

Title	Vakavan onnettomuuden päästön lyhyen aikavälin vaikutukset ympäristössä
Author(s)	Rossi, Jukka
Citation	TUTKIMUSRAPORTTI : VTT-R-09221-10 VTT, 2010, pages 21.
Rights	This report may be downloaded for personal use only.



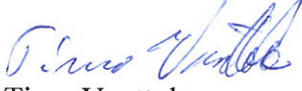
<p>VTT http://www.vtt.fi P.O. box 1000 FI-02044 VTT Finland</p>	<p>By using VTT Digital Open Access Repository you are bound by the following Terms & Conditions.</p> <p>I have read and I understand the following statement:</p> <p>This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.</p>
---	---

Tutkimuksen nimi

**VAKAVAN ONNETTOMUUDEN PÄÄSTÖN
LYHYEN AIKAVÄLIN VAIKUTUKSET
YMPÄRISTÖSSÄ**

Kirjoittaja: Jukka Rossi

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi VAKAVAN ONNETTOMUUDEN PÄÄSTÖN LYHYEN AIKAVÄLIN VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖSSÄ	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Säteilyturvallisuuskeskus Lauri Pöllänen PL 14, 00881 HELSINKI	Asiakkaan viite 1/Y40102/2010
Projektin nimi VAKAVAN ONNETTOMUUDEN PÄÄSTÖN LYHYEN AIKAVÄLIN VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖSSÄ	Projektin numero/lyhytnimi 71287 VAPLAVY
Raportin laatija(t) Jukka Rossi	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 19/21
Avainsanat Vakava reaktorionnettomuus, ympäristövaikutukset	Raportin numero VTT-R-09221-10
Tiivistelmä <p>WENRA:n (Western European Nuclear Regulators' Association) reaktoriturvallisuuden harmonisointiryhmä esittää uusien laitosten suunnittelutavoitteeksi, että vakavan reaktorionnettomuuden päästöstä aiheutuisi enintään rajoitettuja lyhyen ajan väestönsuojelutoimenpiteitä lähiympäristössä. Lisäksi näiden vastatoimenpiteiden suorittamiseen olisi jäätävä riittävästi aikaa. Tämän takia päästö pitää rajoittaa riittävän pieneksi, jotta suojelutoimenpiteitä ei laajemmin tarvittaisi.</p> <p>Työ jakautuu kahteen osaan. Aluksi esitetään lyhyet yhteenvedot aiheeseen liittyvistä aiemmista selvityksistä. Toisessa vaiheessa laskettiin määritellyistä jodi-, jalokaasu- ja cesiumpäästöistä aiheutuvia lyhyen aikavälin säteilyannoksia määrättyissä etäisyyspisteissä. Päästön alkuketkeä ja kestoja sekä annoksen integrointiaikaa vaihdeltiin. Laskentatulosten perusteella on arvioitu onnettomuuden varhaisvaiheen säteilynsuojelutoimenpiteiden tarpeellisuutta.</p> <p>Annokset laskettiin erilaisissa leviämistilanteissa ja tuloksia painotettiin säätilanteiden esiintymistodennäköisyydellä. Tuloksista muodostettiin komplementaariset kumulatiiviset todennäköisyysjakaumat ja niiltä poimittiin YVL-ohjeissa esitettyjä 95 ja 99,5 %:n fraktiileja vastaavat annokset.</p> <p>Tulokset osoittavat, että joditabletille asetettu toimenpideraja lapselle ylittyy jopa 20 kilometrin etäisyydellä 0,5 %:n todennäköisyydellä 1000 TBq:n I-131-päästöstä. Sen sijaan sisälle suojautumisen ja evakuoinnin annosrajat ylittyvät enintään 3 kilometrin etäisyydellä. Vakavan onnettomuuden päästörajana pitkäaikaisvaikutusten osalta vaadittu 100 TBq:n Cs-137-päästö ei lisää evakuointietäisyyttä verrattuna etäisyyteen, joka saadaan pelkästä jodipäästöstä. Konservatiivinen 100 %:n jalokaasupäästö voisi aiheuttaa tarvetta suojaustoimenpiteille jopa 20 kilometrin päässä. Kuitenkin päästön viivästäminen pienentää tehokkaasti annoksia ja samalla etäisyyksiä, joilla suojaustoimenpiteitä tarvittaisiin.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 22.11.2010 Allekirjoitukset  Jukka Rossi Tutkija	 Mikko Ilvonen Tiimipäällikkö
	 Timo Vanttola Teknologiapäällikkö
VTT, PL 1000, 02044 VTT	
Jakelu STUK: Lauri Pöllänen 6 kpl	
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>	

Alkusanat

Työ on tehty Säteilyturvakeskuksen (STUK) tilauksesta. Yhteyshenkilönä STUK:ssa on toiminut Lauri Pöllänen. Tutkimuksen ohjaukseen ovat STUK:sta osallistuneet myös Olli Vilkamo, Kirsi Alm-Lytz ja Tomi Routamo.

Espoo 22.11.2010

Jukka Rossi



ABSTRACT

ENVIRONMENTAL SHORT-TERM EFFECTS FROM A RELEASE OF A SEVERE REACTOR ACCIDENT

The reactor safety harmonization group of Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) states on a design objective of new nuclear power plants that only limited short-term protective measures in the vicinity of the plant would be caused due to a release from a severe reactor accident. In addition to that sufficient time should be available to implement these measures. For this reason the release magnitude shall be reduced to small enough in order that protective measures would not be needed more widely.

In the work it has been assessed short-term radiation doses and necessity of the radiation protection measures for the population caused by the radioactive release of a severe reactor accident. The work is divided into two parts. At first short summaries of the former studies related to the topic are presented. In the second phase the short-term radiation doses at certain distance points were calculated from the defined releases of iodine, noble gases and cesium. The starting time and duration of the release as well as the integration time of the dose were varied. Based on the calculation results the necessity of the early countermeasures to the accident is assessed.

Doses were calculated in different dispersion conditions and results were weighted with the probability of occurrence of the dispersion conditions. The complementary cumulative distribution functions were constructed from the results and the dose values corresponding to the fractals of 95 and 99.5% as specified in STUK's Regulatory Guides on nuclear safety (YVL Guides) were extracted.

The results prove that the action dose limit of a child for the iodine tablet is exceeded even at the distance of 20 kilometers at the probability level of 0.5% from the release of 1000 TBq of I-131. Instead the dose limits for sheltering and evacuation are exceeded only as far as 3 kilometers at the most.

The release of 100 TBq of Cs-137 corresponding the limit value for a severe reactor accident against long-term effects does not increase the evacuation distance compared to the distance obtained merely from the iodine release.

The conservative release of all the noble gases could cause need for protective measures even at the distance of 20 kilometers. However delay of the release reduces effectively the doses and the distances, where protective measures are needed.

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat	2
1 Taustaa	5
2 Katsaus tehtyihin selvityksiin	5
3 Leviämis- ja annoslaskentamalli	8
3.1 Päästön leviämisen laskenta	8
3.2 Annosten laskenta	9
4 Suojelutoimenpiteiden annosrajat	9
5 Annokset tarkastelluista päästöistä	11
5.1 Päästöt	11
5.2 Tulokset	12
5.2.1 Jalokaasut	13
5.2.2 Jodit	13
5.2.3 Cesiumit	14
5.2.4 Yhteenveto tuloksista	15
LÄHDELUETTELO	18
Liite	20

1 Taustaa

WENRA:n (Western European Nuclear Regulators' Association) reaktoriturvallisuus-harmonisointiryhmän kannanotossa uusien laitosten yhdeksi suunnittelutavoitteeksi on esitetty, että vakavan onnettomuuden päästöstä aiheutuisi enintään rajoitettuja lyhyen ajan suojelutoimenpiteitä lähiympäristössä (ei pysyvää väestön uudelleensijoittamista, ei väestön evakuointia aivan lähiympäristöä lukuun ottamatta, rajoitettu sisälle suojautuminen, ei pitkäaikaisia ruuan nauttimisrajoituksia). Lisäksi näiden vastatoimenpiteiden suorittamiseen on jäätävä riittävästi aikaa (WENRA 2010). Tämän takia päästö pitää rajoittaa riittävän pieneksi, jotta väestönsuojelutoimenpiteitä ei laajemmin tarvittaisi.

Toimeksiannossa arvioidaan vakavan reaktorionnettomuuden radioaktiivisen päästön aiheuttamia lyhyen aikavälin säteilyannoksia ja väestöön kohdistuvien säteilyuojelutoimenpiteiden tarpeellisuutta. Työ jakautuu kahteen osaan. Aluksi perehdyttiin eräisiin vanhoihin aiheeseen liittyviin selvityksiin (1970-luvulta alkaen), joista tehtiin lyhyt yhteenveto. Toisessa vaiheessa laskettiin määritellyistä jodi-, jalokaasu- ja cesiumpäästöistä aiheutuvia lyhyen aikavälin säteilyannoksia määrätyissä etäisyyspisteissä. Päästön alkuketkeä ja kestoja sekä annoksen integrointiaikaa on vaihdeltu. Laskentatulosten perusteella on arvioitu onnettomuuden varhaisvaiheen säteilyuojelutoimenpiteiden tarpeellisuutta. Tässä raportissa on kuvattu työn molemmat vaiheet sekä lopputulokset.

2 Katsaus tehtyihin selvityksiin

Tehdyistä vanhoista raporteista tähän valittiin sellaiset, jotka käsittelevät lyhyen ajan altistumista ja annoslaskentaa sekä niiden tuloksia. Raporttien yhteenvedossa tarkastellaan vain tärkeimpiä seikkoja ja mikäli mahdollista, jalokaasu- ja jodipäästön aiheuttamia lyhyen ajan annoksia. Valitut raportit ovat:

1) Mankamo T., Savolainen I., Tornio E., Vuori S. 1976. Ydinvoimalaitosten sijoituspaikkatutkimus. Liite V. Ydinvoimalaitosonnettomuuksien aiheuttamien terveysvaikutusten ja taloudellisten vahinkojen arvioiminen. VTT Ydinvoimatekniikan laboratorio, Tiedonanto 23.

Raportissa kuvataan VTT:n ympäristövaikutusmalli – ARANO, sen ominaisuuksia ja sillä laskettuja tuloksia esimerkkitapauksessa. Taustalla on aiemmin 1970-luvulla julkaistu WASH-1400-raportti ja sen tulokset (NRC 1975). VTT:n raportissa käsitellään säteilyannosten ja terveysvaikutusten välistä yhteyttä etenkin varhaisvaikutusten osalta. Siinä todetaan, että luuydinannos on usein kriittinen elin ja siitä syystä ARANO:ssa käytettiin luuytimeen kohdistuvaa annosta määritettäessä akuutteja terveysvaikutuksia. Erityyppisiä annosriskifunktioita on tarkasteltu. Myös taloudellisten vaikutusten laskentaa käsitellään, jolloin haittavaikutuksina voidaan arvioida terveyshaittoja, investointien menetyksiä ja evakuointikustannuksia.

ARANO:lla laskettiin Kopparnäsin sijoituspaikalle oletetusta WASH-1400:ssa esitetyistä BWR1...BWR5-päästöistä aiheutuvia annoksia ympäristössä. Oletettu päästö on suuri (esim. BWR1:ssä 100 % jalokaasuinventaarista ja 40 % jodi-inventaarista vapautuu ympäristöön).

Säätieläkä käytettiin Seutulän sekä Bogaskärin säätieläkä. Tarkasteltiin myös terveysvaikutusten määrää ja niiden asukkaiden lukumäärää, joilla tietty annosraja ylittyy. Laskentamallin herkkyytarkasteluissa varioitiin mm. kuivadepositionopeutta ja sadetta. Kuivalaskeumanopeuden muutoksille tulokset eivät olleet kovin herkkiä. Sade lieventää onnettomuuden seurauksia huuhtomalla radioaktiivisia hiukkasia päästöpilvestä ennen kuin se ennättää tiheästi asutuille seuduille. Päästökorkeuden merkitys säteilyannosten suuruuteen ei ole yhtä merkittävä kuin vastaava vaikutus radioaktiivisten aineiden maanpintapitoisuuteen, koska suoraan pilvestä tulevan annoksen riippuvuus päästökorkeudesta ei ole erityisen voimakas.

Laskentatuloksia verrattiin myös WASH-1400:n tuloksiin. Jalokaasuja tai jodeja ei ole erikseen käsitelty.

2) *Savolainen I. 1979. Evakuoinnin ja paikallissuojautumisen merkitys ydinvoimalaitos-onnettomuuksissa. VTT, Ydinvoimatekniikan laboratorio. Tutkimusselostus Nro YDI9135.*

Tutkimuksessa laskettiin ARANO:lla, miten paikallissuojautuminen sekä evakuointi alentavat ydinvoimalaitosonnettomuuden aiheuttamia säteilyannoksia. Evakuointikuvaus perustuu Loviisan ydinvoimalaitoksen pelastuspalvelusuunnitelmaan. Paikallisia ympäristötietoja ja rakennuksille arvioituja suojauskertoimia käytettiin. Päästönä oli WASH-1400-raportista PWR2, jossa 90 % jalokaasuinventaarista ja 70 % jodi-inventaarista vapautuu ympäristöön.

Evakuoinnille käytettiin kolmeä eri viivettä: realistinen, pessimistinen tai yksi vuorokausi. Väestö on lisäksi jaettu kahteen ryhmään, joille käytetään vielä erilaisia viiveitä evakuoinnin osalta. Tuloksia laskettiin neljässä eri säätilanteessa ja leviämssuunta oletettiin Loviisaan päin.

Tuloksista voidaan todeta, että paikallissuojautumisella voidaan pienentää huomattavasti etäisyyksiä, joilla ylitetään annostasoja, joilla välittömiä terveysvaikutuksia esiintyy. Esimerkiksi suojautumalla kerrostaloihin, evakuoinnin toteuttamisen merkitys vähenee. Evakuointi yleensä pienentää niiden asukkaiden määrää, joilla tietty annosraja ylittyy, mutta on tilanteita, joissa evakuointi ei enää tuo lisähyötyä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että pientalojen ja kerrostalojen tarjoama suojaus ulkoista gammasäteilyä vastaan vähentää suuria säteilyannoksia saavien ihmisten määrää voimakkaasti. Radioaktiivisen päästöpilven ohikulkemisen jälkeen suoritettu nopea evakuointi vähentää useissa tapauksissa huomattavasti kokonaisannosta. Evakuoinnin toteuttamisessa tulisi nopeimmin evakuoida alueet, joiden rakennukset tarjoavat heikoimman suojan ts. kesäasutusalueet ja sellaiset puutaloalueet, joilla ei ole kellareita. Jalokaasuja ja jodeja ei ole käsitelty erikseen.

3) *Blomqvist L., Savolainen I. 1982. Synpunkter på åtgärdsreferencer vid stora kärnkraftolyckor. Säteilyturvallisuuslaitos, STL-B-43.*

Tämä raportti liittyy pohjoismaiseen yhteistyöhön, jossa eri maiden vastatoimenpiteitä pyrittiin yhtenäistämään. ICRP oli tuolloin julkistanut toimenpidetasoille suosituksia. Käyttöön otettiin alempi sekä ylempi toimenpidetaso, joista alempi rajoittaa myöhäisvaikutuksia ja ylempi estää akuutit terveysvaikutukset. Toimenpidetasoja oli joditabletin käytölle, evakuoinnille, väestönsiirrolle sekä maidolle.

Tarkoituksena oli myös määritellä kriittiset elimet erityyppisistä päästöistä, jolloin annoksia eri elimille laskettiin ARANO:lla. Päästönä käytettiin WASH-1400 päästöjä BWR1 ja BWR2, joissa 100 % jalokaasuinventaarista ja 40 - 90 % jodi-inventaarista vapautuu ympäristöön).

Tuloksena todetaan, että luuydin on kriittinen elin, kun gammasäteilyä päästöpilvestä ja laskeumasta tarkastellaan. Ihoannos ja keuhkoannos voivat myös olla merkittäviä. Myöhäisvaikutusten osalta useampi elin on merkitsevä, mikä tulee otetuksi huomioon efektiivisessä annoksessa. Voidaan myös todeta, että tässä tarkastelluissa päästöissä jalokaasujen merkitys on pienempi kuin jodien akuutissa vaiheessa.

