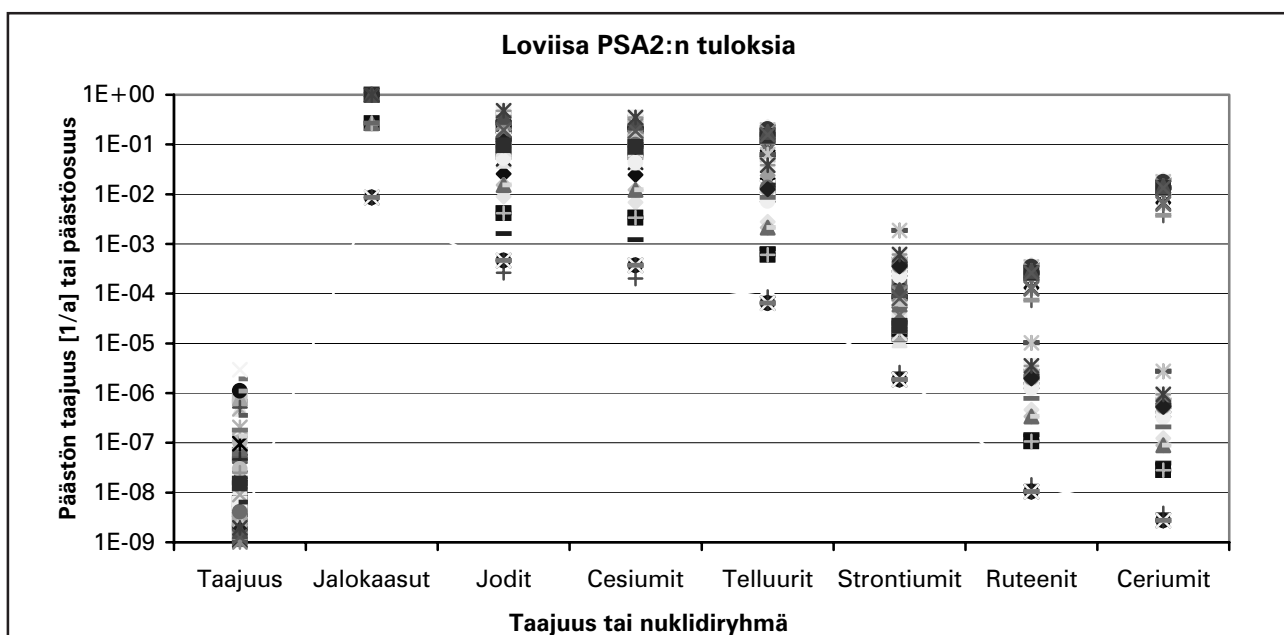
Ottamalla huomioon kaikki laitoksen sisäiset alkutapahtumat, tulipalot, sisäiset tulvat, rankat sääolosuhteet, maanjäristykset ja seisokkitilat, arvioitiin sydänvaurion kokonaistodennäköisyydeksi vuoden 1997 lopulla  $2 \cdot 10^{-4}$  vuotta kohden. Laitoksen sisäisistä alkutapahtumista aiheutuvan suuren päästön todennäköisyydeksi arvioitiin  $5 \cdot 10^{-6}$  vuotta kohden. Nämä riskiarviot sisälsivät

Loviisan laitokselle vakavien reaktorionnettomuuksien varalle suunnitellut laitosmuunnokset, jotka on suunniteltu toteutettaviksi vuoteen 2002 mennessä. Riskiarvioihin sisältyy huomattavaa epävarmuutta, koska riskimallit eivät ole täysin kattavia ja niissä joudutaan tekemään yksinkertaistavia oletuksia. Analyysien suurin merkitys on siinä, että niiden avulla on järjestelmällisesti tunnistettu riskitekijöitä ja poistettu riskitekijöitä (STUK 1998b). Analyysistä on jatkettu vuoden 1997 jälkeen.

Kuvassa 8 on esitetty kootusti Olkiluodon tason 2 PSA:n tuloksia (TVO 1997).

