

# Vakavan ydinvoimalaturman aiheuttamat säteilyseuraukset

H. Toivonen, J. Lahtinen, R. Pöllänen (toim.)



# Vakavan ydinvoimalaturman aiheuttamat säteilyseuraukset

H. Toivonen, J. Lahtinen, R. Pöllänen (toim.)

Tässä raporttisarjassa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 978-952-478-311-8 (nid.)

ISBN 978-952-478-312-5 (pdf)

ISSN 0781-1705

Elektroninen versio: <http://www.stuk.fi>

Edita Prima Oy, Helsinki 2011

Myynti:

STUK – Säteilyturvakeskus

PL 14, 00881 Helsinki

Puh. (09) 759 881

Faksi (09) 759 88500

*TOIVONEN Harri, LAHTINEN Juhani, PÖLLÄNEN Roy (toim.). Vakavan ydinvoimalaturman aiheuttamat säteilyseuraukset. STUK-A228. Helsinki 2011. 243 s.*

**Avainsanat:** Ydinvoimalaonnettomuus, säteilyseuraukset, suojautuminen

## Tiivistelmä

Vuonna 1993 Säteilyturvakeskus (STUK) laati selvityksen, jossa kartoitettiin erilaisia säteilyyn liittyviä uhkakuvia ja arvioitiin niistä aiheutuvia seurauksia. Selvitystä päivitettiin v. 2004–2008. Tämä tutkimusraportti perustuu tuon selvityksen ydinvoimalaonnettomuuksia käsittelevään osaan. Tarkastelun kohteena on kuusi Suomessa ja lähialueilla sijaitsevaa voimalaitosta, joissa tapahtuvan vakavan onnettomuuden seurauksia (kahden vuorokauden aikana) on arvioitu eräissä Suomen kaupungeissa (laitoksesta riippuen Helsinki, Turku, Kotka, Oulu).

Todennäköisyyspohjaisia tarkasteluja ei ole tehty, vaan on oletettu, että tapahtuu Tshernobyl-turman suuruusluokkaa oleva päästö ja että puolet kokonaispäästön radioaktiivisista aineista vapautuvat hyvin nopeasti. Päästön aikainen säätila on oletettu epäsuotuisaksi.

Selvityksen perusteella voidaan tehdä mm. seuraavat johtopäätökset:

- Radioaktiivinen jodi aiheuttaa kaikissa tarkastelluissa tapauksissa suurimman säteilyvaaran onnettomuuden alkuvaiheessa kahden vuorokauden aikana.
- Hengityksen kautta saatava sisäisen säteilyn annos suojaamattomalle henkilölle on huomattavasti suurempi kuin ulkoisesta säteilystä aiheutuva annos.
- Ulkomainen ydinvoimalaturma ei aiheuta Suomessa missään olosuhteissa akuuttia säteilynsairautta. Kaukolaskeumassa ei liioin ole sellaisia ydinpolttoainehiukkasia, jotka voisivat aiheuttaa lyhyessä ajassa iholla tai hengitysteissä palovammaa muistuttavia vaurioita.
- Tehokas lyhytaikainen suojautuminen (joditabletin ottaminen, siirtyminen hyvään väestönsuojaan tai evakuointi ennen radioaktiivisen pilven tuloa) voi olla tarpeen kotimaisen ydinvoimalaturman varalta niillä alueilla, jotka sijaitsevat alle 20 kilometrin päässä voimalasta. Kauempana ovat sisälle suojautuminen ja joditabletin ottaminen riittäviä suojatoimia.
- Ulkomailla sattuva ydinvoimalaturma ei vaaranna Suomen vesihuoltoa.

Sen sijaan elintarviketuotanto voi vaarantua tuhansien neliökilometrien alueella.

- Sisälle suojautuminen ja joditabletin ottaminen ovat keskeisiä vastatoimia äkillisen säteilyvaaran uhatessa. Hälytys ja suojaustoimet on hoidettava siten, että radioaktiivinen pilvi ei tavoita ihmisiä ulkosalla. Joditablettien saatavuudesta on huolehdittava etukäteen.

*TOIVONEN Harri, LAHTINEN Juhani, PÖLLÄNEN Roy (Eds.). Consequences of a severe nuclear power plant accident. STUK-A228. Helsinki 2011. 243 pp.*

**Key words:** Nuclear power plant accident, radiological consequences, protection

## Abstract

In 1993 Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) prepared an unpublished study aiming to give the radiation monitoring authorities background information on various nuclear and radiological threats and their consequences. The contents of the study report were partly updated during 2004–2008. This report is based on the sections related to nuclear power plant accidents. Consequences (during the two first days) of severe accidents at six nuclear power plants located either in Finland or close to the borders were estimated at certain major Finnish population centres (Helsinki, Turku, Kotka or Oulu, depending on the plant in question).

A deterministic approach instead of a probabilistic one was adopted as a basis of the work. All releases to the atmosphere were assumed to be large (of the order of those observed in Chernobyl) and the weather conditions were taken to be unfavourable.

The following conclusions (among others) can be made:

- During the two first days radioactive iodine constitutes the most significant hazard.
- For an unprotected person the internal dose through inhalation is much larger than the external doses in all cases studied.
- An accident at a foreign nuclear power plant does not cause acute health effects (radiation sickness or burns) in Finland.
- In case of accidents at domestic power plants urgent short-term counter-measures (iodine prophylaxis, moving to civil defence shelters, evacuation before plume arrival) implemented in an efficient manner may be needed in areas closest to the site (up to about 20 km). At greater distances normal sheltering inside and iodine prophylaxis are sufficient.
- An accident at a foreign nuclear power plant does not endanger the Finnish water supply system. However, large areas (even thousands of square kilometres) could be contaminated to the extent that restrictions and bans

are needed for food production.