4) Rossi J. 1986. *Eräitä lähde- ja lähdetermitarkasteluja ympäristön säteilyannosten kannalta. VTT VARA-31/86.*

Tämä selvitys liittyy VTT:n VARA-projektiin (Vakavien reaktorionnettomuuksien arviointi) 1980-luvulla. Raportissa on tarkasteltu päästön viivästämisen vaikutusta annoksiin eri aineryhmien päästöissä ja muutamassa leviämistilanteessa. Reaktorin sähköteho on 710 MW ja päästökorkeus 20 metriä. Päästönä käytettiin 100 % jalokaasupäästöä, 0,1 % cesiumpäästöä sekä päästöä, jossa cesiumin päästmäärä oli nolla, jalokaasujen 100 % ja muiden nuklidien 0,1 %. Lisäksi tarkasteltiin päästöä, jossa jalokaasujen vapautumisosuus oli 100 % ja jodin, cesiumin, telluurin 0,1 % mutta kaikkien muiden 0.

Jalokaasupäästön osalta voidaan todeta, että mikäli päästö viivästyisi 12 tuntia, välttyttäisiin välittömiltä kuolemantapauksilta kokonaan ilman mitään suojaustoimenpiteitä stabiilissa leviämistilanteessa. Vastaavasti neutraalissa leviämistilanteessa annos ei kasva yli 1 Sv yhden tunnin päästöviiveellä, jolloin akuuttien kuolemantapausten esiintyminen olisi epätodennäköistä. Päästön viiveellä on siis vaikutusta. Jalokaasujen merkitys voi kasvaa kaukana päästöpaikasta, koska ne eivät deposoidu.

Jodipäästöä ei ole erikseen tarkasteltu.

5) Rossi J. 1989. *Ympäristön vastatoimenpiteet ja niiden tehokkuus ydinvoimalaitosonnettomuuden yhteydessä. Ydin- ja energiatekniikan lisensiaattiseminaari, kevät 1989. TKK-F-B121.*

Raportissa on arvioitu vastatoimenpiteiden vaikutuksia ottaen huomioon sääjakauma. Vastatoimenpiteet perustuvat kansainvälisiin suosituksiin. Niitä on tarkasteltu kolmessa onnettomuuden vaiheessa: alkuvaihe, keskivaihe ja myöhäisvaihe, jotka vastaavat nykyisin varhaisvaihetta, jälkivaihetta ja toipumisvaihetta. Vastatoimenpiteinä käsiteltiin alkuvaiheessa sisälle suojautumista, joditabletteja ja evakuointia sekä keskivaiheessa väestönsiirtoa ja ruoan käyttörajoitusta. Myös taloudellisia menetyksiä arvioitiin.

Lyhyen ajan vastatoimenpiteitä ei tarkasteltu annosrajoja soveltaen vaan käytettiin kahdeksaa erilaista suojautumisyhdistelmää sisälle suojautumisen ja evakuoinnin osalta. Lisäksi laskettiin vertailutilanne, jossa ei tehty mitään suojaustoimenpidettä. Tuloksena laskettiin ympäristön väestössä esiintyvät säteilysairauksien ja välittömien kuolemantapausten lukumäärät soveltamalla annos-vaikutusfunktioita.

Pitkän ajan vastatoimenpiteiden tehokkuutta arvioitiin käyttämällä väestönsiirtokriteereitä 0,03, 0,1, 0,3, 1,0 Sv 30 vuodessa. Vertailutilanne laskettiin ilman mitään suojausta. Samalla periaatteella arvioitiin maataloustuotteiden hylkäämisen tehokkuutta.

Päästönä oli kolme erilaista tapausta. Niissä kaikissa oli 100 %:n jalokaasupäästö yhdistettynä kolmeen erisuuruiseen helpommin haihtuvaan aineryhmään (cesium-, jodi- telluuripäästö 10, 1 tai 0,1 %) sekä loput vaikeammin haihtuvat aineryhmät (1, 0,1 tai 0,01 %). Näin ollen jalokaasuille tai jodeille ei ole esitetty erikseen tuloksia.

Lyhyen ajan kuluessa toteutettavista vastatoimenpiteistä tehtiin erilaisia yhdistelmiä ja laskettiin varhaisvaikutusten määrät. Koska päästöissä jodia oli suhteellisen vähän verrattuna jalokaasuihin, ei joditabletilla saavutettu annossäästöä. Paikallissuojautumisella saavutettiin merkittävä säästö varhaisvaikutusten määrässä verrattuna tilanteeseen, jossa ei suojauduta. Suorittamalla evakuointi paikallissuojautumisen jälkeen saavutetaan paras hyöty, mikäli päästöstä aiheutuisi välittömiä terveysvaikutuksia tilanteessa, jossa ei tehtäisi mitään suojaustoimenpiteitä. Jos paikallissuojautumista ei ole tehty voidaan evakuoinnilla vielä sittenkin rajoittaa merkittävästi terveysvaikutusten määrää. Kun jalokaasupäästö on 100 %, ei muiden aineiden päästön pienennys 10 %:sta alaspäin enää suuresti vaikuta välittömiin terveysvaikutuksiin.

Näissä tarkastelluissa tapauksissa on taustalla tietty päästö ja oletukset ympäristöolosuhteista mm. leviämistilanteista sekä mahdollisesti sovelletuista suojautumistoimenpiteistä, joten tulokset ovat tapauskohtaisia ja niiden yleistämisessä on oltava varovainen.

3 Leviämis- ja annoslaskentamalli

Tässä työssä tarkastellut jalokaasu- ja jodipäästöihin liittyvät leviämis- ja annoslaskut on suoritettu ARANO-tietokoneohjelmalla (Savolainen et al. 1977, Ilvonen 1994).

3.1 Päästön leviämisen laskenta

ARANO-mallissa päästön ilmassa leviämisen laskenta perustuu diffuusiomallin soveltamiseen ns. K_z -teorialla, jossa vertikaali dispersio sekä kuivalaskeuman vaikutus pilven kulumiseen otetaan tarkemmin huomioon kuin perinteisissä normaalijakautumaa soveltavissa malleissa. Ohjeessa YVL 7.3 (STUK 1997a, STUK 1997b, s. 4 - 5) esitetään menettely erilaisten leviämistilanteiden käsittelystä annoslaskelmia suoritettaessa sekä tulosten esittämistavasta. Tässä työssä on laskettu väestön yksilön säteilyannos erilaisissa leviämistilanteissa, joihin kuhunkin liittyy tietty todennäköisyys. Leviämisaineistona on käytetty Olkiluodossa vuosina 2005 - 2007 100 metrin korkeudelta mitattua tuntikohtaista leviämistietoa. ARANO-ohjelmaa varten sääaineisto on muutettu jakaumaksi, joka koostuu tuulensuunnan esiintymistäajuudesta kahdessaatoista 30-asteen sektorissa, stabiiliusluokkien esiintymistäajuudesta sektoreissa, tuulennopeusluokkien esiintymistäajuudesta stabiiliusluokissa sektoreittain sekä sateen esiintymistäajuudesta stabiiliusluokittain. Kuivan laskeuman depositionopeutena käytetään arvoa 1 cm/s ja sateen pesukertoimet ovat $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ labiileissa (A, B, C) sekä $7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ stabiileissa (D, E, F) leviämistilanteissa.

Yksittäisessä leviämistilanteessa lasketaan ensin sektorin etäisyyspisteessä esiintyvä keskimääräinen annos. Tämä annosarvo kuvaa paremmin leviämisuunnan vaihtelusta johtuvaa hajontaa sektorin sisällä kuin, jos vain keskiakselin maksimiarvoja käytettäisiin. Päästön kesto otetaan huomioon horisontaalisessa leviämisparametrissa, joka johtaa siihen, että pitoisuus

keskiakselilla pienenee ja pitoisuus kauempana keksiakselista kasvaa. Kuitenkin, koska tässä käytetään sektorin keskiarvoa vastaavaa annosarvoa, kumoutuu päästön keston vaikutus horisontaalisessa leviämisessä. Lisäksi leviämissuunnassa ei oleteta muutosta päästön jatkuessa vaan esimerkiksi 24 tunnin päästössä leviäminen jatkuu samassa suunnassa koko 24 tunnin ajan.

Kun useissa eri leviämistilanteissa, joiden esiintymistajuus tunnetaan mittausaineiston pohjalta, aiheutuvat säteilyannokset järjestetään suuruusjärjestykseen, voidaan laskea ohjeessa YVL 7.3 mainittuja yläfraktiileja 99,5 % ja 95 % vastaavat annosarvot (STUK 1997b). Esimerkiksi 99,5 % fraktiilin osalta tämä tarkoittaa, että tätä annosta suurempia arvoja voi esiintyä vain 0,5 %:n todennäköisyydellä. Toisin sanoen siten esitettävät tulokset eivät ole maksimiarvoja, vaan niitä lähellä olevia jonkin verran niitä pienempiä arvoja.

3.2 Annosten laskenta

Tarkasteltavat kolme altistusreittiä ovat:

- 1) suora ulkoinen efektiivinen säteilyannos päästövanasta, suojauskerroin 1,
- 2) hengitysannos; efektiivinen annos sekä kilpirauhasen absorboitunut annos, efektiivisen annoksen osalta annosmuunnoskertoimina käytetään ohjeessa ST 7.3 esitettyjä aikuisen ja 1-vuotiaan lapsen efektiivisen annoksen kertoimia (suurin esiintyvä arvo keuhkoabsorptioluokista, STUK 1999), kilpirauhasannoksen annosmuunnoskertoimet ovat lähteestä (ICRP 71, 1995), samoin hengitysnopeudet (1-vuotias lapsi $5,16 \text{ m}^3/\text{vrk}$, aikuinen $22,2 \text{ m}^3/\text{vrk}$), suojauskerroin 1,
- 3) ulkoinen efektiivinen annos maahan laskeutuneesta aktiivisuudesta kahden vuorokauden, viikon ja kuukauden kuluessa. Integrointi alkaa siitä hetkestä, kun päästövana saapuu alueelle ja jatkuu sen jälkeen edellä mainitun ajan. Suojauskerroin 0,7 (vastaa maaperän epätasaisuudesta johtuvaa vaimennusta). Migraatio maan pinnalta syvemmälle maahan otetaan mallissa huomioon.

Käytetyt suojauskertoimet tarkoittavat, että henkilö on suojaamaton ja oleskelee ulkona koko tarkasteluajan. Tämä on konservatiivinen oletus, todellisuudessa väestö ei oleskele koko ajan ulkona. Rakennusten sisällä annosnopeus pienenee rakennusmateriaalien aiheuttaman vaimennuksen takia.

Jodipäästöstä hengitysannos ja kilpirauhasannos lasketaan aikuisen lisäksi myös yksivuotiaalle lapselle, koska verrattaessa eri ikäluokkia jodin annosmuunnoskertoimien ja lapsen hengitysnopeuden tulo on suurin 1-vuotiaalle. Tuloksissa esitetty kokonaisannos koostuu ulkoisesta säteilyannoksesta pilvestä ja laskeumasta sekä hengitysannoksesta. Tällöin hengitysannos on 1-vuotiaan lapsen hengitysannos, mikäli päästössä on jodia, mutta aikuisen hengitysannos, mikäli päästössä ei ole jodia.

4 Suojelutoimenpiteiden annosrajat

Taulukossa A1 on esitetty Säteilyturvakeskuksen ohjeen VAL 1 luonnoksessa (STUK 2010) sekä IAEA:n raportissa GS-R-2 (IAEA 2002) julkaistut väestön suojelutoimenpiteiden annosrajat onnettomuuden varhaisvaiheessa.

Taulukko A1. Valmiussuunnittelussa käytettävät suunnittelukriteerit väestön keskeisimmille suojelutoimenpiteille onnettomuuden varhaisvaiheessa (STUK 2010). Kansainvälisen atomienergiajärjestön suositukset on esitetty oikeanpuolimmaisessa sarakkeessa (IAEA 2002).

Suojelutoimenpide	STUK Annosraja [*]	IAEA Vältetty annos
Sisälle suojautuminen	10 mSv (efektiivinen annos kahdessa vuorokaudessa)	10 mSv (efektiivinen annos kahdessa vuorokaudessa)
- lievennetty sisälle suojautuminen	1-10 mSv (efektiivinen annos)	
Joditablettien nauttiminen	Lapsille 10 mGy, aikuisille 50 mGy (kilpirauhaseen absorboitunut annos)	50 mGy (kilpirauhaseen absorboitunut annos)
Evakuointi	20 mSv (efektiivinen annos yhdessä viikossa)	50 mSv (efektiivinen annos yhdessä viikossa)

^{*} Suojelutoimenpide on perusteltu, mikäli suojautumattoman henkilön säteilyannoksen arvioidaan nousevan yli esitetyn annosrajan.

STUK:n ohjeiden mukaan sisälle suojautuminen tarkoittaa suojautumista paikallisiin sisätiloihin. Sisälle suojautuminen on perusteltua, mikäli suojautumattomalle henkilölle arvioidaan kertyvän yli 10 mSv:n säteilyannos kahden vuorokauden kuluessa. Lievennetty sisälle suojautuminen tarkoittaa, että tarpeetonta ulkona oloa vältetään, mikäli suojautumattomalle henkilölle arvioidaan kertyvän 1 - 10 mSv:n säteilyannos kahden vuorokauden kuluessa.

Väestön lyhytaikainen evakuointi tarkoittaa noin viikon kestävästä nopeasti toteutettavaa evakuointia. Evakuointi on tarpeen, jos suojautumattoman henkilön säteilyannoksen arvioidaan nousevan yli 20 mSv ensimmäisen viikon aikana ja mikäli sisälle suojautumisen tarve on pitempi kuin 2 vuorokautta. Evakuointi tulee toteuttaa ennen radioaktiivisen pilven saapumista alueelle.

STUK:n esittämässä suojelutoimenpiteiden rajoissa on otettu huomioon kansainväliset suositukset. ICRP on julkaissut vastikään uudet suositukset väestön suojautumisen toimenpiderajoista (ICRP 2007, 2009). IAEA esittää annosrajoiksi taulukossa A1 esitettyjä arvoja, mutta niissä ei ole vielä otettu huomioon ICRP:n uusimpia suosituksia. Annos tarkoittaa suojelutoimenpiteen ansiosta vältettyä annosta.

Annosrajoihin verrattava annos on ICRP:n mukaan laskettava henkilölle, ns. edustavalle henkilölle, joka edustaa päästästä aiheutuvalle säteilylle eniten altistuvaa kohtuullisen kokoista ja homogeenista väestöryhmää. Henkilöllä ei ole tällöin kaikkein äärimmäiset elintavat säteilyaltistuksen kannalta. Valmiustilanteessa ICRP suosittelee, että väestön suojaustoimenpiteitä tulisi tehdä siinä määrin, että toimenpiteiden jälkeen säteilyannos (ns. jäännösannos) jäisi 20 - 100 mSv:n tasolle. ICRP ehdottaa säteilyvaaratilannetta varten käytettäväksi termiä *enimmäistaso* (reference level) annoksen tai riskin rajoittamiseksi. Tätä tasoa suurempia altistuksia ei tulisi sallia ja lisäksi tämän tason alapuolella suojelua pitäisi optimoida. Erilaisia suojaustoimenpiteitä vertailtaessa tulee verrata niistä aiheutuvia jäännösannoksia enimmäistasoihin (ICRP 2007).

STUKin ohjeessakin käytetään termiä *säteilyaltistuksen enimmäistaso*, joka on sellainen väestön yksilön säteilyannos, jonka ylitystä pyritään välttämään. Tavoitteena on, että suojelutoimien avulla ainakin suurimmalle osalle väestöstä säteilyaltistus jää enimmäistason alapuolelle. Enimmäistason alapuolellakin on tehtävä kaikki toteuttamiskelpoiset toimenpiteet säteilyaltistuksen

pienentämiseksi. Enimmäistasoa pienennetään ajan kuluessa, kunnes saavutetaan tilanne, joka on pysyvästi hyväksyttävä. Säteilyaltistusta arvioitaessa huomioidaan kaikki vaaratilanteen aiheuttamat altistusreitit sekä suojelutoimien pienentävät vaikutukset annokseen. Säteilyvaaratilanteen ensimmäisen vuoden säteilyaltistuksen enimmäistaso väestön yksilölle on 20 mSv.