Olkiluodon laitosten päästötaajuudet jäävät arvon  $1 \cdot 10^{-5}$ /reaktorivuosi alle. Jalokaasujen vapautumisosuudet pysyvät suurina useissa päästöluokissa. Jodin, cesiumin ja telluurin päästöosuudet jäävät alle 10 prosentin. Muiden alkuaineryhmien päästöosuudet jäävät selvästi pienemmiksi. Päästöjen alkuketket vaihtelevat. Päästöt tapahtuvat suurimmaksi osaksi ilmastointipiipun kautta, jolloin päästökorkeus on 100 metriä.

Ottamalla huomioon kaikki laitoksen sisäiset alkutapahtumat, tulipalot, sisäiset tulvat, rankat sääolosuhteet, maanjäristykset ja seisokkitilat, arvioitiin sydänvaurion kokonaistodennäköisyydeksi vuoden 1997 lopulla  $1,4 \cdot 10^{-5}$  vuotta kohden. Suurimman osan riskistä muodostavat sisäiset alkutapahtumat. Suuren päästön todennäköisyydeksi arvioitiin  $4 \cdot 10^{-6}$  vuotta kohden. Päästöriski



**Kuva 7.** Yhteenvedo Loviisan tason 2 PSA:n päästötaajuuksista ja -osuuksista nuklidiryhmittäin. Kuvaan sisältyy 86 onnettomuusluokkaa (Pärssinen et al. 1997).

on suurin tehokäytön aikana (STUK 1998c). Analyysyjä on jatkettu vuoden 1997 jälkeen.

Arvioitaessa sääolosuhteista tai maanjäristyksestä aiheutuvan riskin riippuvuutta sijaintipaikasta, on Olkiluodon ja Hästholmenin välillä todettu pieniä eroja, mutta niiden syynä eivät varsinaisesti ole eroavuudet luonnonolosuhteissa vaan laitosten rakenteissa ja teknillisissä ratkaisuisa.

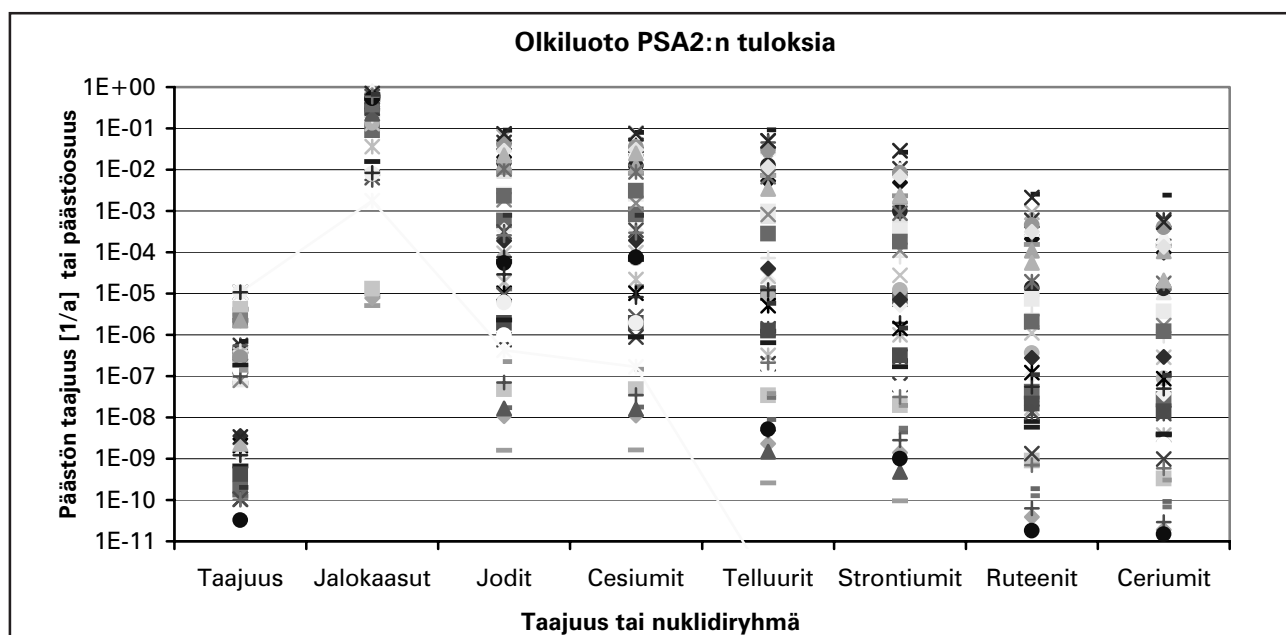
Säteilyturvakeskuksen toimeksiantona tehdystä tutkimuksesta (Rossi 2000) on arvioitu muutamasta Loviisan ja Olkiluodon tason 2 PSA:n päästöluokasta ympäristön säteilyannoksia sekä evakuoinnin merkitystä. Odotusarvoina esitetyt pitkän ajan kuluessa kertyvät väestöannokset ilman suojelutoimenpiteitäkin jäävät pieniksi (alle yhden manSv:n), kun otetaan huomioon sydänvauriotaajuus.