- Sheltering inside and administration of stable iodine are the essential countermeasures in managing acute radiation situations. Alarming people and all protective measures should be implemented effectively in order to keep individuals from being out-of-doors at the time of plume arrival. Arrangements for providing public with stable iodine must be established beforehand.



# Sisällys

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ESIPUHE	11
1 JOHDANTO	14
Viiteluettelo	14
2 RADIOAKTIIVISTEN AINEIDEN VAPAUTUMINEN YDINVOIMALATURMASSA	16
2.1 Onnettomuustapausten yleisiä piirteitä	16
2.2 Tarkasteltavat ydinvoimalaitokset	17
2.3 Lähde-terminit laitostyyppittäin	17
Viiteluettelo	22
LIITE I Radionuklidiryhmien päästösuusjakaumat Sequoyah (PWR), Grand Gulf (BWR) ja Peach Bottom (BWR) –laitoksille	23
LIITE II Vertailu NRC:n arvoihin	25
3 EPÄSUOTUISEN SÄÄN MÄÄRITTELY	28
3.1 Taustaa	28
3.2 Tuulen nopeus	28
3.3 Pystysuuntainen laimeneminen	29
3.4 Horisontaalinen laimeneminen	29
Viiteluettelo	30
4 YDINVOIMALATURMAN VÄLITTÖMÄT SÄTEILYSEURAUKSET	34
4.1 Yleistä	34
4.2 Inventaarit ja vapautumisosuudet	34
4.3 Leviäminen ilmakehässä	36
4.4 Annos- ja pitoisuuslaskenta	39
4.5 Säteilyvaikutukset	40
4.6 Päätelmiä ja tulosten tarkastelua	46
4.7 Ydinpolttoainehiukkaset - ominaisuudet, kulkeutuminen ja säteilyannos	47
Viiteluettelo	52

	LIITE I Laskujen perustana käytetyt eri reaktorityyppien referenssi-inventaarit	53
	LIITE II Loviisa ⇒ Helsinki	56
	LIITE III Olkiluoto ⇒ Turku	78
	LIITE IV Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki	100
	LIITE V Sosnovyi Bor ⇒ Kotka	122
	LIITE VI Ignalina ⇒ Helsinki	144
	LIITE VII Kuola ⇒ Oulu	156
	LIITE VIII Forsmark ⇒ Turku	168
5	LASKEUMAN PITKÄAIKAISSEURAUKSET	192
5.1	Annosnopeus pitkällä aikavälillä	192
5.1.1	Laskeuman käyttäytyminen maaperässä	192
5.1.2	Annosnopeuden laskenta	192
5.1.3	Annos 50 vuoden aikana	194
5.2	Juomavesi	196
5.3	Elintarvikkeet	199
5.3.1	Mittauksen ja ennusteiden alkuperä	199
5.3.2	Laskeumanuklidien kertyminen elintarvikkeisiin	199
5.3.3	Radionuklidipitoisuuksien vaihtelu elintarvikkeissa	200
5.3.4	Maataloustuotteet	201
5.3.5	Esimerkki alueellisen laskeuman vaikutuksista maitoon	202
5.3.6	Järvikala	203
5.4	Terveysvaikutukset	206
	Viiteluettelo	211
6	JODI JA YDINVOIMALATURMA	216
6.1	Havaintoja Windsclen ja Tshernobylin onnettomuuksista	216
6.2	Ekstrapolointia Sosnovyi Borin tapauksesta	219
6.3	Suojautumiskriteerit	219
	Viiteluettelo	220
7	SUOJAUTUMINEN LASKEUMATILANTEESSA	224
7.1	Suojautumiseen käytettävissä oleva varoaika	224
7.2	Suojautuminen ja ulkoisen säteilyn annosnopeus	225
7.3	Suojautuminen sisälle	229
7.4	Suojautumisen annosvaikutukset	233
7.5	Pitkäaikaisvaikutukset	236
	Viiteluettelo	239

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

242



## Esipuhe

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen on Suomeen rakennettu erittäin kattava valtakunnallinen säteilyvalvontajärjestelmä. Ulkoisen säteilyn annosnopeutta mitataan kymmenen minuutin välein koko valtakunnassa yli kahdellasadalla paikkakunnalla. Tulokset siirretään tietoturvallisesti viranomaisten yhteiseen tietokantaan tilannekuvaa varten. Lisäksi sekä Olkiluodon että Loviisan ydinvoimalaitosten ympärillä on spektrometrinen viranomaisverkko, joka kykenee tunnistamaan ympäristöön päässeet radioaktiiviset aineet. Jalokaasut (Xe) ja kaikkein helpoimmin höyrystyvät aineet (I, Te, Cs,) vapautuvat ensimmäisinä ylikuumenesta ydinpolttoaineesta. Tällainen päästö tuli Fukushima ydinturmasta.