5 Annokset tarkastelluista päästöistä

5.1 Päästöt

Päästön kestoina käytetään 1 ja 24 tuntia. Päästökorkeus on 90 metriä. Tämä perustuu oletukseen, että piipun korkeudelta 105 metriä tapahtuvaan päästöön vaikuttaa ns. building wake, jonka seurauksena päästövana laskeutuu hieman alemmalle tasolle. OL3-laitosyksikön inventaarit ja käytetyt päästöt on esitetty taulukossa A2.

Tässä ei arvioida päästöjen todennäköisyyksiä. Päästöinä käytetään jalokaasu-, jodi- ja cesiumpäästöjä:

- Jodipäästönä käytetään 1000 TBq I-131 päästöä. Tämä on 0,02 % OL3-ydinvoimalaitosyksikön sydäninventaarista. Muita jodinuklideja vapautuu samalla osuudella sydäninventaarista. Jodi oletetaan aerosoliksi. Jodipäästölle ei oleteta radioaktiivista hajoamista ennen päästön alkamista eikä sen kuluessa eli taulukossa A2 ilmoitetut jodipäästöt vapautuvat ilmaan. Päästön tapahduttua radioaktiivinen hajoaminen otetaan huomioon sekä ilmassa leviämisen että maahan laskeutumisen aikana ja sen jälkeen. Kuitenkin herkkyytarkasteluna on luvussa 5.2.2 lisäksi tarkasteltu radioaktiivisen hajoamisen vaikutusta annoksiin viivästetyssä päästössä.
- Jalokaasupäästö on 100 % OL3-laitosyksikön inventaarista. Päästöoletus on hyvin konservatiivinen, mutta tuloksia on mahdollista skaalata alemmaksi. Jalokaasupäästön alkuhetki on 0, 6 tai 24 tuntia. Jalokaasupäästössä radioaktiivinen hajoaminen otetaan huomioon ennen päästön alkua, sen kuluessa ja päästön tapahduttua.

Lisäksi on tarkasteltu 100 TBq:n cesiumpäästöstä sekä yhdistetystä jodi- ja cesiumpäästöstä aiheutuvia annoksia. Cs-137:n 100 TBq:n päästö (on myös noin 0,02 % inventaarista) on vakavan reaktorionnettomuuden päästölle asetettu raja pitkäaikaisvaikutusten rajoittamiseksi (VNA 733/2008, STUK 2006). Muita maa-alkalimetalliryhmään kuuluvia nuklideja oletetaan vapautuvan samassa suhteessa OL3-laitosyksikön inventaarista. Päästön alkuhetki on 0 tuntia ja kesto 24 tuntia. Radioaktiivista hajoamista ei ole laskettu päästön kuluessa eli on oletettu samoin kuin jodin tapauksessa. Päästön tapahduttua radioaktiivinen hajoaminen otetaan huomioon sekä ilmassa leviämisen että maahan laskeutumisen aikana ja sen jälkeen. Myös tähän on lisätty herkkyytarkastelu ja luvussa 5.2.3 on laskettu radioaktiivisen hajoamisen vaikutusta annoksiin viivästetyssä päästössä.

Taulukko A2. OL3:n reaktorin inventaari tarkasteltavien radionuklidien osalta käyttöjakson lopussa (TVO 2004) ja tässä raportissa käytetyt päästömäärät. Inventaari tarkoittaa reaktorissa hetkellä 0 olevaa määrää. Jalokaasupäästö tarkoittaa 100 %:n päästömäärää, jota on lisäksi korjattava radioaktiivisen hajoamisen takia päästön alkuhetken ja keston mukaisesti. Jodien ja cesiumien osalta ilmoitettuja päästömääriä ei korjata radioaktiivisen hajoamisen takia.

Nuklidi	OL3 inventaari [Bq]	Päästö [Bq]
Jalokaasut		
Kr-83M	6.0E+17	6.0E+17
Kr-85	5.7E+16	5.7E+16
Kr-85M	1.3E+18	1.3E+18
Kr-87	2.5E+18	2.5E+18
Kr-88	3.5E+18	3.5E+18
Xe-133	9.7E+18	9.7E+18
Xe-133M	3.1E+17	3.1E+17
Xe-135	3.0E+18	3.0E+18
Xe-135M	2.1E+18	2.1E+18
Xe-138	8.6E+18	8.6E+18
Jodit		
I-131	4.8E+18	1.0E+15
I-132	7.0E+18	1.5E+16
I-133	1.0E+19	2.1E+15
I-134	1.1E+19	2.3E+15
I-135	9.5E+18	2.0E+15
Cesium + rubidium		
Cs-134	9.3E+17	1.5E+14
Cs-136	2.3E+17	3.6E+13
Cs-137	6.4E+17	1.0E+14
Cs-138	9.3E+18	1.5E+15
Rb-88	3.6E+18	5.6E+14
Rb-89	4.7E+18	7.3E+14

5.2 Tulokset

Laskenta on suoritettu erikseen jalokaasu-, jodi- ja cesiumpäästöille. Säteilyannosten laskenta-aika on asetettu samaksi kuin toimenpiteeseen kuuluva tarkastelu-aika. Laskeumasta tulevaa ulkoista annosta on laskettu toimenpiderajoihin liittyvien altistusaikojen mukaisesti: 2 vuorokautta sisälle suojautumisessa, 1 viikko evakuoinnissa. Pilvestä tuleva suora ulkoinen säteilyannos sekä hengitysannokset lasketaan ohi kulkeneen päästövanan pitoisuuksista ja tarkastelluissa tilanteissa päästövana on aina ohittanut tarkastelupisteen. Näistä päästöistä ympäristön yksilölle aiheutuvia säteilyannoksia verrataan suojelutoimenpiteille annettuihin annosrajoihin, jotta pystytään arvioimaan, millä päästön suuruudella ei aiheutuisi tarvetta suojaustoimenpiteille.

Tulokset on esitetty ensiksi taulukkomuodossa kaikille laskentatilanteille. Kuvina on esitetty osa tuloksista. Tulokset on laskettu etäisyyspisteille 1, 3, 5, 10 ja 20 kilometriä. Kokonaisannos näiltä altistusreiteiltä lasketaan ohjelman sisällä ja on huomattava, että esitetyllä fraktiililla eri

altistusreittejä ja kokonaisannosta vastaavat säätilanteet voivat olla erilaiset, jolloin kokonaisannosta ei voi suoraan laskea eri altistusreittien fraktiilarvojen summasta. Tuloksissa on tuotu esille erityisesti arvioitua konservatiivista sekä realistista päästötilannetta edustavat tulokset. Konservatiivisen päästön oletetaan alkavan nopeasti onnettomuuden alussa ja kestävän lyhyen ajan (alkuhetki 0, kesto 1 h). Realistisen päästön oletetaan viivästyvän ja kestävän pidemmän aikaa (alkuhetki ≥ 6 h, kesto 24 h).

5.2.1 Jalokaasut

Liitteen taulukossa 1 on esitetty yhden tunnin kestävästä jalokaasupäästöstä (konservatiivinen) aiheutuvat annosfraktiilit eri etäisyyspisteissä. Päästön alkuhetkenä ovat 0, 6 ja 24 tuntia. Taulukossa 2 on vastaava tulos, kun jalokaasupäästön kesto on 24 tuntia (realistinen).

Liitteen taulukoista 1 ja 2 nähdään, että jalokaasupäästöstä aiheutuu annosta myös laskeuman ja hengityksen kautta. Tämä johtuu Xe-138:n tytärnuklidista Cs-138 ja Kr-88:n tytärnuklidista Rb-88, jotka molemmat ovat deponoituvia mutta lyhytikäisiä nuklideja. Pääosin kokonaisannos aiheutuu suorasta säteilystä päästövanasta, koska annokset hengityksestä ja laskeumasta ovat selvästi pienempiä. Siksi laskeumasta tulevaa ulkoista annosta on integroitu vain 48 tuntia.

Jakauman fraktiileissa esiintyvät annokset ovat suuria, mikäli jalokaasupäästö tapahtuu nopeasti ja sen kesto on lyhyt (konservatiivinen tilanne). Suurin taulukossa 1 esiintyvä kokonaisannos on 5 Sv, joka esiintyy 1 km:n etäisyydellä päästöpuolelta. Jotta tämä annos olisi 10 mSv (sisälle suojautumisen toimenpideraja), olisi päästön oltava vain 0,2 % jalokaasuinventaarista. Realistisemmilla päästöoletuksilla (päästön alkuhetki 6 h, kesto 24 h, taulukko 2) maksimiannokseksi saadaan 1 km etäisyydellä 99,5 % fraktiililla 360 mSv. Tällöinkin sisälle suojautumisen toimenpiderajatason alittamiseksi jalokaasupäästön olisi oltava alle 2,8 % inventaarista.

Liitteen kuvissa 1 - 5 on esitetty jalokaasupäästön aiheuttamien annosten komplementaariset kumulatiiviset todennäköisyysjakaumat eri etäisyyksillä, kun päästön alkuhetki on 6 ja kesto 24 tuntia. Kuvaan 1 on merkitty myös fraktiilien 95 % ja 99,5 % tasot ja 10 mSv:n toimenpidetaso. Kuvien mukaan 10 mSv ylittyy muilla paitsi 20 kilometrin etäisyyksillä mainittujen yläfraktiilien tasoilla.

Oletus jalokaasujen 100 % vapautumisesta on hyvin konservatiivinen, kun kuitenkin jodi- ja cesiumpäästöjen suuruusluokan perusteella suojarakennus pysyisi onnettomuustilanteessa tiiviinä. Realistisempi suuruusluokka 24 h kestäväälle jalokaasupäästölle suojarakennuksen pysyessä tiiviinä olisi n. 1 % sydäninventaarista. Tuloksia voidaan skaalata suoraan päästön suhteen. Jos esimerkiksi jalokaasupäästö olisi 1 %, tulee taulukoissa esiintyvät annosarvot jakaa luvulla 100, jolloin taulukossa 1 esiintyvä maksimiannos olisi 50 mSv. Vastaavasti kuvissa x-akselin annosarvo on jaettava luvulla 100. Tällä 1 %:n päästöosuudella eivät toimenpiderajat ylittyisi enää 5 kilometrin etäisyydellä konservatiivisessa laskentatilanteessa.

5.2.2 Jodit

Jodipäästön osalta on oletettu, että radioaktiivista hajoamista ei lasketa ennen päästön alkua, eikä sen kuluessa. Siten päästön alkuhetki ei vaikuta tuloksiin, mutta päästön kesto vaikuttaa, koska esimerkiksi integroitaessa annosta kaksi vuorokautta, ehtii ulkoista annosta laskeumasta kertyä kauemmin, jos päästö kestää tunnin verrattuna vuorokauden kestävään päästöön. Radioaktiivinen hajoaminen lasketaan ulos vapautumisen jälkeen ilmassa leviämisen sekä maahan laskeutumisen aikana ja sen jälkeen. Näissä laskuissa käytetty lyhin annoksen integrointiaika on 2 vrk ja pisin

päästön kesto on 1 vrk, jolloin päästövana on aina kokonaan ehtinyt ohittaa tarkasteluetäisyyden annosta laskettaessa.

Jodipäästöön liittyvät annostulokset on esitetty liitteen taulukoissa 3 - 5 sekä kuvissa 6 - 17. Taulukoiden 3 - 5 arvoista voidaan päätellä, että jodien tapauksessa kaikki kolme toimenpiderajaa (sisälle suojautuminen, evakuointi ja joditabletti) ylittyvät.

Oletettaessa konservatiivisempi päästön kesto, 1 h, ylittyy sisälle suojautumisen annosraja, 10 mSv, 3 kilometrin etäisyydellä mutta ei enää 5 kilometrin etäisyydellä yläfraktiilin tasolla. Samoin evakuoinnin annosraja ylittyy 3 kilometrin etäisyydellä mutta ei enää 5 kilometrin etäisyydellä yläfraktiilin tasolla.

Oletettaessa realistisempi päästön kesto, 24 h, sisälle suojautumisen annosraja ylittyy edelleenkin 3 kilometrin etäisyydellä mutta ei enää 5 kilometrin etäisyydellä yläfraktiilin tasolla. Samoin evakuoinnin annosraja ylittyy 3 kilometrin etäisyydellä mutta ei enää 5 kilometrin etäisyydellä yläfraktiilin tasolla. Laskeumasta tulevan ulkoisen annoksen integrointiajan pidentäminen yhteen kuukauteen ei muuta näitä etäisyyksiä.

Joditabletin annosraja ylittyy aikuisen osalta (50 mGy) 3 kilometrin etäisyydellä mutta ei enää 5 kilometrin etäisyydellä. Mutta lapsen osalta annosraja (10 mGy) ylittyy aina 20 kilometrin etäisyydelle saakka.

Jos herkkyytarkastelumielessä jodin radioaktiivinen hajoaminen otettaisiin huomioon ennen ulos vapautumista esimerkiksi yhden tunnin päästössä ja kahden vuorokauden integrointiajalla, vaikuttaa se ulkoiseen annokseen pilvestä mutta ei annoksiin muista altistusreiteistä. Pilvestä tuleva annos pienenee lähietäisyyksillä alle 10 % mutta 20 kilometrin päässä vaikutusta ei enää ole. Kokonaisannokseen hajoamisella ei ole vaikutusta, koska se koostuu lähes kokonaan hengitysannoksesta ja laskeumasta tulevasta ulkoisesta annoksesta.

Jos lisäksi otettaisiin huomioon myös päästön viivästyksen vaikutus, pienenisivät annokset esimerkiksi 6 tunnin viiveellä 20 %. Kun viive on 24 tuntia, pienenisivät annokset 45 % verrattuna tilanteeseen, jossa radioaktiivista hajoamista ei lasketa. Tässä jälkimmäisessä tapauksessa sisälle suojautumisen ja evakuoinnin annosrajat eivät enää ylittyisi 3 kilometrin päässä.

Joditabletin osalta päästön viivästyksen ja radioaktiivisen hajoamisen mukaanotto lyhentäisi aikuisen toimenpiderajan yhden kilometrin etäisyydelle ja lapsen toimenpiderajan 10 kilometrin etäisyydelle.

5.2.3 Cesiumit

Taulukossa 6 on esitetty cesiumpäästöstä aiheutuvia annoksia etäisyyspisteissä, kun päästön kesto on 1 tunti. Taulukossa 7 päästön kesto on 24 tuntia. Ulkoista annosta laskeumasta on integroitu 2 vuorokautta tai yksi viikko. Hengitysannos on laskettu aikuiselle, koska toisin kuin jodien osalta, aikuisen hengitysnopeuden ja hengitysannoskertoimen tulo on suurempi kuin 1-vuotiaan lapsen. Taulukon arvoista havaitaan, että kokonaisannos ylittää toimenpiderajan vain yhden kilometrin etäisyydellä ja kolmen kilometrin etäisyydellä annostaso on toimenpiderajan alapuolella. Tämä käy ilmi myös kuvista 18 - 25. Tulos on sama sekä konservatiivisessa että realistisessa päästössä.

Suurin taulukossa 6 esiintyvä kokonaisannos on 63 mSv, joka esiintyy 1 km:n etäisyydellä päästöpuolelta. Jotta tämä annos olisi 20 mSv (evakuoinnin toimenpideraja), olisi Cs-137 päästön oltava vain kolmasosa eli 30 TBq (0,005 % inventaarista).

Jos cesiumin radioaktiivinen hajoaminen otettaisiin huomioon ennen ulos vapautumista esimerkiksi yhden tunnin päästössä ja kahden vuorokauden integrointiajalla, vaikuttaa se ulkoiseen annokseen pilvestä ja vain hieman hengitysannokseen mutta ei laskeumasta tulevaan ulkoiseen annokseen eli hyvin paljon samalla tavoin kuin jodin tapauksessa. Pilvestä tuleva annos pienenee lähietäisyyksillä 40 % mutta kauempana vähemmän. Kokonaisannokseen hajoamisella ei ole vaikutusta, koska se koostuu lähes kokonaan hengitysannoksesta ja laskeumasta tulevasta ulkoisesta annoksesta.

Jos lisäksi otettaisiin huomioon myös päästön viivästyksen vaikutus, pienenee kokonaisannos vain hieman yhden kilometrin etäisyydellä, jos päästö viivästyy 6 tuntia. Jos viive on 24 tuntia, ei kokonaisannos pienene enää lisää.