Onnettomuutta mahdollisesti seuraavan päästön aiheuttamia ympäristövahinkoja voidaan vähentää sopivilla pelastustoimenpiteillä (säteily-suojelutoimenpiteillä) mutta niistä seuraa myös kustannuksia. Onnettomuuden eteneminen päästöksi ja etenkin siihen liittyvät ennusteet voivat vaikuttaa ympäristön riskiin merkittävästi. Jos päästön voidaan arvioida alkavan useiden tuntien kuluttua, on mahdollista toteuttaa esimerkiksi lähialueen evakuointi jo ennen päästön alkua. Välittömiä terveysvaikutuksia voidaan vähentää vielä merkittävästikin, vaikka päästö olisi jo alkanut, jos voidaan paikallisesti suojautua sisätilo-

hin päästöpilven ohikulun ajaksi. Suojarakenteiden ominaisuudet vaikuttavat suojaustehokkuuteen. Mikäli päästöpilvessä on jodia, on hyödyksi nauttia stabiilia jodia ennen altistusta tai viimeistään sen aikana. Suojelutoimenpiteiden laajuus ja toimeenpano riippuvat vallitsevasta tilanteesta ja niihin vaikuttavat päästön suuruus ja sen ajallinen käyttäytyminen, päästön leviämistä määräävä säätilanne, vuoden- ja vuorokaudenaika sekä sosiaaliset ja yhteiskunnalliset näkökohdat.

Arvioitaessa laitoksen ympäristössä sijaitsevan asutuskeskuksen merkitystä onnettomuuden seurausten kannalta, voidaan todeta, että esimerkiksi Raumalla ja Loviisassa ei ole odotettavissa välittömiä terveysvaikutuksia ohjeessa YVL 7.1 määritellyn vakavan reaktorionnettomuuden päästön seurauksena. Myöskään lähistöllä oleskelevat vapaa-ajan asukkaat eivät olisi välittömässä vaarassa. Taajamista tai tilapäisistä asukkaista ei aiheudu lisäystä välittömien terveysvaikutusten riskiin, kun laitoksen turvajärjestelmät toimivat suunnitellulla tavalla. Sen sijaan suojelutoimenpiteisiin on tarpeen varautua kaikkien ympäristössä oleskelevien sekä myös Rauman ja Loviisan osalta, koska niiden ansiosta voidaan mahdollista kollektiivista annosta pienentää.

Vakavien reaktorionnettomuuksien vaikutuksista on esitetty arvio myös uutta ydinvoimalaitosyksikköä koskevissa YVA-selostuksissa (Fortum 1999, TVO 1999).



**Kuva 8.** Yhteenveto Olkiluodon tason 2 PSA:n päästötaajuuksista ja -osuuksista nuklidiryhmittäin. Kuvaan sisältyy 52 päästöluokkaa (TVO 1997).