Mittausjärjestelmien lisäksi tarvitaan kyky ennustaa oikein säteilyvaaran kehittyminen. Tätä varten on Ilmatieteen laitoksen ja Säteilyturvakeskuksen yhteistyönä kehitetty leviämismalleja ja laskentatulosten hallintajärjestelmä, joka kykenee välittämään ennusteen viranomaisten käyttöön. Leviämislaskennan keinoin tunnistetaan suurimman säteilyvaaran alue ja saadaan arvio säteilyvaarasta väestölle (annoslaskenta). Vaarallinen alue voidaan ennustaa kohtuullisen tarkoin, sillä siihen vaikuttaa pääasiassa vain säätilanne ja päästön ajankohta. Sen sijaan on erittäin hankalaa saada luotettavaa tietoa päästön koostumuksesta ja suuruudesta ajan funktiona. Annoslaskentamallille joudutaankin usein antamaan vain karkeita päästöarvioita, joiden luotettavuus voi olla vähäinen - edes suuruusluokan osalta.

Säteilyvaaran oikea arviointi vaatii monenlaista analyysiä. Säteilyasiantuntija joutuu onnettomuuden jälkimainingeissa käsittelemään suuren määrän tietoa, josta osa on faktaa, osa epävarmaa, osa jopa virheellistä tai vain skenaariotyypistä pohdintaa. Missään tapauksessa yksikään tietokoneohjelma ei osaa kertoa täydellisesti mitä tapahtui tai mitä tapahtuu, saati että osaisi arvioida luotettavasti onnettomuuden jälkiseurausten terveydellisiä, yhteiskunnallisia tai taloudellisia seurauksia. Erityisesti mallien tuottamaan tulokseen täytyy suhtautua kriittisesti. Asiantuntijan on osattava itse tehdä ilman tietokoneita suuruusluokkatason laskelmia, joilla joko varmennetaan tai kiistetään operatiivisten laskentatulosten oikeellisuus.

Tämä julkaisu antaa taustatiedot tietokonejärjestelmistä riippumattomien annoslaskelmien tekemiseksi ydinreaktoripäästön aiheuttamassa säteilyvaaratilanteessa. Työ on tehty Säteilyturvakeskuksessa ja Ilmatieteen laitoksessa vuosina 1992 - 1993. Säteilyturvakeskus on nyt koonnut analyysit yhtenäiseksi raportiksi helpottamaan kaikkien niiden työtä, joiden on osattava arvioida milloin säteily on vaarallista.



# 1 Johdanto

H. Toivonen, J. Lahtinen, R. Pöllänen

# 1 Johdanto

Vuonna 1993 Säteilyturvakeskus (STUK) laati viranomais selvityksen, jossa tutkittiin erilaisia säteilyyn liittyviä uhkia ja niistä mahdollisesti aiheutuvia seurauksia. Selvitystä on viime vuosina tietyin osin päivitetty. Tämä raportti perustuu kyseisen selvityksen ydinvoimalaitosonnettomuuksia käsittelevään kohtaan, jonka tietoja ei ole aiemmin kokonaisuudessaan julkaistu. Tietoja on kuitenkin käytetty tai niihin on viitattu lukuisia kertoja sekä STUKin että muiden säteilyvalvontaviranomaisten esitelmissä ja koulutustilaisuuksissa ja myös eräissä muissa raporteissa<sup>1</sup> ja artikkeleissa<sup>2</sup>.

Päätarkoituksena oli arvioida Suomen ja lähialueen ydinvoimalaitoksien vakavien onnettomuuksien seurauksia eräissä Suomen asutuskeskuk-sissa. Tarkastelussa mukana olevat ydinvoimalaitokset ja kohdepaikkakunnat (suluissa) ovat Loviisa (Helsinki), Olkiluoto (Turku), Ruotsin Forsmark (Turku), Venäjän Sosnovyi Bor (Kotka, Helsinki) ja Kuola (Oulu) sekä Liettuan (nyt jo suljettu) Ignalina (Helsinki). Todennäköisyyspohjaisia tarkasteluja ei ole tehty, vaan radionuklidien päästöt on analyseissa oletettu hyvin suuriksi (Tshernobyl-turman suuruusluokkaa oleviksi) nopeasti tapahtuviksi ja säätila epäsuotuisaksi. Tulosten voidaan katsoa edustavan lähes pahimpia kuvitelta-vissa olevia seurauksia mainituilla paikkakunnilla. Suuri arvo analyseista on kuitenkin säteilyasiantuntijalle, joka voi taulukoiden kautta kytkeä päästön ja sen seuraukset toisiinsa.

Raportti on jaettu lukuihin, joista jotkut muodostavat sinällään itsenäisen kokonaisuuden. Lukujen lopussa on viiteluettelo ja kyseiseen lukuun liittyvät liitteet. Kirjoittajat ovat Säteilyturvakeskuksen asiantuntijoita. Säätilanteen on kuitenkin laatinut Ilmatieteen laitos.

## Viiteluettelo

1. Lahtinen J, Toivonen H, Pöllänen R, Nordlund G. A hypothetical severe reactor accident in Sosnovyy Bor, Russia: Short-term radiological consequences in Southern Finland. STUK-A113. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1993.
2. Toivonen H, Lahtinen J. Äkillinen säteilyvaara – uhka ihmiselle ja terveydelle. Suomen Lääkärilehti (1994) 49; 700–706.



## **2 Radioaktiivisten aineiden vapautuminen ydinvoimalaturmassa**

R. Pöllänen, R. Paltemaa

## 2 Radioaktiivisten aineiden vapautuminen ydinvoimalaturmassa

### 2.1 Onnettomuustapausten yleisiä piirteitä

Ydinvoimalaturmalla tarkoitetaan tässä yhteydessä sellaista reaktorionnettomuutta, joka johtaa radioaktiivisten aineiden suureen vapautumiseen joko laitoksen ulkoisen tai sisäisen syyn takia. Ydinvoimalaitosonnettomuuksien kansainvälisellä vakavuusasteikolla onnettomuus kategorisoitaisiin luokkaan 7, ”erittäin vakava onnettomuus”.