5.2.4 Yhteenveto tuloksista

Jodien osalta toimenpideraja:

- sisälle suojautumiselle (10 mSv kahdessa vuorokaudessa) ylitetään 0,5 %:n todennäköisyydellä 3 kilometrin etäisyydellä (todennäköisyys riippuu sääjakaumasta)
- evakuoinnin annosraja (20 mSv yhdessä viikossa) ylitetään 0,5 %:n todennäköisyydellä 3 kilometrin etäisyydellä
- joditabletin annosraja lapselle (10 mGy) ylitetään 0,5 %:n todennäköisyydellä 20 kilometrin etäisyydellä

Jotta mikään toimenpideraja ei ylittyisi 0,5 %:n todennäköisyydellä 1 kilometrin etäisyydellä, tulisi I-131:n päästön olla enintään 13 TBq, joka on noin 1,3 % ehdotetusta jodin päästörajasta 1000 TBq. Sisälle suojautumisen ja evakuoinnin osalta riittäisi I-131:n päästön raja-arvoksi 100 TBq.

Vastaavasti 5 kilometrin etäisyydellä vaadittaisiin I-131:n päästöä rajoitettavaksi arvoon 160 TBq, jotta kilpirauhaselle asetettu toimenpideraja ei ylittyisi. Sisälle suojautumisen ja evakuoinnin osalta ei toimenpideraja ylittyisi edes 1000 TBq:n päästöllä.

Nuklidille Cs-137 pitkän aikavälin maankäytön rajoituksia varten asetettu päästöraja 100 TBq aiheuttaa vastatoimenpiteiden tarvetta lyhyemmällä etäisyydellä kuin 1000 TBq I-131 päästö. Jotta mikään toimenpideraja ei ylittyisi 0,5 %:n todennäköisyydellä 1 kilometrin etäisyydellä, tulisi Cs-137:n päästön olla enintään 40 TBq. Sisälle suojautumisen ja evakuoinnin osalta ei mikään toimenpideraja ylittyisi edes 100 TBq:n päästöllä 5 km:n etäisyydellä.

Jalokaasupäästö olisi rajoitettava 0,2 %:n tasolle inventaarista, jotta vastatoimenpiteitä jalokaasupäästön takia ei tarvitsisi suorittaa 0,5 %:n todennäköisyydellä 1 kilometrin etäisyydellä. Vastaavasti 5 km:n etäisyydellä tulisi päästöä rajoittaa 2 %:n tasolle inventaarista, jotta sisälle suojautumisen toimenpideraja ei ylittyisi.

Taulukossa A3 on esitetty etäisyydet, joilla tarkastelluista päästöistä aiheutuu vielä toimenpiderajojen ylitys sekä konservatiivisessa että realistisessa tilanteessa 0,5 %:n todennäköisyydellä. Tässä konservatiivinen ja realistinen tarkoittavat päästön ajankohtaa ja kestoa.

Taulukko A3. Suurin etäisyys [km], jolla toimenpideraja ylitetään 0,5 %:n todennäköisyydellä.

Päästö	Konservatiivinen(alkuhetki 0, kesto 1 h)		Realistinen(alkuhetki \geq 6h, kesto 24 h)	
	Sisälle suojautuminen	Evakuointi	Sisälle suojautuminen	Evakuointi
I-131 1000 TBq (*)	3	3	3	3
Jalokaasut 100 %	20	20	10	5
Cs-137 100 TBq (*)	1	1	1	1

(*) päästö sisältää myös muut aineryhmän nuklidit OL3-reaktori-inventaarin suhteessa

Kuten taulukko A3 osoittaa, aiheutuisi 1000 TBq:n I-131-päästöstä tarve sisälle suojautumiselle ja evakuoinnille aina 3 kilometrin etäisyydelle saakka. 100 TBq:n Cs-137 päästö aiheuttaisi tarvetta näille väestönsuojaustoimenpiteille vain yhden kilometrin etäisyydellä. 100 % jalokaasupäästön aiheuttama väestönsuojaustarve riippuu päästön ajoituksesta siten, että realistisessa tapauksessa sisälle suojautumistarve ulottuu 10 kilometriin mutta evakuointitarve vain 5 kilometriin, mutta konservatiivisessa tapauksessa molempien suojaustoimenpiteiden tarve ulottuu 20 kilometrin etäisyydelle asti. Jos jalokaasupäästökseksi oletettaisiin 1 % sydäninventaarista, sisälle suojautumistarve ulottuisi 3 kilometriin ja evakuointitarve yhteen kilometriin

Jalokaasupäästön tapauksessa pilvestä tuleva ulkoinen säteily aiheuttaa ensisijaisen suojaustarpeen. Jodin osalta laskeumasta tuleva ulkoinen annos on suurin annoskomponentti, mutta myös hengitysannos sisälle suojautumisen osalta. Myös cesiumin osalta laskeumasta tuleva ulkoinen annos on vallitseva komponentti.

Vertailun vuoksi on taulukossa A4 esitetty vastaavat toimenpiderajoja edellyttävät etäisyydet 5 %:n todennäköisyydellä.

Taulukko A4. Suurin etäisyys [km], jolla toimenpideraja ylitetään 5 %:n todennäköisyydellä.

Päästö	Konservatiivinen(alkuhetki 0, kesto 1 h)		Realistinen(alkuhetki \geq 6h, kesto 24 h)	
	Sisälle suojautuminen	Evakuointi	Sisälle suojautuminen	Evakuointi
I-131 1000 TBq (*)	1	1	1	1
Jalokaasut 100 %	20	20	5	3
Cs-137 100 TBq (*)	0	0	0	0

(*) päästö sisältää myös muut aineryhmän nuklidit OL3-reaktori-inventaarin suhteessa

Verrattaessa taulukon A4 arvoja taulukon A3 arvoihin, voidaan todeta, että toimenpiderajaa vastaavat etäisyydet pienenevät muulloin paitsi jalokaasujen osalta konservatiivisessa tapauksessa, mikä johtuu tarkasteltujen peräkkäisten etäisyyspisteiden, 10 ja 20 km, pitkästä välimatkasta. Jodi- ja cesiumpäästöjen osalta toimenpiderajaetäisyydet jäävät 5 %:n todennäköisyyden tasolla korkeintaan yhteen kilometriin.

Koska onnettomuudessa kuitenkin voi vapautua näitä kaikkia kolmea aineryhmää yhtä aikaa sekä vielä muitakin reaktorissa olevia nuklideja, voisi näiden yhteisvaikutus lisätä annosta ja kasvattaa etäisyyttä, jolla suojaustoimenpiteitä tarvittaisiin. Taulukoissa esitettyjä tuloksia ei kuitenkaan voi yhdistellä eri aineryhmien välillä, kuten ei eri altistusreittien annoksia saman aineryhmän sisälläkään, koska niitä vastaavat säätötilanteet eivät vastaa toisiaan.

Liitteen taulukossa 8 on esitetty yhdistetystä jodi- ja cesiumpäästöstä aiheutuvat säteilyannosten arvot, kun päästön kesto on 24 tuntia ja laskeuman ulkoisen annoksen integrointiaika on 1 viikko. Evakuoinnin tarve ulottuu 3 kilometrin etäisyydelle, joten 100 TBq:n cesiumpäästön lisäys 1000 TBq:n jodipäästöön ei lisää evakuointietäisyyttä verrattuna etäisyyteen, joka saadaan pelkästä jodipäästöstä. Reaktorissa olevia muita aineryhmiä voidaan onnettomuustilanteessa olettaa vapautuvan vähemmän kuin herkemmin vapautuvia jalokaasuja, jodeja ja cesiumeja. Tähän on poikkeuksena telluuri (Te), jonka vapautumisosuus voi olla samaa suuruusluokkaa jodin ja cesiumin kanssa.

LÄHDELUETTELO

Blomqvist L., Savolainen I. 1982. Synpunkter på åtgärdsreferencer vid stora kärnkraftolyckor. Säteilyturvallisuuslaitos, STL-B-43.

IAEA, 2002. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, Safety Requirements, Safety Standards Series No. GS-R-2. STI/PUB/1133. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

ICRP Publication 71, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Dose Coefficients.

ICRP Publication 103, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annals of the ICRP 2007; 37 (2 – 4)

ICRP Publication 109, 2009. Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Annals of the ICRP 2009; 39 (1)

Ilvonen, M. 1994. Ilmakehään päässeiden radioaktiivisten aineiden leviämistä simuloivien ja niistä aiheutuvia säteilyannoksia laskevien ohjelmistojen kehittäminen. Espoo. 119 s. Diplomityö, TKK, Tietotekniikan osasto.

Mankamo T., Savolainen I., Tornio E., Vuori S. 1976. Ydinvoimalaitosten sijoituspaikkatutkimus. Liite V. Ydinvoimalaitosonnettomuuksien aiheuttamien terveysvaikutusten ja taloudellisten vahinkojen arvioiminen. VTT Ydinvoimatekniikan laboratorio, Tiedonanto 23.

NRC 1975. Reactor Safety Study. An assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power plants, Appendix VI. United States Nuclear Regulatory Commission, WASH-1400.

Rossi J. 1986. Eräitä lähdeterminarkasteluja ympäristön säteilyannosten kannalta. VTT VARA-31/86.

Rossi J. 1989. Ympäristön vastatoimenpiteet ja niiden tehokkuus ydinvoimalaitosonnettomuuden yhteydessä. Ydin- ja energiatekniikan lisensiaattiseminaari, kevät 1989. TKK-F-B121. (AKTU-270)

Savolainen, I., Vuori, S. 1977. Assessment of risks of accidents and normal operation at nuclear power plants. Technical Research Centre of Finland, Electrical and Nuclear Technology, Publication 21, Espoo. 23 s. + liitt. 15 s.

Savolainen I. 1979. Evakuoinnin ja paikallissuojautumisen merkitys ydinvoimalaitosonnettomuuksissa. VTT, Ydinvoimatekniikan laboratorio. Tutkimusselostus Nro YDI9135.

STUK. 1997a. Ohje YVL 7.2. Ydinvoimalaitoksen ympäristön väestön säteilyannosten arviointi. Säteilyturvakeskus. 11 s.

STUK. 1997b. Ohje YVL 7.3. Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen leviämisen laskennallinen arviointi. Säteilyturvakeskus. 11 s.

STUK. 1999. Ohje ST 7.3. Sisäisestä säteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen.

STUK. 2006. Ohje YVL 7.1. Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyaltistuksen ja radioaktiivisten aineiden päästöjen rajoittaminen. Säteilyturvakeskus.

STUK. 2010. Suojelutoimet säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa. Ohje VAL 1, luonnos 25.2.2010. Säteilyturvakeskus. 28 s.

TVO. 2004. Olkiluoto 3 PSAR, Section 15.1.6, Rev. 3.

WENRA, 2010. Statement on safety objectives for new nuclear power plants. Western European Nuclear Regulator's Association. November 2010.

VNA. 2008. Valtioneuvoston asetus ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta. 733/2008.

Liite

Taulukko 1. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Jalokaasupäästön kesto 1 tunti. Jalokaasupäästön alkuhetki on 0, 6 tai 24 tuntia. Laskeuman integrointiaika on 48 h kaikissa tilanteissa. Hengityksen kautta on laskettu vain aikuisen efektiivinen annos, koska päästössä ei ole jodeja.

Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]			
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Kokonaisannos
Päästön alkuhetki 0 h					
1	95	1,4E+00	3,4E-02	1,0E-02	1,4E+00
	99,5	4,6E+00	8,0E-01	7,5E-02	4,9E+00
3	95	4,7E-01	2,3E-02	8,4E-03	5,0E-01
	99,5	1,1E+00	3,8E-01	1,6E-02	1,3E+00
5	95	2,3E-01	1,6E-02	5,2E-03	2,9E-01
	99,5	4,9E-01	2,2E-01	7,7E-03	5,0E-01
10	95	9,8E-02	8,4E-03	2,2E-03	1,1E-01
	99,5	1,4E-01	6,0E-02	2,2E-03	1,5E-01
20	95	3,1E-02	3,7E-03	6,0E-04	3,6E-02
	99,5	5,2E-02	1,3E-02	6,0E-04	5,2E-02
Päästön alkuhetki 6 h					
1	95	2,4E-01	1,8E-03	1,0E-03	2,5E-01
	99,5	9,9E-01	3,8E-02	7,7E-03	1,0E+00
3	95	8,7E-02	1,4E-03	8,4E-04	8,8E-02
	99,5	2,8E-01	2,2E-02	2,1E-03	2,9E-01
5	95	4,9E-02	1,1E-03	6,5E-04	5,0E-02
	99,5	1,4E-01	1,7E-02	9,9E-04	1,4E-01
10	95	2,3E-02	5,6E-04	2,9E-04	2,4E-02
	99,5	3,8E-02	8,1E-03	4,3E-04	3,9E-02
20	95	8,6E-03	3,0E-04	1,0E-04	8,8E-03
	99,5	1,5E-02	2,8E-03	1,0E-04	1,5E-02
Päästön alkuhetki 24 h					
1	95	4,7E-02	2,0E-05	1,3E-05	4,7E-02
	99,5	1,7E-01	4,9E-04	9,9E-05	1,7E-01
3	95	1,4E-02	1,8E-05	1,1E-05	1,4E-02
	99,5	4,9E-02	2,9E-04	2,8E-05	4,9E-02
5	95	9,0E-03	1,2E-05	7,7E-06	9,0E-03
	99,5	2,3E-02	1,7E-04	9,9E-06	2,3E-02
10	95	4,0E-03	6,7E-06	3,7E-06	4,0E-03
	99,5	1,1E-02	8,1E-05	4,6E-06	1,1E-02
20	95	1,8E-03	3,9E-06	1,3E-06	1,8E-03
	99,5	4,9E-03	3,6E-05	1,3E-06	4,9E-03

Taulukko 2. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Jalokaasupäästön kesto 24 tuntia. Jalokaasupäästön alkuhetki on 0, 6 tai 24 tuntia. Laskeuman integrointiaika on 48 h kaikissa tilanteissa. Hengityksen kautta on laskettu vain aikuisen efektiivinen annos, koska päästössä ei ole jodeja.

Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]			
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Kokonaisannos
Päästön alkuhetki 0 h					
1	95	2,3E-01	2,6E-03	1,0E-03	2,3E-01
	99,5	7,7E-01	6,2E-02	7,7E-03	8,7E-01
3	95	8,6E-02	2,2E-03	8,4E-04	8,8E-02
	99,5	2,3E-01	2,9E-02	2,1E-03	2,3E-01
5	95	4,9E-02	1,2E-03	6,3E-04	5,0E-02
	99,5	1,1E-01	1,7E-02	7,7E-04	1,1E-01
10	95	2,1E-02	6,5E-04	2,9E-04	2,2E-02
	99,5	3,8E-02	8,1E-03	3,5E-04	3,8E-02
20	95	6,8E-03	3,9E-04	9,3E-05	7,9E-03
	99,5	1,2E-02	2,8E-03	1,0E-04	1,2E-02
Päästön alkuhetki 6 h					
1	95	8,2E-02	3,4E-04	1,7E-04	8,3E-02
	99,5	3,0E-01	8,0E-03	1,6E-03	3,6E-01
3	95	3,1E-02	3,0E-04	1,8E-04	3,2E-02
	99,5	1,0E-01	4,8E-03	4,5E-04	1,0E-01
5	95	1,8E-02	2,0E-04	1,3E-04	1,8E-02
	99,5	4,9E-02	2,9E-03	1,7E-04	4,9E-02
10	95	8,2E-03	1,1E-04	6,2E-05	8,2E-03
	99,5	1,8E-02	1,4E-03	7,7E-05	1,8E-02
20	95	3,1E-03	6,5E-05	2,0E-05	3,1E-03
	99,5	6,4E-03	6,0E-04	2,2E-05	6,4E-03
Päästön alkuhetki 24 h					
1	95	3,7E-02	3,9E-06	2,2E-06	3,7E-02
	99,5	1,3E-01	8,2E-05	1,7E-05	1,3E-01
3	95	1,1E-02	3,0E-06	1,8E-06	1,1E-02
	99,5	3,8E-02	4,8E-05	4,6E-06	3,8E-02
5	95	6,7E-03	2,6E-06	1,4E-06	6,7E-03
	99,5	2,3E-02	3,8E-05	2,1E-06	2,3E-02
10	95	3,1E-03	1,2E-06	6,8E-07	3,1E-03
	99,5	8,2E-03	1,7E-05	9,9E-07	8,2E-03
20	95	1,4E-03	6,6E-07	2,2E-07	1,4E-03
	99,5	3,8E-03	6,2E-06	2,2E-07	3,8E-03

Taulukko 3. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Jodipäästön kesto 1 tunti. Laskeumalle lasketun ulkoisen annoksen integrointiaika on 2 vuorokautta, 1 viikko tai 1 kuukausi. Kokonaisannos sisältää ulkoisen annoksen pilvestä ja laskeumasta sekä lapsen hengityspanoksen.

Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]				
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Hengitys lapsi, 1 v.	Kokonaisannos
Laskeuman integrointiaika 48 h						
1	95	1,4E-03	8,4E-03	4,7E-03	1,3E-02	2,0E-02
	99,5	4,6E-03	1,0E-01	1,6E-02	3,6E-02	1,0E-01
3	95	3,8E-04	2,5E-03	1,8E-03	4,6E-03	7,4E-03
	99,5	1,0E-03	1,7E-02	2,7E-03	6,0E-03	2,0E-02
5	95	2,2E-04	1,1E-03	1,0E-03	2,2E-03	3,8E-03
	99,5	3,8E-04	6,0E-03	1,3E-03	2,8E-03	7,6E-03
10	95	8,6E-05	5,0E-04	3,7E-04	9,0E-04	1,4E-03
	99,5	1,2E-04	1,6E-03	6,0E-04	1,5E-03	2,2E-03
20	95	2,7E-05	2,0E-04	1,3E-04	3,0E-04	4,6E-04
	99,5	4,1E-05	3,0E-04	2,1E-04	5,7E-04	7,7E-04
Laskeuman integrointiaika 1 viikko						
1	95	1,4E-03	1,3E-02	4,7E-03	1,3E-02	2,6E-02
	99,5	4,6E-03	1,7E-01	1,6E-02	3,6E-02	1,7E-01
3	95	3,8E-04	3,3E-03	1,8E-03	4,6E-03	7,4E-03
	99,5	1,0E-03	2,8E-02	2,7E-03	6,0E-03	2,8E-02
5	95	2,2E-04	1,9E-03	1,0E-03	2,2E-03	4,2E-03
	99,5	3,8E-04	1,0E-02	1,3E-03	2,8E-03	1,0E-02
10	95	8,6E-05	8,4E-04	3,7E-04	9,0E-04	1,6E-03
	99,5	1,2E-04	2,2E-03	6,0E-04	1,5E-03	2,8E-03
20	95	2,7E-05	2,8E-04	1,3E-04	3,0E-04	5,2E-04
	99,5	4,1E-05	5,1E-04	2,1E-04	5,7E-04	7,7E-04
Laskeuman integrointiaika 1 kk						
1	95	1,4E-03	1,8E-02	4,7E-03	1,3E-02	3,0E-02
	99,5	4,6E-03	2,2E-01	1,6E-02	3,6E-02	2,2E-01
3	95	3,8E-04	4,3E-03	1,8E-03	4,6E-03	9,6E-03
	99,5	1,0E-03	3,6E-02	2,7E-03	6,0E-03	3,6E-02
5	95	2,2E-04	2,4E-03	1,0E-03	2,2E-03	5,1E-03
	99,5	3,8E-04	1,3E-02	1,3E-03	2,8E-03	1,3E-02
10	95	8,6E-05	1,1E-03	3,7E-04	9,0E-04	2,0E-03
	99,5	1,2E-04	3,6E-03	6,0E-04	1,5E-03	3,6E-03
20	95	2,7E-05	4,3E-04	1,3E-04	3,0E-04	6,6E-04
	99,5	4,1E-05	6,9E-04	2,1E-04	5,7E-04	1,0E-03

Taulukko 4. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Jodipäästön kesto 24 tuntia. Laskeumalle lasketun ulkoisen annoksen integrointiaika on 2 vuorokautta, 1 viikko tai 1 kuukausi. Kokonaisannos sisältää ulkoisen annoksen pilvestä ja laskeumasta sekä lapsen hengityspanoksen.

Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]				
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Hengitys lapsi, 1 v.	Kokonaisannos
Laskeuman integrointiaika 48 h						
1	95	1,4E-03	3,7E-03	4,7E-03	1,3E-02	1,9E-02
	99,5	4,6E-03	4,8E-02	1,6E-02	3,6E-02	6,1E-02
3	95	3,8E-04	9,2E-04	1,8E-03	4,6E-03	5,5E-03
	99,5	1,0E-03	7,7E-03	2,7E-03	6,0E-03	1,3E-02
5	95	2,2E-04	5,2E-04	1,0E-03	2,2E-03	3,0E-03
	99,5	3,8E-04	2,8E-03	1,3E-03	2,8E-03	4,5E-03
10	95	8,6E-05	2,3E-04	3,7E-04	9,3E-04	1,0E-03
	99,5	1,2E-04	6,0E-04	6,0E-04	1,5E-03	1,7E-03
20	95	2,7E-05	7,9E-05	1,3E-04	3,0E-04	3,7E-04
	99,5	4,1E-05	1,4E-04	2,1E-04	5,5E-04	6,0E-04
Laskeuman integrointiaika 1 viikko						
1	95	1,4E-03	8,4E-03	4,7E-03	1,3E-02	2,0E-02
	99,5	4,6E-03	1,0E-01	1,6E-02	3,6E-02	1,0E-01
3	95	3,8E-04	2,0E-03	1,8E-03	4,6E-03	7,4E-03
	99,5	1,0E-03	1,7E-02	2,7E-03	6,0E-03	2,0E-02
5	95	2,2E-04	1,1E-03	1,0E-03	2,2E-03	3,8E-03
	99,5	3,8E-04	6,0E-03	1,3E-03	2,8E-03	7,7E-03
10	95	8,6E-05	5,1E-04	3,7E-04	9,3E-04	1,4E-03
	99,5	1,2E-04	1,7E-03	6,0E-04	1,5E-03	2,2E-03
20	95	2,7E-05	2,0E-04	1,3E-04	3,0E-04	4,6E-04
	99,5	4,1E-05	3,2E-04	2,1E-04	5,5E-04	7,7E-04
Laskeuman integrointiaika 1 kk						
1	95	1,4E-03	1,4E-02	4,7E-03	1,3E-02	2,6E-02
	99,5	4,6E-03	1,7E-01	1,6E-02	3,6E-02	1,7E-01
3	95	3,8E-04	3,3E-03	1,8E-03	4,6E-03	8,7E-03
	99,5	1,0E-03	2,8E-02	2,7E-03	6,0E-03	2,8E-02
5	95	2,2E-04	1,9E-03	1,0E-03	2,2E-03	4,2E-03
	99,5	3,8E-04	1,0E-02	1,3E-03	2,8E-03	1,1E-02
10	95	8,6E-05	8,5E-04	3,7E-04	9,3E-04	1,8E-03
	99,5	1,2E-04	2,8E-03	6,0E-04	1,5E-03	2,9E-03
20	95	2,7E-05	3,5E-04	1,3E-04	3,0E-04	5,4E-04
	99,5	4,1E-05	5,4E-04	2,1E-04	5,5E-04	1,0E-03

Taulukko 5. Fraktiilia vastaavat kilpirauhasen säteilyannokset eri etäisyyspisteissä jodipäästöstä.

Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Gy]	
		Kilpirauhanen aikuinen	Kilpirauhanen lapsi, 1 v.
1	95	1,0E-01	2,2E-01
	99,5	2,8E-01	7,5E-01
3	95	3,8E-02	8,4E-02
	99,5	5,8E-02	1,3E-01
5	95	1,9E-02	4,7E-02
	99,5	2,8E-02	6,0E-02
10	95	7,2E-03	1,7E-02
	99,5	1,3E-02	2,8E-02
20	95	2,6E-03	6,2E-03
	99,5	4,6E-03	1,0E-02

Taulukko 6. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Cesiumpäästön kesto 1 tunti. Laskeumalle lasketun ulkoisen annoksen integrointiaika on 2 vuorokautta tai 1 viikko.

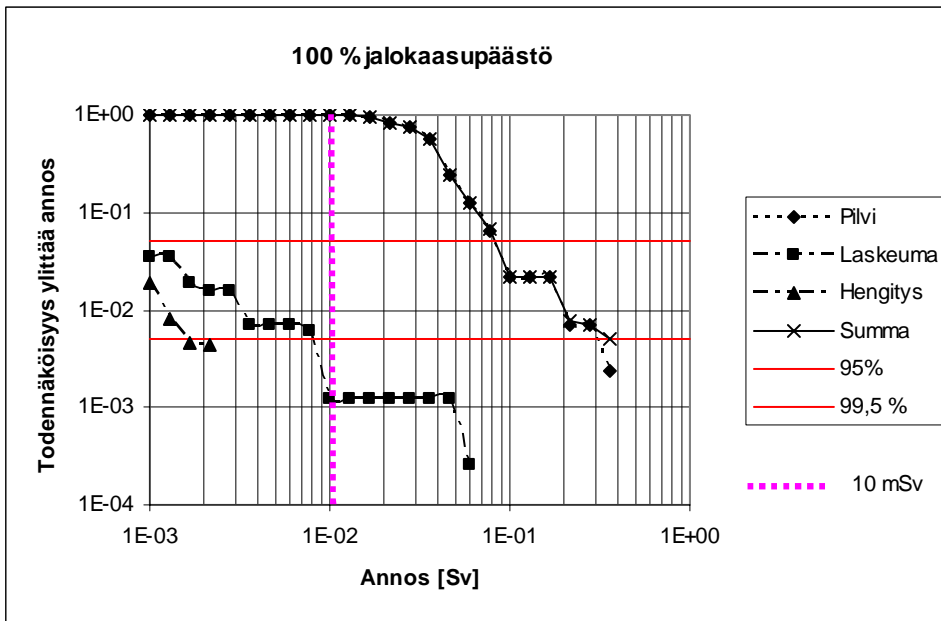
Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]			
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Kokonaisannos
Laskeuman integrointiaika 48 h					
1	95	4,9E-04	1,7E-03	3,1E-03	5,6E-03
	99,5	1,3E-03	2,2E-02	9,9E-03	2,3E-02
3	95	1,3E-04	4,3E-04	1,1E-03	1,6E-03
	99,5	1,5E-04	3,6E-03	1,6E-03	3,8E-03
5	95	5,2E-05	2,4E-04	6,2E-04	8,9E-04
	99,5	6,0E-05	1,3E-03	7,7E-04	1,6E-03
10	95	1,6E-05	1,1E-04	2,2E-04	3,0E-04
	99,5	1,7E-05	2,8E-04	4,3E-04	5,5E-04
20	95	4,6E-06	3,7E-05	8,1E-05	1,1E-04
	99,5	4,6E-06	6,0E-05	1,7E-04	2,1E-04
Laskeuman integrointiaika 1 viikko					
1	95	4,9E-04	5,1E-03	3,1E-03	8,4E-03
	99,5	1,3E-03	6,3E-02	9,9E-03	6,3E-02
3	95	1,3E-04	1,5E-03	1,1E-03	2,7E-03
	99,5	1,5E-04	1,0E-02	1,6E-03	1,0E-02
5	95	5,2E-05	6,8E-04	6,2E-04	1,4E-03
	99,5	6,0E-05	3,6E-03	7,7E-04	3,6E-03
10	95	1,6E-05	3,1E-04	2,2E-04	5,4E-04
	99,5	1,7E-05	1,0E-03	4,3E-04	1,0E-03
20	95	4,6E-06	1,3E-04	8,1E-05	1,8E-04
	99,5	4,6E-06	2,1E-04	1,7E-04	2,8E-04

Taulukko 7. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Cesiumpäästön kesto 24 tuntia. Laskeumalle lasketun ulkoisen annoksen integrointi-aika on 2 vuorokautta tai 1 viikko.

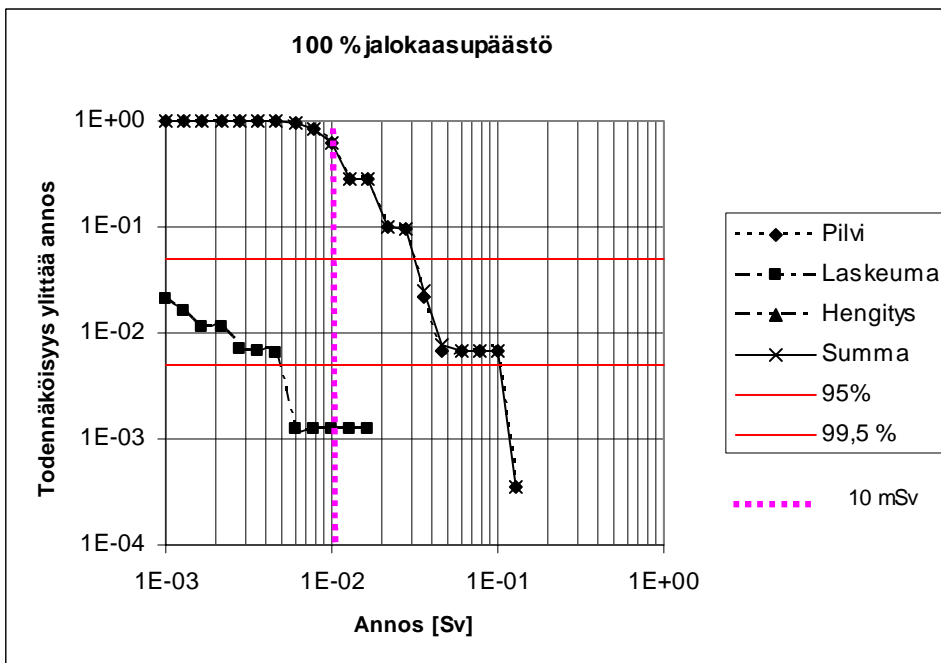
Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]			
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys aikuinen	Kokonaisannos
Laskeuman integrointi-aika 48 h					
1	95	4,9E-04	1,1E-03	3,1E-03	5,5E-03
	99,5	1,3E-03	1,4E-02	9,7E-03	1,7E-02
3	95	1,3E-04	2,5E-04	1,1E-03	1,6E-03
	99,5	1,5E-04	2,2E-03	1,6E-03	3,5E-03
5	95	5,2E-05	1,4E-04	6,2E-04	8,3E-04
	99,5	6,0E-05	7,7E-04	7,7E-04	1,3E-03
10	95	1,6E-05	6,6E-05	2,2E-04	2,9E-04
	99,5	1,7E-05	2,1E-04	4,3E-04	4,6E-04
20	95	4,6E-06	2,8E-05	8,1E-05	1,0E-04
	99,5	4,6E-06	4,2E-05	1,7E-04	2,0E-04
Laskeuman integrointi-aika 1 viikko					
1	95	4,9E-04	4,8E-03	3,1E-03	7,3E-03
	99,5	1,3E-03	6,3E-02	9,7E-03	6,3E-02
3	95	1,3E-04	1,2E-03	1,1E-03	2,5E-03
	99,5	1,5E-04	1,0E-02	1,6E-03	1,0E-02
5	95	5,2E-05	6,8E-04	6,2E-04	1,4E-03
	99,5	6,0E-05	3,6E-03	7,7E-04	3,6E-03
10	95	1,6E-05	3,1E-04	2,2E-04	5,0E-04
	99,5	1,7E-05	8,0E-04	4,3E-04	1,0E-03
20	95	4,6E-06	1,3E-04	8,1E-05	1,7E-04
	99,5	4,6E-06	1,8E-04	1,7E-04	2,8E-04

Taulukko 8. Altistusreittien fraktiilia vastaavat säteilyannokset eri etäisyyspisteissä. Yhdistetty jodi- ja cesiumpäästö (1000 TBq Cs-137 + 100 TBq I-131 ja muita samassa suhteessa), kesto 24 tuntia. Laskeumasta lasketun ulkoisen annoksen integrointi-aika on 1 viikko. Kokonaisannos sisältää ulkoisen annoksen pilvestä ja laskeumasta sekä lapsen hengitysannoksen.