## 6 YHTEENVETO

Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikan valintaa ohjaavat lait, asetukset ja ohjeet, joita noudattamalla pyritään toteuttamaan se yleinen turvallisuusperiaate, että ydinvoiman käytöstä ei saa aiheutua vaaraa ympäristölle, väestölle tai omaisuudelle. Näiden määräysten ohella on myös useita muita ympäristöä koskevia tärkeitä tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon sijaintipaikan sopivuutta arvioidessa. Laitospaikan tulee sijaita melko harvaan asutulla alueella, mutta se ei saa olla liian syrjäinen ja kaukana sähkön kuluttajista. Yleensä tarvitaan eräänlainen tukitaajama lähistöllä, liikenne ja kuljetus on voitava järjestää kuten myös sähkön siirtolinjat. Jäähdytysveden saannin on oltava turvattu. Muista tärkeistä seikoista mainittakoon esimerkiksi vaikutukset alueen elinolosuhteisiin, maankäyttöön ja maisemaan, jäähdytysveden vaikutus ympäristöolosuhteisiin, sekä jätteen käsittely. Ydinvoimahankkeeseen liittyy laaja-alainen ympäristövaikutusten arviointi, jossa pyritään tuomaan esille kaikki hankkeeseen liittyvät ympäristövaikutukset.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus perustuu paljolti suunnitteluperusteisiin, joiden mukaan laitoksen on kestävä riittäväksi katsotulla tavalla häiriö- ja onnettomuustilanteet. Suunnitteluperusteet sisältävät sekä laitoksen sisäiseen turvallisuuteen liittyviä tekijöitä että laitoksen turvallisuuden vaikuttavia ulkopuolisia tekijöitä kuten esimerkiksi tulvat, maanjäristys ja lentokoneen törmäys. Teknisin ratkaisuin pyritään rakentamaan laitokset niin, että onnettomuustilanteet eivät vaurioittaisi laitosta niin pahoin, että radioaktiivisten aineiden päästöä ympäristöön tapahtuisi. Varautuminen suunnitteluperustaisiin onnettomuuksiin takaa sen, että laitoksen toiminnasta ei sen käytön aikana aiheudu kohtuutonta vaaraa. Ydinvoimalaitokseen liittyviä riskejä pyritään arvioimaan riittävällä laajuudella laitostehaisissa todennäköisyyspohjaisissa turvallisuusana-

lyyseyssä. Näillä analyysillä on myös huomattava merkitys laitoksen turvallisuutta parantavana tekijänä. Paljastamalla vikaantumisketjuihin johtavat syyt voidaan niitä poistaa laitteistoa korjaamalla ja uusimalla. Laitoksen turvallisuuden parantaminen parantaa usein myös laitoksen käytettävyyttä.

Nykyisille Olkiluodon ja Hästholmenin sijaintipaikoille on ominaista merenrannikon rikkonaiset piirteet. Luonnon olosuhteet ovat vakaat. Lähiympäristöt ovat maaseutumaisesti harvaanasuttuja ja niissä sijaitsee jossain määrin maataloutteen ja pienteollisuuteen liittyviä toimintoja. Merenrannikon vapaa-ajan asuntojen määrä on merkittävä molempien sijaintipaikkojen lähistöllä. Kesäviikonloppuisin seudulla vapaa-ajan vietossa oleskelevien määrät voivat kasvaa ylittäen moninkertaisesti vakituisten asukasmäärän, mikä tulee ottaa huomioon suunniteltaessa pelastustoimenpiteitä onnettomuuksien varalta. Myös vaikeakulkuiset saaristo-olosuhteet vaikuttavat pelastustoimien suorittamiseen. Lähimmät suuret asutustaajamat, Loviisan ja Rauman kaupungit, sijaitsevat noin kymmenen kilometrin etäisyydellä laitoksista. Vapaa-ajan asukkaat mukaan lukienkin Suomen laitospaikkojen ympäristön asukasmäärä on pieni kansainvälisesti vertaillen. Olkiluodon ja Hästholmenin sijaintipaikoilla on ulkoisilla alkutapahtumilla pienempi merkitys suuren päästön riskissä kuin laitoksen sisäisillä alkutapahtumilla. Ulkoisilla riskitekijöillä ei ole merkittävää eroa sijaintipaikkojen välillä. Tutkimusten mukaan välittömiä terveysvaikutuksia ei ole odotettavissa onnettomuustilanteissa, mikäli laitoksen turvallisuusjärjestelmät toimivat suunnitellulla tavalla.