Tarkasteltavat onnettomuustilanteet valitaan siten, että päästö on ”pahin mahdollinen” mutta kuitenkin päästösuuksiltaan perusteltavissa. Sydämen koko radionuklidi-inventaarin (eli reaktorin sydämessä olevien kaikkien radionuklidien) levittäminen ympäristöön antaisi vääristyneen kuvan päästön vaikutuksista, jolloin erityisesti vaikeasti höyrystyvien nuklidien vaikutus saataisi korostua aiheetta.

Ydinvoimalaitosten passiivisten ja aktiivisten turvallisuuspiirteiden ei oleteta olennaisesti vähentävän päästöä. Polttoaineesta vapautuvat radioaktiiviset aineet leviäisivät siis lähes esteittä ympäristöön. Kyseessä on suojarakennuksen ohittava onnettomuus, jossa radionuklidit joutuvat hapettaviin olosuhteisiin. Niinpä vapautumisosuudet ovat suuria. Vaikeasti höyrystyviä radionuklideja voi vapautua ympäristöön erittäin suuria määriä vain sellaisissa onnettomuuksissa, joissa polttoaineen sulamisen jälkeen tapahtuu polttoainetta hajottavia väkivaltaisia tapahtumia (esimerkiksi reaktiivisuusonnettomuus tai polttoaineen sirpaloitumisesta johtuva höyryräjähdys).

Onnettomuusskenaario vaikuttaa voimakkaasti päästön aikakäyttämiseen. Kun polttoaineen lämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi, helpohkosti höyrystyvät aineet voivat vapautua nopeasti. Nopean vapautumisen seurauksena muodostuu päästöpilvi, joka voi aiheuttaa suuria säteilyannoksia. Tässä työssä päästön oletetaan olevan sellainen, että ensimmäisen tunnin aikana vapautuu tasaisesti puolet koko vapautumisosuudesta; loppuosa vapautuu tasaisesti (radionuklidiryhmästä riippuen) seuraavien viiden, 11 tai 23 tunnin aikana. Päästön kokonaiskesto on siis 24 tuntia.

Radioaktiivisen pilven kulkeutumiseen ja leviämiseen vaikuttaa suuresti, kuinka korkealle voimalasta nouseva pilvi kohoaa. Nousukorkeus voidaan arvioida pilven energiasisällöstä. Käytännössä energiasisällön arvioiminen on hyvin vaikeaa, koska jälkilämpötehon lisäksi tapahtumaketjuun voi liittyä pilven energiasisältöä olennaisesti muuttavia suurienergisii ilmiöitä (esimerkiksi höyryräjähdys, vetytalo tai -räjähdys ja RBMK-reaktorin tapauksessa grafiitin palaminen).

Lähdetermiarviot ovat erittäin karkeita. Todellista tietoa katastrofitilanteiden päästöistä on vain yhdestä tapauksesta – Tshernobylin turmasta. Kevytvesireaktoreissa ei ole tapahtunut erittäin vakavia onnettomuuksia. Niinpä lähdetermin arviointi perustuu suurimmalta osin arvioihin eri tapahtumien todennäköisyyksistä sekä erillisilmiöistä tehtyihin kokeisiin ja analyysihin (polttoaineen sulaminen, vedyn palaminen, korkeapaineinen sydänsulapurkaus, sydänsula-betoni ja sydänsula-vesi -vuorovaikutus jne).

Päästön suuruuteen vaikuttaa olennaisesti laitoksen sisäiset ns. luonnolliset pidättymismekanismit. Arvioitaessa ympäristöön pääsevien radionuklidien maksimimäärää ei kuitenkaan voida täysin sulkea pois sellaisia potentiaalisia – joskin hyvin epätodennäköisiä – tapahtumia, joissa radionuklidien kulkeutumisen kannalta passiivisetkin turvallisuuspiirteet ohitetaan. Tällaisia tapahtumia voivat olla mm. suuren liikennelentokoneen tai pommin osuminen voimalaitokseen.

## 2.2 Tarkasteltavat ydinvoimalaitokset

Taulukkoon 2.1 on koottu eräitä tietoja analyysissä tarkastelluista ydinvoimalaitoksista. Kyseeseen tulevat lähimmät Suomen rajojen ulkopuolella sijaitsevat laitokset<sup>a</sup> sekä myös kotimaiset voimalat. Lähdetermejä tarkastellaan reaktortyypeittäin ryhmiteltyinä. Radionuklidien inventaaria koskevat tiedot ovat luvun 4 liitteessä I.

## 2.3 Lähdetermin laitostyypeittäin

### **RBMK-laitokset (Sosnovyi Bor, Ignalina)**

Tshernobylin onnettomuudessa päästö tapahtui kymmenen päivän aikana. Ensimmäisen päivän aikana ympäristöön vapautui noin 25 % kokonaispäästöistä, mutta muutoin päästö jakautui varsin tasaisesti eri päiville. Sosnovyi Borin ydinvoimalaonnettomuuden analyysissä<sup>1</sup> lähdeterminä käytettiin taulukossa 2.2 esitettyä päästöä jakautuneena kokonaan ensimmäiselle vuorokaudelle.

Taulukossa 2.2 esitetyt päästöarviot<sup>2</sup> perustuvat neuvostoliittolaisten antamiin arvioihin. Muissa maissa on tehty ympäristömittausten perusteella päästöarvioita, joiden tulokset ovat likipitäen yhtäpitäviä taulukon 2.2 kanssa.