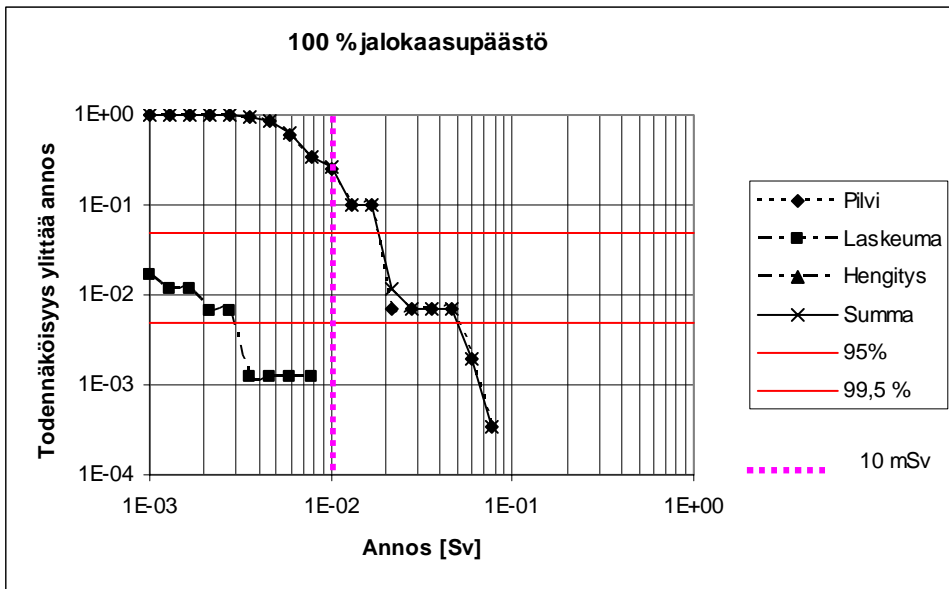
Etäisyys [km]	Fraktiili [%]	Fraktiilia vastaava annos [Sv]			
		Pilvi	Laskeuma	Hengitys lapsi, 1 v.	Kokonais- annos
Laskeuman integrointi-aika 1 viikko					
1	95	1.8E-03	1.3E-02	6.0E-02	8.7E-02
	99,5	6.0E-03	1.7E-01	1.7E-01	2.8E-01
3	95	5.1E-04	3.3E-03	2.3E-02	2.6E-02
	99,5	1.0E-03	2.8E-02	3.6E-02	4.5E-02
5	95	2.9E-04	1.9E-03	1.2E-02	1.4E-02
	99,5	3.8E-04	1.0E-02	1.7E-02	1.7E-02
10	95	1.1E-04	8.4E-04	4.8E-03	4.8E-03
	99,5	1.5E-04	2.5E-03	7.7E-03	9.2E-03
20	95	3.4E-05	3.0E-04	1.6E-03	1.8E-03
	99,5	5.2E-05	5.1E-04	2.8E-03	3.3E-03



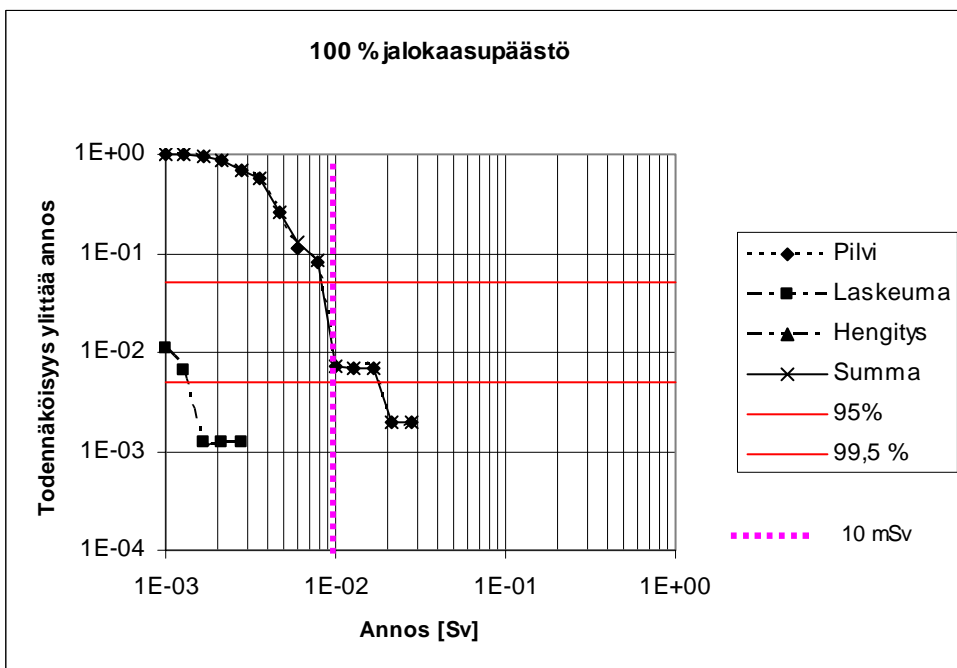
Kuva 1. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön alkuhetki on 6 tuntia onnettomuuden alusta ja kesto 24 tuntia. Kuvassa on esitetty 95 % ja 99,5 % fraktiilien tasot sekä sisälle suojautumisen toimenpidetasoraja 10 mSv.



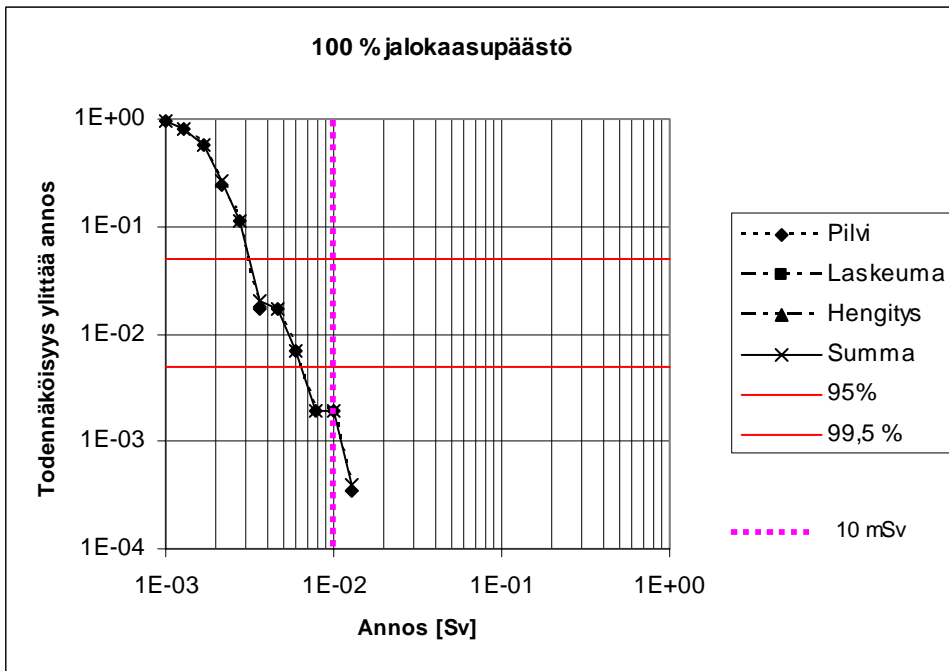
Kuva 2. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön alkuhetki on 6 tuntia onnettomuuden alusta ja kesto 24 tuntia.



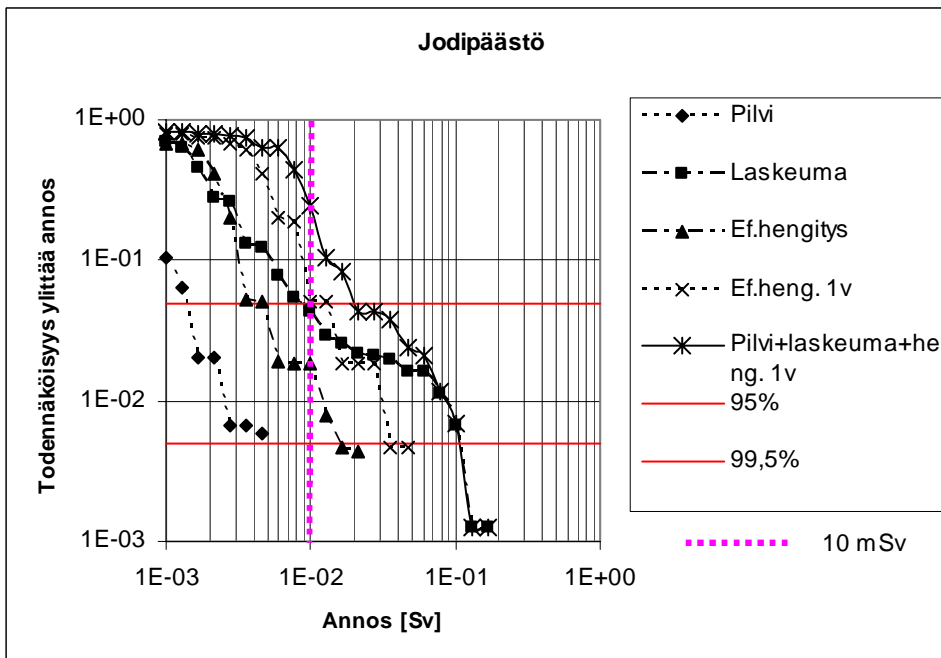
Kuva 3. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 5 km. Päästön alkuhetki on 6 tuntia onnettomuuden alusta ja kesto 24 tuntia.



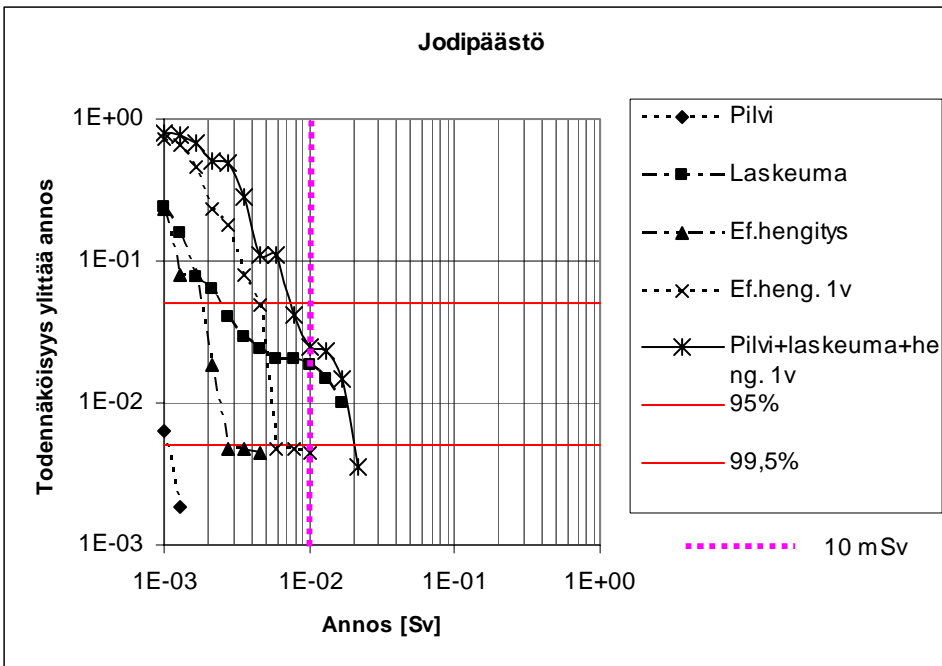
Kuva 4. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 10 km. Päästön alkuhetki on 6 tuntia onnettomuuden alusta ja kesto 24 tuntia.



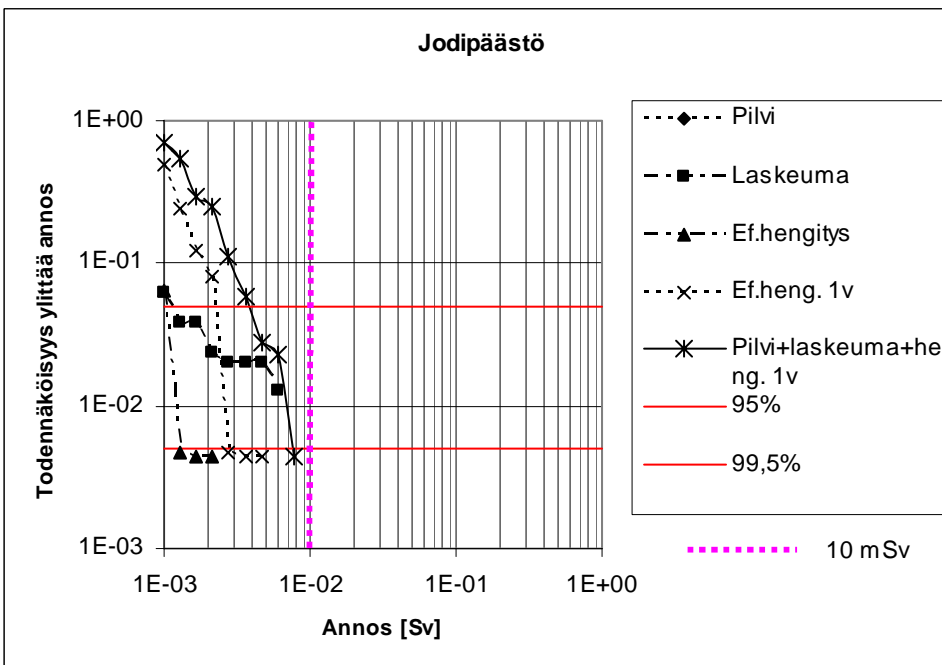
Kuva 5. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 20 km. Päästön alkuhetki on 6 tuntia onnettomuuden alusta ja kesto 24 tuntia.



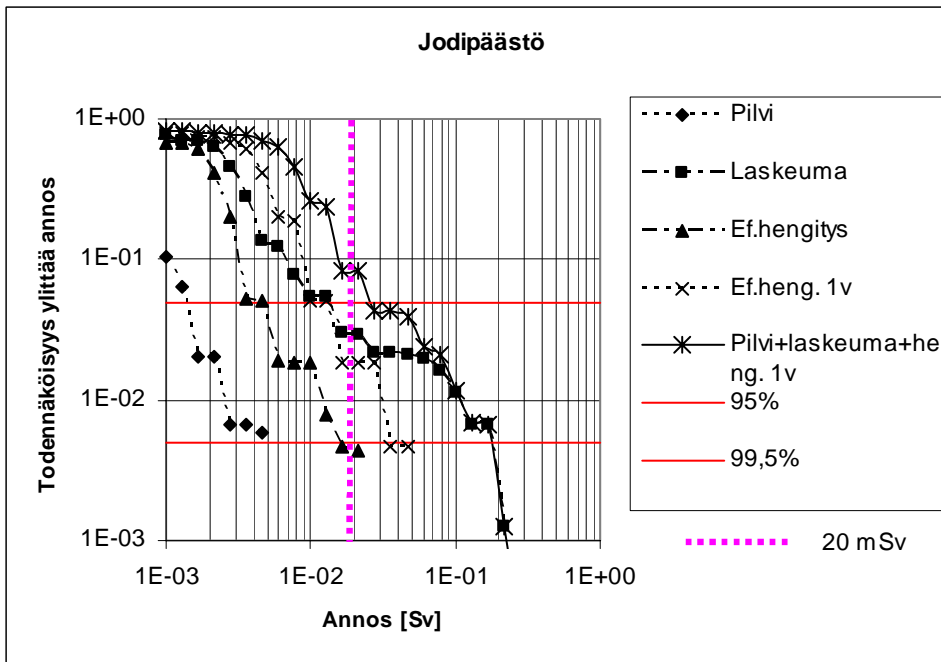
Kuva 6. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointiaika laskeumasta 48 tuntia, mikä on sisälle suojautumisen toimenpidetasorajan 10 mSv laskenta-aika.