Uuden laitosyksikön mahdollinen sijoittaminen Eurajoen Olkiluotoon tai Loviisan Hästholmeniin muuttaisi jossain määrin ympäristöä. Sähkön siirto asiakkaille vaatisi todennäköisesti uu-

sia voimajohtoja ja kytkinasemia, laitosaluetta rakennettaisiin lisää, liikenne kasvaisi ja jäähdytysveden laskeminen mereen laajentaisi lämpenevän vesialueen kaksinkertaiseksi nykyiseen verrattuna. Radioaktiivisten aineiden normaalit päästöt ilmakehään ja mereen voidaan olettaa yhtä pieniksi kuin nykyisten laitosten, jolloin niistä ei arvioiden mukaan olisi ympäristön väestön terveydelle haittaa.

Suomen ydinenergiainsäädäntö ja turvallisuusohjeisto pohjautuvat kokemuksiin vuosikym-

menien ajalta sekä kehitystyöhön ja kansainväliseen yhteistyöhön, jossa on hyödynnetty ydinturvallisuusalan tutkimusta ja ydinvoimalaitosten käytöstä saatuja kokemuksia eri maissa. Turvallisuusvaatimukset ovat kehityksen myötä täsmentyneet ja tiukentuneet. Uuden ydinvoimalaitoksen turvallisuudelle asetettavat vaatimukset edellyttävät, että turvallisuusominaisuuksien on oltava vähintään nykyisten käytössä olevien laitosten tasolla.

# LÄHDELUETTELO

- Brisbois, J., et al. 1991. Insights gained from PSAs of French 900 MWe and 1300 MWe units. Nuclear Engineering International, June 1991.
- European Commission. 1994. Probabilistic accident consequence assessment codes, Second international comparison. 338 s. Technical report EUR 15109 EN, ISBN 92-826-4114-7.
- Fortum. 1999. Loviisa 3 -ydinvoimalaitoshanke. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. 187 s. + 15 liitettä.
- HSK 2001. Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety. The first Swiss report in accordance with Article 5. Article 17: Siting Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK).
- Heuser, F.W., Werner, F. 1990. Final version of German Risk Study. Phase B. Nuclear Engineering International, March 1990.
- Huovinen, J. 2000. Säteilyturvakeskus. Konsultointi Tilastokeskuksen aineiston pohjalta 24.11.2000.
- IAEA 1988. Safety standards, Code on the safety of nuclear power plants: Siting. Safety series No. 50-C-S (Rev. 1). 36 s.
- Ilvonen, M. 1994. Ilmakehään päässeiden radioaktiivisten aineiden leviämistä simuloivien ja niistä aiheutuvia säteilyannoksia laskevien ohjelmistojen kehittäminen. Espoo. 119 s. Diplomityö, TKK, Tietotekniikan osasto.
- IRS. 1976. Translations – Safety Codes and Guides. Institut für Reaktorsicherheit der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. Edition 3/76.
- IVO. 1996. Imatran Voima Oy, Loviisan voimalaitos. LO1&2 FSAR.
- Jokiniemi, J., Kilpi, K., Lindholm, I., Mäkynen, J., Pekkarinen, E., Sairanen, R., Silde, A. 1995. Vakavien reaktorionnettomuuksien ilmiöt. Espoo. 103 s. VTT Tiedotteita 1628.
- Kakko, R., Partanen, J. 1984. Radioaktiivisesta laskeumasta ravinnon kautta aiheutuvien säteilyannosten arviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 59 s. Tutkimuksia 292.
- Kattainen, M., Lundström, P., Pärssinen, M., Routamo, T. Result report. IVO Power Engineering Oy, LO1-K850-15, 21.3.1997. App. 9.1, 9.2, 10 and 11.
- Kernenergie: Europa Report 2000. Internationale Zeitschrift für Kernenergie. Atomwirtschaft – Atomtechnik 11. s. 690–702. ISSN 1431–5254.
- Mankamo, T., Savolainen, I., Tornio, E., Vuori, S. 1976. Ydinvoimalaitosten sijoituspaikkatutkimus. Liite V Ydinvoimalaitosonnettomuuksien aiheuttamien terveysvaikutusten ja taloudellisten vahinkojen arvioiminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 144 s. Tiedonanto 23.
- NEA. 2000. Methodologies for assessing the economic consequences of nuclear reactor accidents. OECD Nuclear Development and Radiation Protection. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. 112 s.
- Partanen, J., Rossi, J., Savolainen, I. 1986. Assessment of collective doses due to contaminated food caused by a severe reactor accident. Proceedings of an international symposium on emergency planning and preparedness for nuclear facilities, Rome, 4–8 November 1985. s. 351–354.