---

<sup>a</sup> Mukana on nyttemmin jo suljettu Ignalinan voimala Liettuassa.

Uudemmat vapautumista koskevat arviot<sup>3</sup> ovat osoittaneet, että todellinen päästö on ollutkin eräiden nuklidien tapauksessa suurempi kuin mitä taulukko 2.2 antaa ymmärtää. Taulukossa 2.3 on esitetty ko. arvioiden tuloksia sekä verrattu päästöosuuksia WASH-1400-raportissa spekuloituihin päästöosuuksiin ja Windscalen onnettomuuden päästöosuuksiin.

Päästöpilven nousukorkeus oli Tshernobylin onnettomuudessa noin 300–1500 m ja eräiden arvioiden mukaan jopa tätäkin korkeampi. Nousukorkeus voitaisiin arvioida teoreettisesti vapautuneesta lämpöenergiasta, mutta sen arviointi on hankalaa; esimerkiksi Tshernobyl-tapauksessa jälkilämpö heti pikasulun jälkeen on noin 180 MW<sup>5</sup>.

**Taulukko 2.1.** Analyysissä tarkasteltavat laitokset. Loviisan ja Olkiluodon laitosten sähkötehoa on nostettu; aiemmin sähkötehot olivat 465 MW ja 735 MW.

Laitos	Reaktorityyppi	Käyttöaika	Sähköteho (MW)	Terminen teho (MW)	Pa.massa (Kg U)
Sosn. Bor 1	RBMK	1973→	1000	3200	192000
Sosn. Bor 2	RBMK	1975→	1000	3200	192000
Sosn. Bor 3	RBMK	1979→	1000	3200	192000
Sosn. Bor 4	RBMK	1989→	1000	3200	192000
Ignalina 1	RBMK	1985–2004	1500	4800	192000
Ignalina 2	RBMK	1987→	1500	4800	192000
Kuola 1	VVER-440	1973→	440	1375	37500
Kuola 2	VVER-440	1974→	440	1375	37500
Kuola 3	VVER-440	1981→	440	1375	37500
Kuola 4	VVER-440	1984→	440	1375	37500
Loviisa 1	VVER-440	1977→	488	1500	37500
Loviisa 2	VVER-440	1980→	488	1500	37500
Olkiluoto 1	BWR	1978→	840	2500	88000
Olkiluoto 2	BWR	1980→	840	2500	88000
Forsmark 1	BWR	1981→	1006	2928	122000
Forsmark 2	BWR	1981→	1006	2928	122000
Forsmark 3	BWR	1985→	1200	3300	126000

**Taulukko 2.2.** Tärkeimpien radionuklidien päästö Tshernobylin ydinvoimalasta ensimmäisen vuorokauden aikana, kokonaisuudessaan (10 d; 26.4.–6.5.1986) sekä prosenttiosuutena inventaarista.<sup>2</sup> 1 MCi =  $3.7 \times 10^{16}$  Bq.

Nuclide**	Activity of release (MCi)		Core activity release
	4/26/86	5/6/86***	up to 5/6/86 (%)
Xe-133	5	45	Possibly up to 100
Kr-85m	0,15	–	Possibly up to 100
Kr-85	–	0,5	Possibly up to 100
I-131	4,5	7,3	20
Te-132	4	1,3	15
Cs-134	0,15	0,5	10
Cs-137	0,3	1	13
Mo-99	0,45	3	2,3
Zr-95	0,45	3,8	3,2
Ru-103	0,6	3,2	2,9
Ru-106	0,2	1,6	2,9
Ba-140	0,5	4,3	5,6
Ce-141	0,4	2,8	2,3
Ce-144	0,45	2,4	2,8
Sr-89	0,25	2,2	4,0
Sr-90	0,015	0,22	4,0
Np-239	2,7	1,2	3,2
Pu-238	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-3}$	3,0
Pu-239	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,7 \times 10^{-3}$	3,0
Pu-240	$0,2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	3,0
Pu-241	0,02	0,14	3,0
Pu-242	$0,3 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	3,0
Cm-242	$3 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$	3,0

Error of estimate: +/- 50 %

\*\* The data presented relate to the activity of the main radionuclides measured on radiometric analyses.

\*\*\* Total discharge up to May 6, 1986 – after April 26, 1986

Source: USSR, 1986, Table 4.14

Tässä työssä valitaan RBMK-reaktoreiden päästö taulukkoa 2.3 mukailleen (taulukko 2.4). Koko päästön oletetaan tapahtuvan yhden vuorokauden aikana.

### VVER-440 -laitokset (Loviisa, Kuola)

Vakavien reaktorionnettomuuksien kannalta Loviisan ja Kuolan laitosten pääasiallinen ero on se, että Kuolan laitoksilta puuttuu kunnollinen suojarakennus (Kuolan kahdella uusimmalla laitoksella on lauhdutusaltaisiin ja osas-

**Taulukko 2.3.** Tshernobyl-onnettomuuden päästöosuudet<sup>3</sup> verrattuna WASH-1400 -raportin<sup>4</sup> sekä Windscalen onnettomuuden päästöosuuksiin. Virhearvio on noin  $\pm 40$  %.