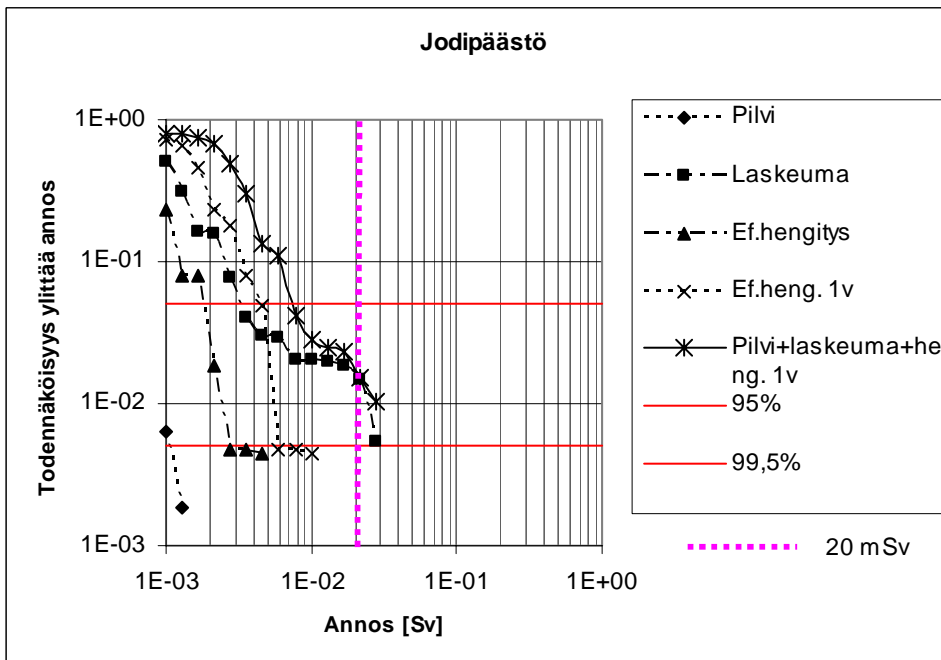
Kuva 7. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 1 tuntia ja annoksen integrointiaika laskeumasta 48 tuntia, mikä on sisälle suojautumisen toimenpidetasorajan 10 mSv laskenta-aika.



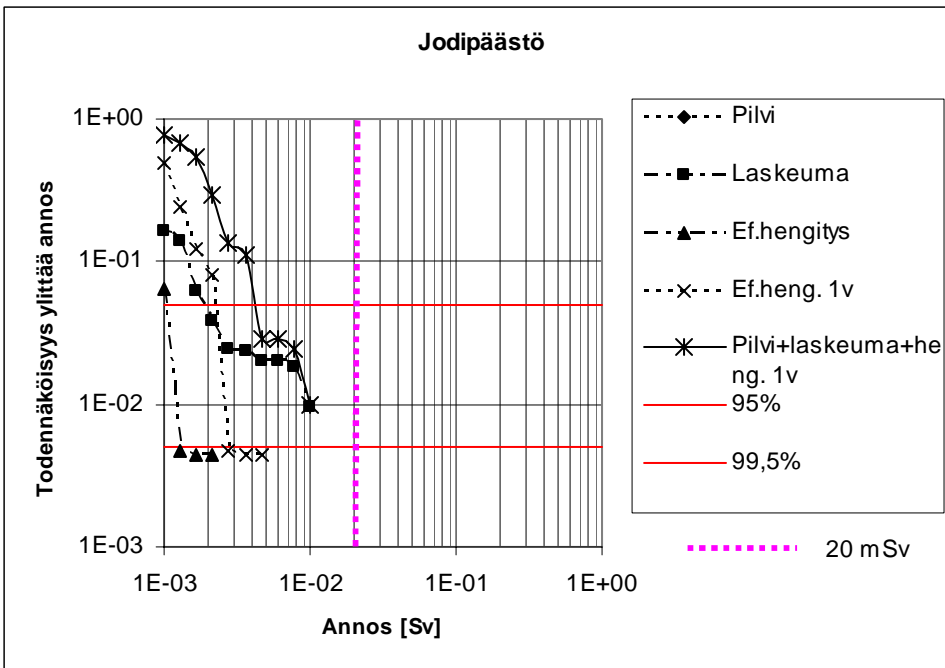
Kuva 8. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 5 km. Päästön kesto 1 tuntia ja annoksen integrointiaika laskeumasta 48 tuntia, mikä on sisälle suojautumisen toimenpidetasorajan 10 mSv laskenta-aika.



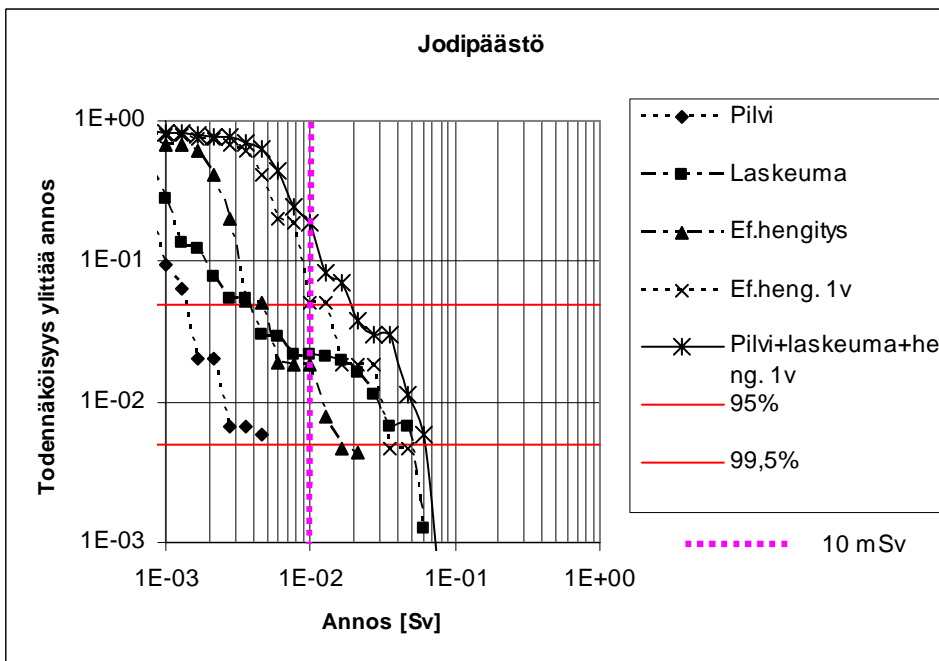
Kuva 9. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointiaika laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpidetasorajan, 20 mSv, laskenta-aikaa.



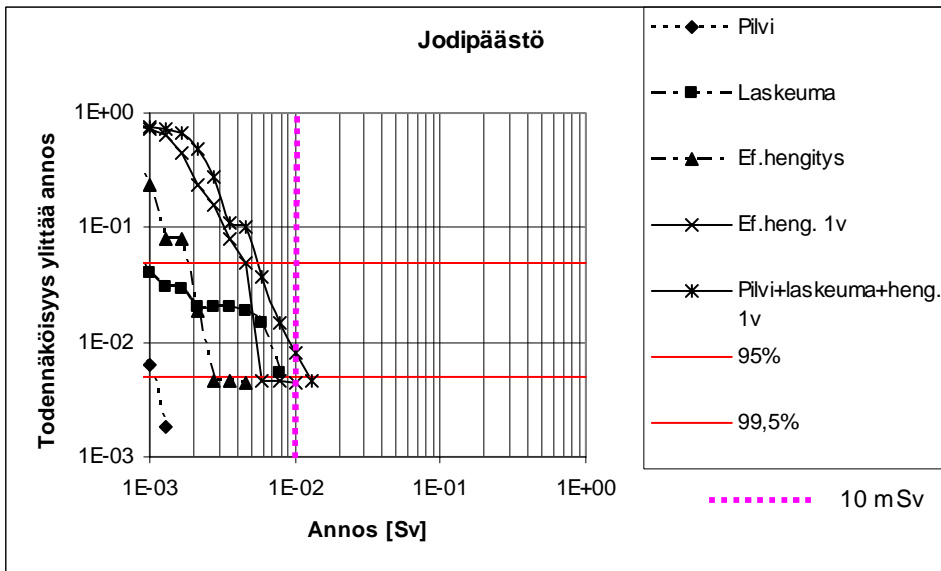
Kuva 10. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointiaika laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpidetasorajan, 20 mSv, laskenta-aikaa.



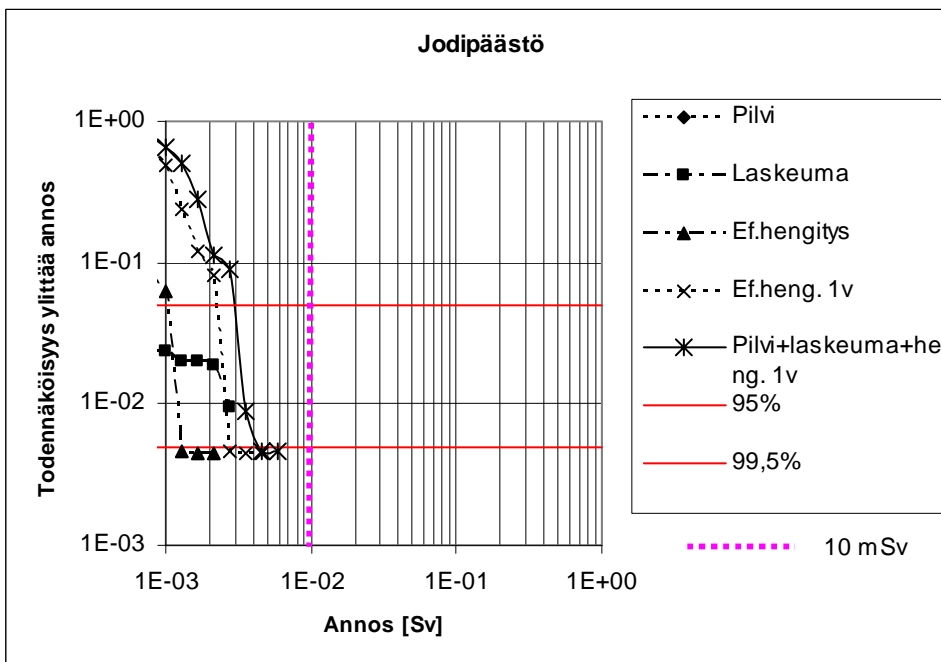
Kuva 11. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 5 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointi-aika laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpidetasorajan, 20 mSv, laskenta-aikaa.



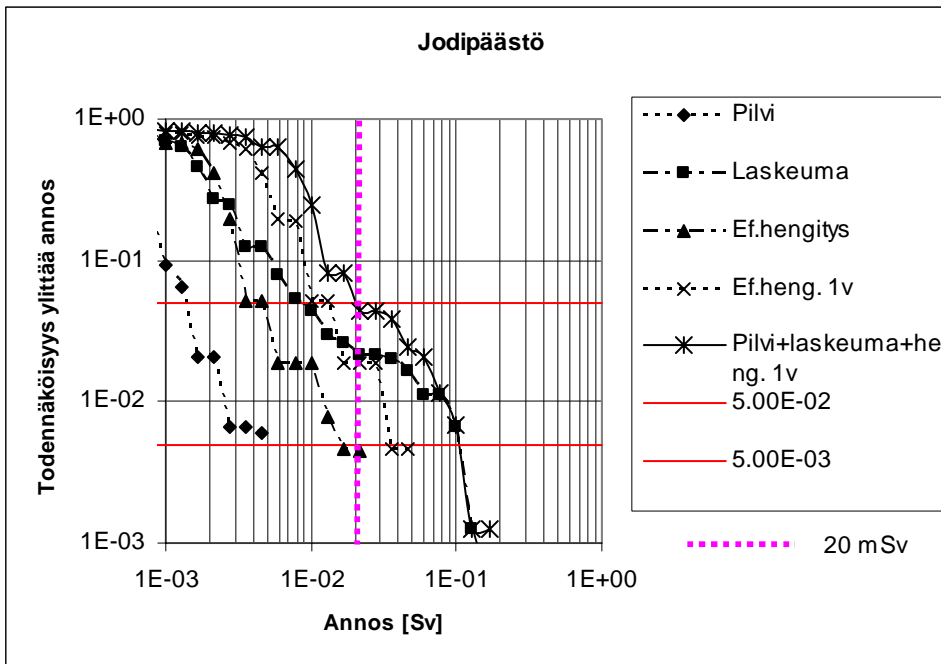
Kuva 12. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi-aika laskeumasta 48 tuntia, mikä on sisälle suojautumisen toimenpidetasorajan 10 mSv laskenta-aika.



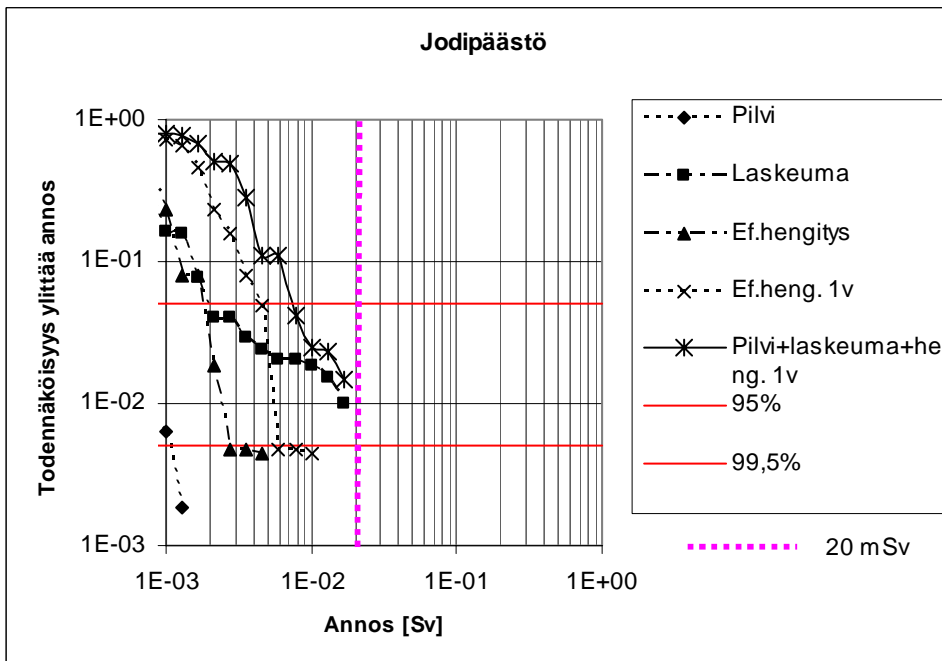
Kuva 13. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia.



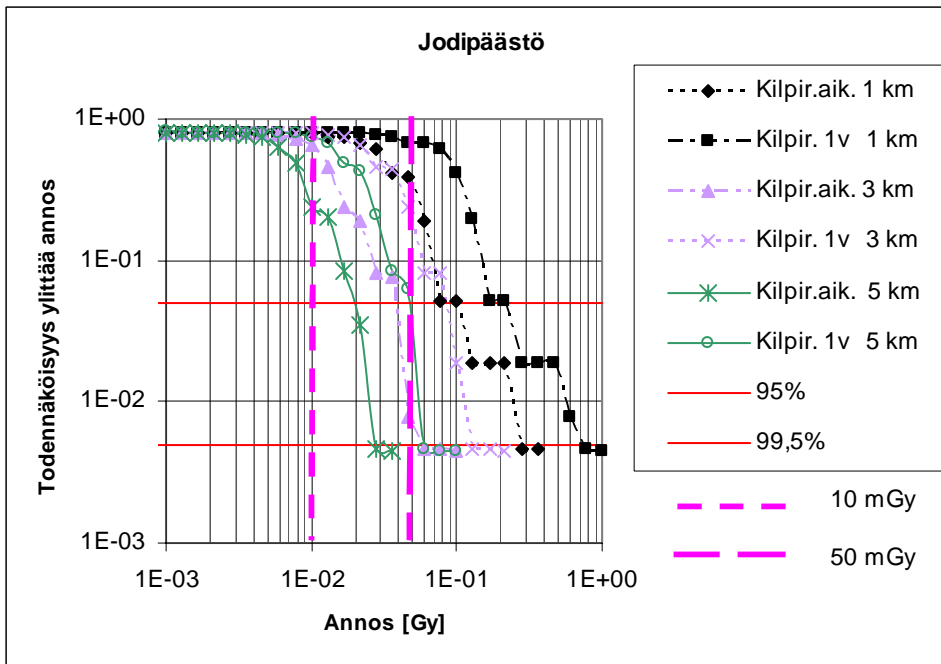
Kuva 14. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 5 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia.