- Pärssinen, T., Routamo, T., Lundström, P. 1997. Tu-  
losraportti. Loviisan modernisointi- ja tehonkoro-  
tusprojekti (LOMO), LOMO5, Lähdeterminimallin  
rakenne ja kvantifiointi. IVO Power Engineering  
Oy, LO1-K850-14, 7.3.1997.
- Rossi, J., Savolainen, I., Vuori, S. 1986. Importance  
of evacuation and local sheltering for mitigation of  
reactor accident consequences. Proceedings of an  
international symposium on emergency planning  
and preparedness for nuclear facilities, Rome, 4–8  
November 1985. ss. 438–440.
- Rossi, J. 1990. Effectiveness of countermeasures in  
mitigating off-site consequences from radioactive  
release. 116 s. + liitt. NKA/AKTU-272 (90)1.
- Rossi, J., Vuori, S. 1990. Evaluation of long-term  
countermeasures in mitigating consequences of  
environmental contamination following a nuclear  
accident. Proceedings of a symposium on environ-  
mental contamination following a major nuclear  
accident, Vienna, 16–20 October 1989. s. 203–210.
- Rossi, J. 1994. Loppuraportti osallistumisesta  
OECD/NEA:n ja CEC:n organisoimaan kansain-  
väliseen reaktorionnettomuuksien seurauksia  
laskevien ohjelmien vertailuun. Säteilyturva-  
keskus. 32 s. STUK-YTO-TR 64.
- Rossi, J. 1998. Evaluation of the dose assessment  
models for routine radioactive releases to the en-  
vironment. Säteilyturvakeskus. 21 s. STUK-YTO-  
TR 144.
- Rossi, J. 2000. Significance of the results from  
probabilistic safety assessment at level 2 for off-  
site consequences. Säteilyturvakeskus. 31 s.  
STUK-YTO-TR 166.
- Savolainen, I., Vuori, S. 1977. Assessment of risks  
of accidents and normal operation at nuclear pow-  
er plants. Technical Research Centre of Finland,  
Electrical and Nuclear Technology, Publication 21,  
Espoo. 23 s. + liitt. 15 s.
- Sisäasiainministeriö. 1997. Määräys 1/97. Säteily-  
vaaratilanteessa tarvittavien suojelutoimenpitei-  
den suunnittelu ja niistä tiedottaminen, 5 s.
- Sisäasiainministeriö. 1998. Ohje A:57. Toiminta  
säteilyonnettomuustilanteissa, 41 s. ISBN 951-37-  
2548-0.
- Statens Kärnkraftinspektion, Statens Strålskydd-  
institut, Statens Planverk. 1977. Användning av  
marken kring kärnkraftverk. 68 s. + liitt. Rapport 42.
- Suolanen, V. 1994. Model description and evalua-  
tion of model performance, scenario S. Multiple  
pathways assessment of the IAEA/CEC co-ordi-  
nated research program on validation of environ-  
mental model predictions (VAMP). STUK-YTO-TR  
115. 43 s.
- Suolanen, V. 1996. Consequences of radioactive  
deposition on aquatic environments. VTT Re-  
search Notes 1612. 30 s. + liitt.
- Säteilyturvakeskus. 1988. Ohje YVL 2.6. Maanjäris-  
tysten huomioonottaminen ydinlaitoksissa, 6 s.
- Säteilyturvakeskus. 1990. Ohje YVL 7.5. Ydin-  
voimalaitosten meteorologiset mittaukset, 7 s.
- Säteilyturvakeskus. 1992a. Ohje YVL 7.6. Ydin-  
voimalaitosten radioaktiivisten aineiden päästöjen  
mittaus, 7 s.
- Säteilyturvakeskus. 1992b. Ohje YVL 7.1. Ydin-  
voimalaitoksen ympäristön säteilyaltistuksen ja  
radioaktiivisten aineiden päästöjen rajoittaminen,  
8 s.
- Säteilyturvakeskus. 1995a. Ohje YVL 7.7. Ydin-  
voimalaitoksen ympäristön säteilyvalvonta, 10 s.
- Säteilyturvakeskus. 1995b. Ohje YVL 7.8. Ydin-  
voimalaitoksen ympäristön säteilyturvallisuus-  
raportointi, 9 s.
- Säteilyturvakeskus. 1995c. STUK-B-VYK 3. Sätei-  
lysuojelun periaatteet ja ohjeelliset toimenpideta-  
sot onnettomuustilanteessa. 19 s.
- Säteilyturvakeskus. 1996a. Ohje YVL 2.8. Toden-  
näköisyyspohjaiset turvallisuusanalyysit (PSA), 9 s.