Chemical Group	Tracers	Chernobyl (%)	WASH-1400 (%)		Windscale (%)
			Range	Best estimate	
Noble Gases <sup>(a)</sup>	<sup>133</sup> Xe	> 90,0	50–100	90	100,0
Halogens <sup>(b)</sup>	<sup>131</sup> I, <sup>133</sup> I	60,0	50–100	90	20,0
Alkali Metals <sup>(c)</sup>	<sup>134</sup> Cs, <sup>136</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs	40,0	40–90	80	20,0
Tellurium Group <sup>(d)</sup>	<sup>132</sup> Te	10,0	5–25	15	20,0 <sup>(i)</sup>
Alkaline Earths <sup>(e)</sup>	<sup>140</sup> Ba	0,8	2–20	10	0,2
Noble Metals <sup>(f)</sup>	<sup>103</sup> Ru, <sup>106</sup> Ru	0,7	1–10	3	2,0 <sup>(i)</sup>
Rare Earths <sup>(g)</sup>	<sup>141</sup> Ce, <sup>144</sup> Ce	0,2	0,01–1	0,3	0,2
Refractory Oxides <sup>(h)</sup>	<sup>95</sup> Zr	0,2	0,01–1	0,3	0,2

<sup>(a)</sup> Xe, Kr; <sup>(b)</sup> I, Br; <sup>(c)</sup> Cs, Rb; <sup>(d)</sup> Te, Se, Sb; <sup>(e)</sup> Ba, Sr; <sup>(f)</sup> Includes Ru, Rh, Pd, Mo, Tc; <sup>(g)</sup> Includes Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Np, Pu, Cm; <sup>(h)</sup> Zr, Nb; <sup>(i)</sup> Sb was estimated at 0,2 % (Clarke 1974); <sup>(j)</sup> Rh and Pd were estimated at 0,2 % (Clarke 1974).

**Taulukko 2.4.** Sosnovyi Borin ydinvoimalaitoksesta vapautuvat radionuklidit hypoteettisessa ydinvoimalaturmassa. Sarakkeessa "vapautumisen kesto" olevat luvut "1 + i, i = 5, 11, 23" tarkoittavat, että ensimmäisen tunnin aikana vapautuu tasaisesti puolet koko vapautumisosuudesta, loput vapautuvat i:n tunnin aikana tasaisesti. Päästön kestot ovat siis 6, 12 ja 24 tuntia. Ignalinan laitoksilla vapautumisosuudet ovat samat, mutta nousukorkeutena tarkastellaan vain korkeutta 500 m.

Radionuklidiryhmä	Vapautumisosuus (%)	Vapautumisen kesto (h)	Nousukorkeudet (m)
Jalokaasut	100	1 + 5	100, 500
I	60	1 + 11	100, 500
Cs	40	1 + 11	100, 500
Te	10	1 + 11	100, 500
Muut	1	1 + 23	100, 500

tointiin perustuva suojausjärjestelmä). Hyvä suojarakennus saattaa, lievästi vahingoittuneenakin, pidättää merkittävän osan primääripiiristä vapautuvista radionuklideista. Tässä päästöarviossa suojarakennus kuitenkin ohiteetaan, joten päästöosuudet ovat samat molemmille laitoksille. Kuolan laitosten aktiivisuusinventaaari oletetaan samaksi kuin Loviisan laitoksilla ennen tehonkorotusta. Jälkilämpöteho heti pikasulun jälkeen on noin 90 MW ja tunnin kuluttua siitä noin 17 MW.

Tässä tutkimuksessa on päädytty käyttämään NUREG-1150 -raportissa<sup>6</sup> arvioituja päästöosuuksia tapauksissa, joissa jäälauhdutinsuojarakennus rikkoutuu tai ohittuu onnettomuuden aikaisessa vaiheessa. Viitteessä 6 on laskettu kunkin radionuklidiryhmän frekvenssijakaumat päästöosuuden

funktiona, joista tähän tutkimukseen valittiin 95 %:n arvot päästösuuksiksi (eli 95 % frekvenssijakauman arvoista on valitun arvon alapuolella).

NUREG-1150 perustuu laajoihin tutkimuksiin, laskuihin ja asiantuntija-arvioihin, mutta siltikin päästösuuksien analyysiprosessiin sisältyy runsaasti epävarmuuksia. Lisäksi amerikkalaiset laitokset poikkeavat tässä analyysissä tarkastelluista laitoksista. Niissä onnettomuustyypeissä, joissa radioaktiiviset aineet pääsevät vapautumaan suoraan ympäristöön, laitoksen rakenne vaikuttaa kuitenkin enää vähän päästöön. Viime kädessä, ”täydellisen tuhon sattuessa”, radionuklidien päästö riippuu lähinnä radionuklidi-inventaarista eikä enää lainkaan rakenteista.

Liitteessä I on esimerkkinä Sequoyah-laitoksen päästösuudet. Vaikka NUREG-1150:n tarkasteluissa otetaan huomioon radionuklidien pidättyminen päästöreitien varteen, vastannee tämä kohtuudella Loviisan reaktorikuopan murtumiseen johtavan onnettomuuden päästöä. Oletetut vapautumisosuudet VVER-laitoksille on esitetty taulukossa 2.5.

Tässä yhteydessä on huomattava, että eri voimalatyypeissä tapahtuneita turmia ja niiden aiheuttamia seuraamuksia ei voi suoraan verrata toisiinsa, sillä mm. vapautumisosuudet ja radionuklidi-inventaarit eivät ole samoja (liite II). Lisäksi tarkkoja arvioita oletetunlaisten päästöjen todennäköisyydelle ei ole olemassa. Kvalitatiivisesti voidaan kuitenkin arvioida, että erittäin vakavan onnettomuuden todennäköisyys on Loviisan, Olkiluodon ja Forsmarkin laitoksilla paljon pienempi kuin Sosnovyi Borin laitoksilla ja Sosnovyi Borissa taas selvästi pienempi kuin RBMK-laitoksilla ennen parannuksia, jotka on tehty Tshernobylin onnettomuuden jälkeen.