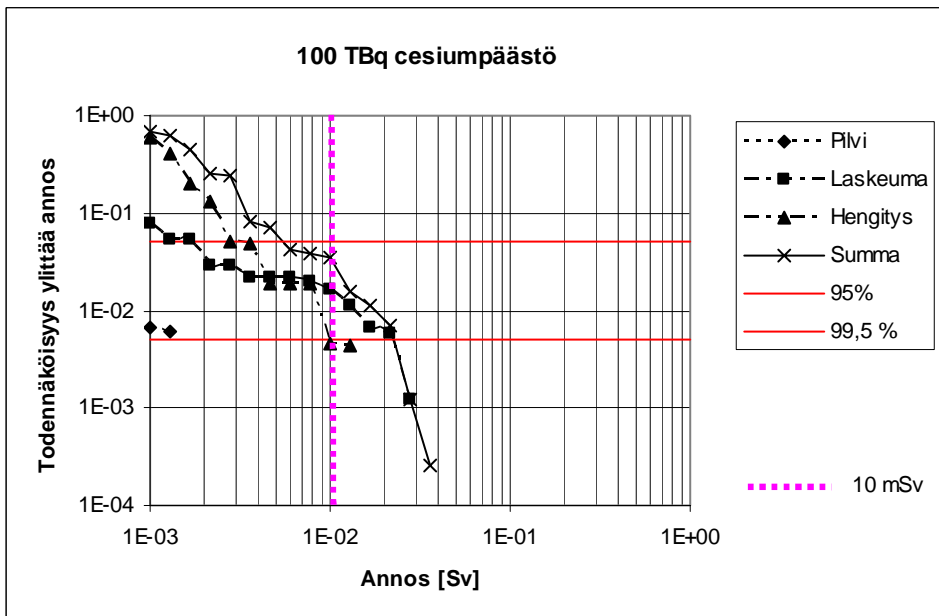
Kuva 15. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan, 20 mSv, laskenta-aikaa.



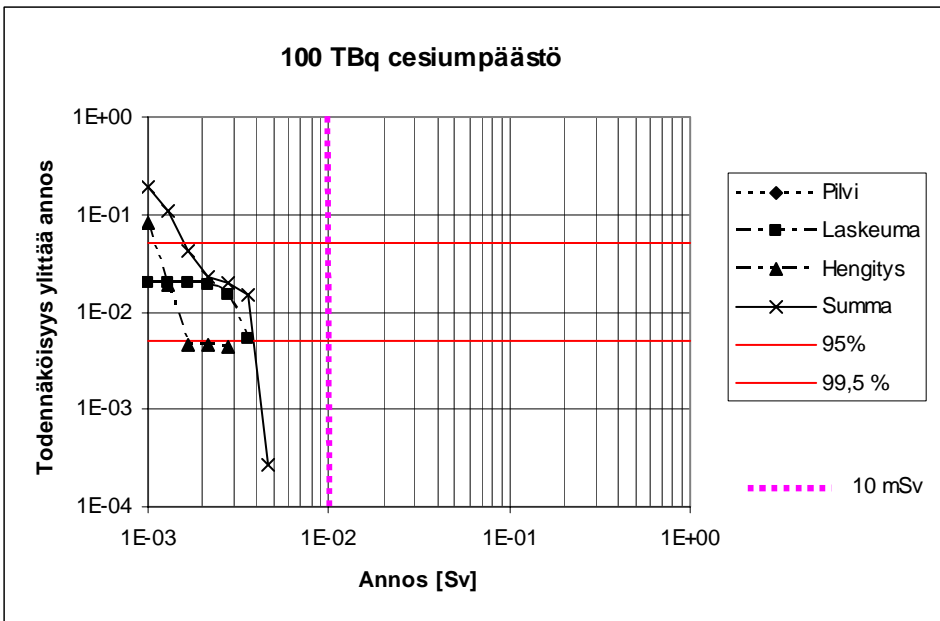
Kuva 16. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



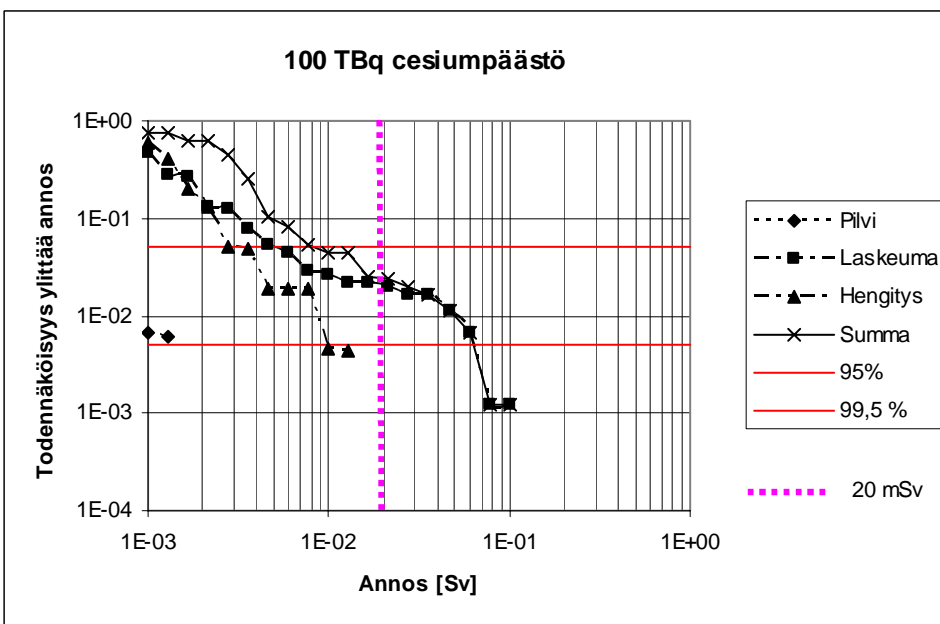
Kuva 17. Kilpirauhasannosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma kolmella etäisyydellä 1, 3 ja 5 km. Päästön kesto 24 tuntia. Kuvaan on merkitty aikuisen sekä lapsen toimenpiderajan arvot 10 ja 50 mGy.



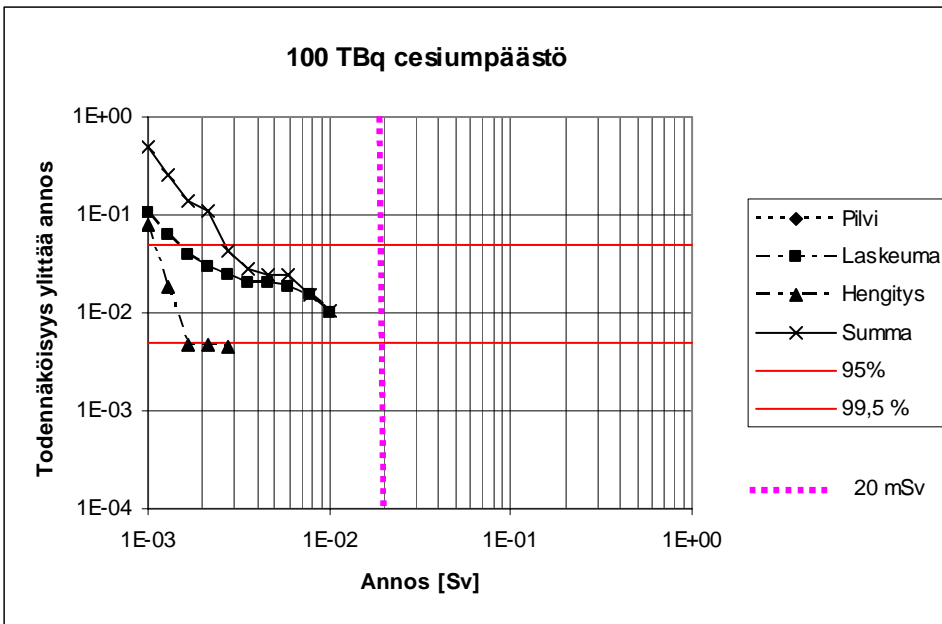
Kuva 18. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia, joka vastaa sisälle suojautumiselle asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



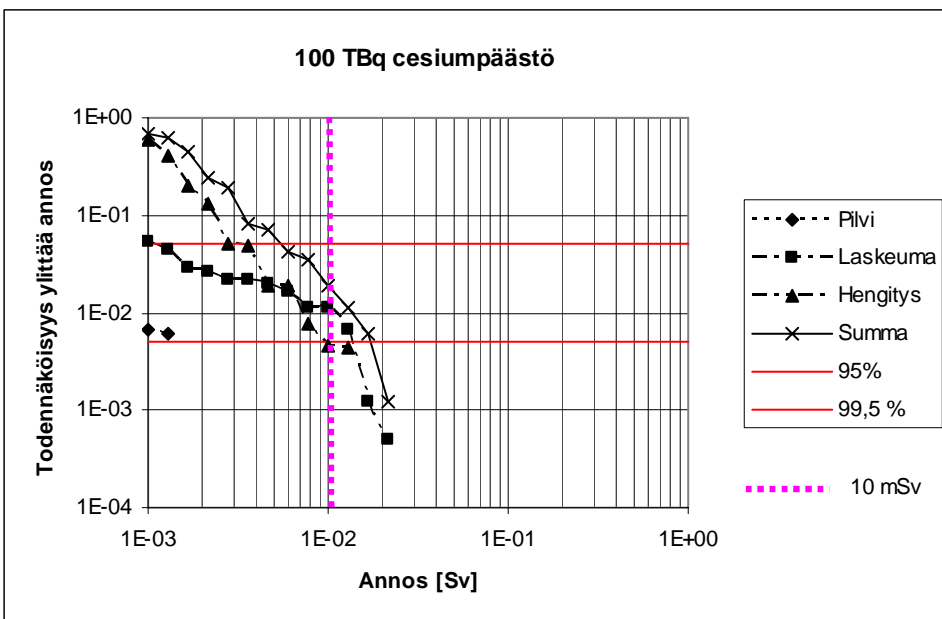
Kuva 19. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia, joka vastaa sisälle suojautumiselle asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



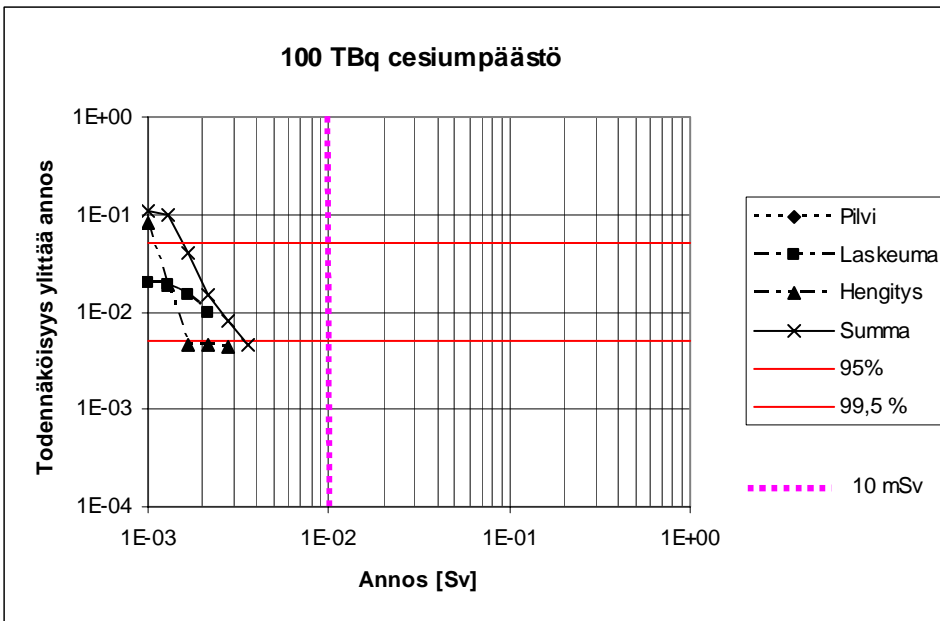
Kuva 20. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



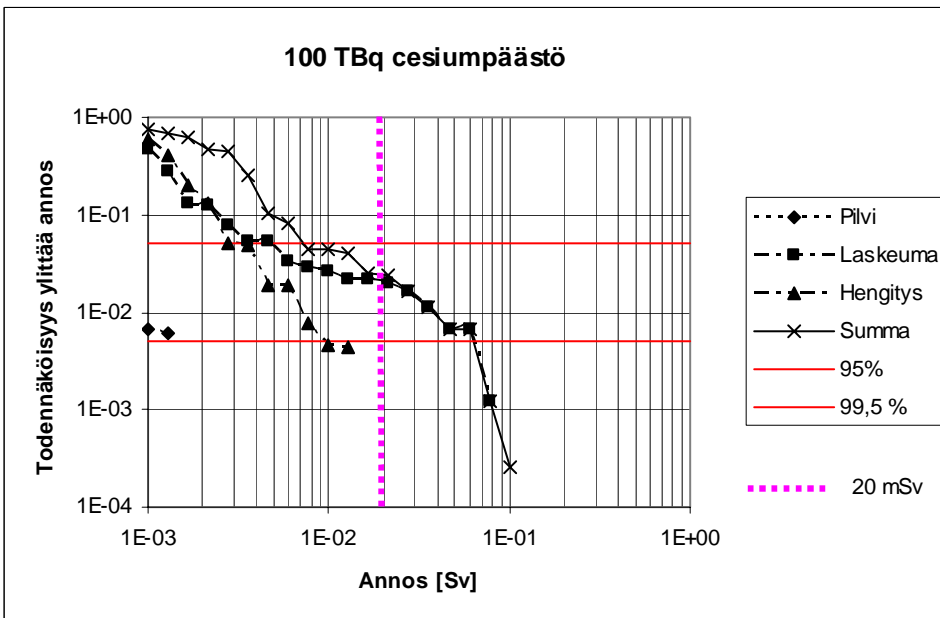
Kuva 21. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 1 tunti ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



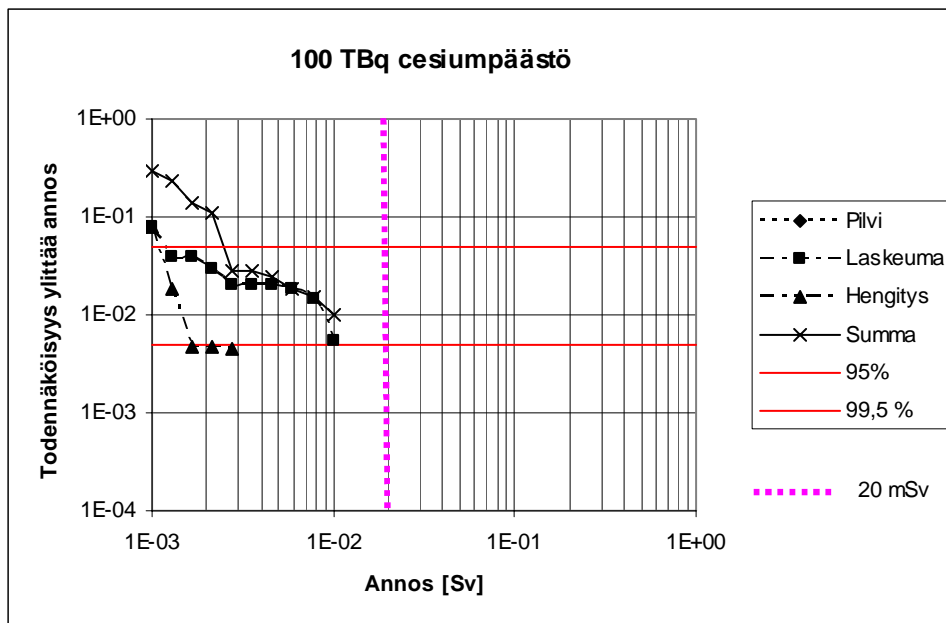
Kuva 22. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia, mikä on sisälle suojautumisen toimenpidetasorajan 10 mSv laskenta-aika.



Kuva 23. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 48 tuntia.



Kuva 24. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 1 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.



Kuva 25. Annosten komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma etäisyydellä 3 km. Päästön kesto 24 tuntia ja annoksen integrointi laskeumasta 1 viikko, joka vastaa evakuoinnille asetetun toimenpiderajan laskenta-aikaa.