- Säteilyturvakeskus. 1996b. Ohje YVL 2.2. Ydinvoimalaitosten teknisten ratkaisujen perustelemiseksi tehtävät häiriö- ja onnettomuusanalyysit. 15 s.
- Säteilyturvakeskus. 1997a. Ohje YVL 7.2. Ydinvoimalaitoksen ympäristön väestön säteilyannosten arviointi, 11 s.
- Säteilyturvakeskus. 1997b. Ohje YVL 7.3. Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen leviämisen laskennallinen arviointi, 11 s.
- Säteilyturvakeskus. 1997c. Ohje YVL 7.4. Ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelyt, 18 s.
- Säteilyturvakeskus. 1998a. STUK-B-YTO 177. Compliance with the obligations of the Convention on Nuclear Safety. Finnish national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety, 32 s.
- Säteilyturvakeskus. 1998b. Lausunto Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttölupahakemuksesta. A213/26. 27.2.1998.
- Säteilyturvakeskus. 1998c. Lausunto Olkiluodon ydinvoimalaitoksen käyttölupahakemuksesta. C213/30. 30.6.1998.
- Säteilyturvakeskus. 2000a. Ohje YVL 1.10. Ydinvoimalaitoksen sijaintipaikkaa koskevat vaatimukset, 9 s.
- Säteilyturvakeskus. 2000b. Ydinenergian turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 1999. STUK-B-YTO 200. 58 s.
- Säteilyturvakeskus. 2001a. Ohje YYL 2.6 (luonnos 3, 12.4.2001). Maanjäristysten huomioonottaminen ydinvoimalaitoksissa. 11 s.
- Säteilyturvakeskus. 2001b. Ohje VAL 1.1. Säteily-suojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa. 13 s.
- TVO. 1997a. Teollisuuden Voima Oy. Final Safety Analysis report (FSAR) Rev. 7/20.1.1997.
- TVO. 1997b. Probabilistic Safety Assessment (PSA). Rev 2, 31.12.1997, Chapters 2 and 9.8. Teollisuuden Voima Oy.
- TVO. 1999. Teollisuuden Voima Oy. Olkiluodon ydinvoimalaitoksen laajentaminen kolmannella laitosyksiköllä. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. 215 s.
- UNSCEAR 1993. The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York, NY. United Nations. 922 s.
- UNSCEAR 2000. The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York, NY. United Nations, Volume I: Sources, 654 s. Volume II: Effects 566 s.
- U.S. NRC (United States Nuclear Regulatory Commission). 1975. Reactor safety study, An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants. Springfield, Virginia: WASH-1400 (NUREG-75/014).
- U.S. NRC (United States Nuclear Regulatory Commission). 1990. Severe accident risks: An assessment for five U.S. nuclear power plants. Washington, DC: NUREG-1150 Vol. 1.
- U.S. NRC (United States Nuclear Regulatory Commission). 1997. Reassessment of selected factors affecting siting of nuclear power plants. (NUREG/CR-6295) BNL-NUREG-52442.
- U.S. NRC (United States Nuclear Regulatory Commission). 1998. Regulatory Guide 4.7, General site suitability criteria for nuclear power stations. Revision 2.
- VNP. 1991a. Valtioneuvoston päätös ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevista yleisistä määräyksistä. 14.2.1991/395.
- VNP. 1991b. Valtioneuvoston päätös ydinvoimalaitosten valmiusjärjestelyjä koskevista yleisistä määräyksistä. 14.2.1991/397.