**Taulukko 2.5.** Loviisan ja Kuolan ydinvoimalaitoksille oletetut päästösuudet. Sarakkeessa ”vapautumisen kesto” olevat luvut, esimerkiksi 1 + 5, tarkoittavat, että ensimmäisen tunnin aikana vapautuu tasaisesti puolet koko vapautumisosuudesta, loput vapautuvat 5 tunnin aikana tasaisesti. Päästön kestot ovat siis 6, 12 ja 24 tuntia. Kuolan laitoksille nousukorkeutena tarkastellaan vain korkeutta 500 m.

Radionuklidiryhmä	Vapautumisosuus (%)	Vapautumisen kesto (h)	Nousukorkeudet (m)
Jalokaasut	100	1 + 5	100, 500
I, Cs	35	1 + 11	100, 500
Te	20	1 + 11	100, 500
Ba, Sr, Ru	3	1 + 23	100, 500
La, Ce	1	1 + 23	100, 500

### ABB-BWR -laitokset (Olkiluoto, Forsmark)

Lähdeterminit prosenttiosuutena inventaarista ovat samat molemmille laitospaikoille. Olkiluodon laitosten jälkilämpöteho heti pikasulun jälkeen on noin 160 MW ja tunnin kuluttua pikasulusta noin 46 MW.

Myös tässä tapauksessa käytetään NUREG-1150:n analyyseistä johdettuja päästösuuksia. Osuudet otettiin Peach Bottom ja Grand Gulf -kiehutusvesilaitosten päästösuuksien frekvenssijakaumista (liite I); päästösuuksiksi valittiin suurempi kahdesta arvosta (taulukko 2.6).

**Taulukko 2.6.** Radionuklidiryhmien päästösuudet Olkiluodon ja Forsmarkin laitoksille. Sarakkeessa "vapautumisen kesto" oleva merkintä "1 + i, i = 5,11,23" tarkoittaa, että ensimmäisen tunnin aikana vapautuu tasaisesti puolet koko vapautumisosuudesta, loput vapautuvat i:n tunnin aikana tasaisesti. Päästön kestot ovat siis 6, 12 ja 24 tuntia.

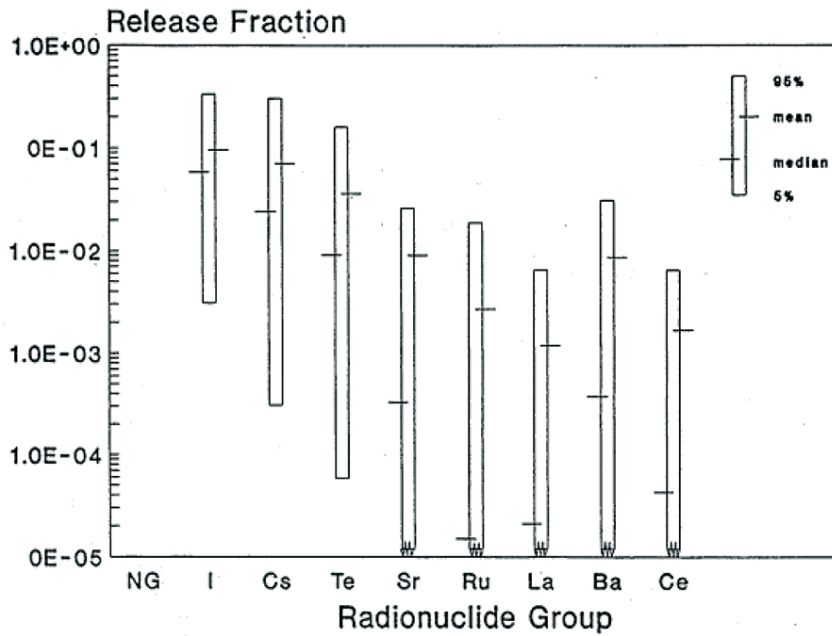
Radionuklidiryhmä	Vapautumisosuus (%)	Vapautumisen kesto (h)	Nousukorkeudet (m)
Jalokaasut	100	1 + 5	100, 500
I	45	1 + 11	100, 500
Cs	15	1 + 11	100, 500
Te, Ba, Sr	5	1 + 23	100, 500
Ru, La, Ce	1	1 + 23	100, 500

### Viiteluettelo

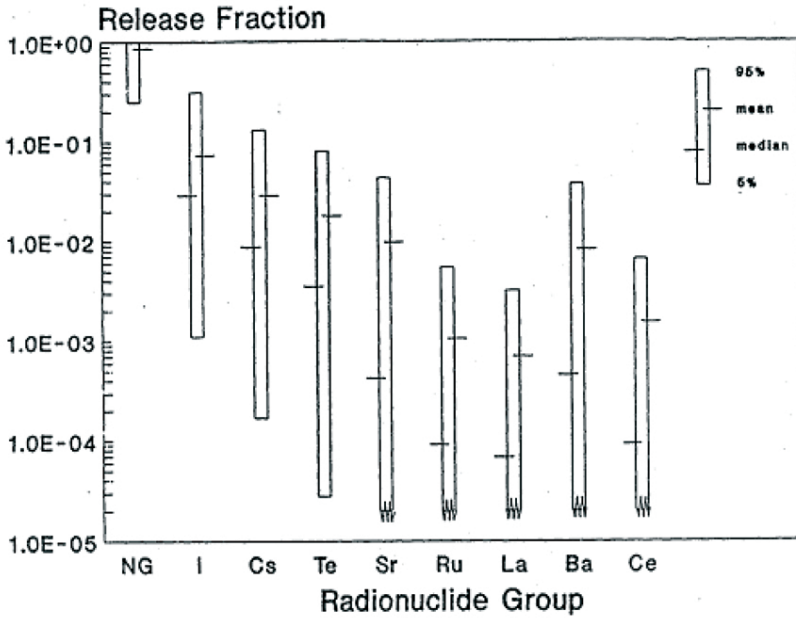
1. Hentelä R, Hänninen R. Selvitys toiminnasta äkillisessä säteilyvaaratilanteessa. Lyhennelmä Suomen Väestönsuojelujärjestön tilaamasta tutkimuksesta. Helsinki 1990.
2. Report on the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station. NUREG-1250, Rev. 1. U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1987.
3. Gudiksen PH et al. Health Physics 1989; 57 (5).
4. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014); 1975.
5. Anttila A. RBMK-reaktorin ydinpolttoaineen aktiivisuussisältö. VTT-YDI; Espoo 1986.
6. Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants. NUREG-1150 Vol. 1–3. U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1990.



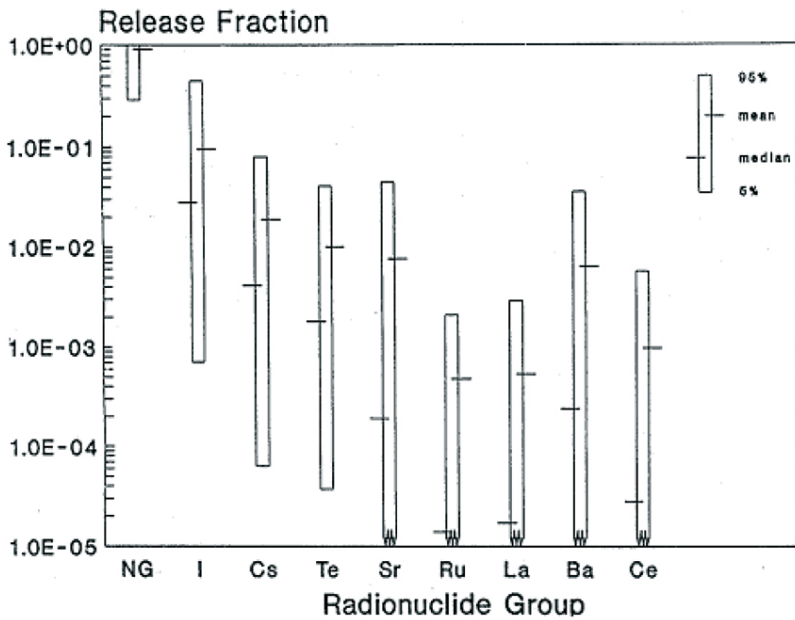
# LIITE I. Radionuklidiryhmien päästösuusjakaumat Sequoyah (PWR), Grand Gulf (BWR) ja Peach Bottom (BWR) –laitoksille



Source term distributions for early containment failure at Sequoyah



Source term distributions for early containment failure with drywell failed and sprays unavailable at Grand Gulf.



Peach Bottom

## LIITE II. Vertailu NRC:n arvoihin

### Valitun lähdetermin vertailu NRC:n arvoihin

Tässä tutkimuksessa PWR-, BWR- ja RBMK-laitoksille arvioidut päästösuudet eroavat jonkin verran toisistaan (taulukko 1). NRC:n arvio on saatu VTT:ltä ja päästösuudet perustuvat NRC:n ns. CSARP-tutkimusohjelman seuranta-kokouksessa pidettyyn esitelmään (Revised Accident Source Terms, USNRC, Bethesda May 6, 1992) suojarakennuksen mitoitusta varten käytettävistä lähdetermeistä.

**Taulukko 1.** BWR ja RBMK-reaktoreiden vapautumisosuuksien suhde PWR:n vapautumisosuuksiin nuklidiryhmittäin (S.Vuori, J.Rossi).

Nuklidiryhmä	BWR/PWR		RBMK/PWR
	STUK	NRC	STUK
Jalokaasut	1	1	1
Jodi	1,29	0,93	1,71
Cesium	0,43	0,94	1,14
Telluuri	0,25	1,08	0,5
Strontium	1,67	1,79	0,33
Barium	1,67	1,72	0,33
Ruteeni	0,33	0,92	0,33
Cerium	1	0,63	1
Lantaani	1	0,70	1



# 3 Epäsuotuisen sään määrittely

G. Nordlund

## 3 Epäsuotuisen sään määrittely

### 3.1 Taustaa

Ydinvoimalaitosonnettomuuden kaukovaikutukset riippuvat ratkaisevasti vallitsevasta säätilasta. Onnettomuuspaikalla vallitsevan ilmavirtauksen suunnalla ja nopeudella on ratkaisevin merkitys tarkasteltaessa onnettomuudesta tietyssä kohdepaikassa aiheutuvia vaikutuksia, mutta myös muut säätekijät ovat tärkeitä. Radioaktiivisten aineiden pitoisuuksien kannalta epäsuotuisimman säätilanteen etsiminen tarkoittaa sellaisen säätilanteen hakemista, jossa vaikutukset ovat tapahtuman alkuvaiheessa tietyssä paikassa suurimmat.

Epäsuotuisin sää voidaan parhaiten määrittää siten, että lasketaan pitkän ajanjakson yli esiintyvien eri säätilanteiden mukaiset vaikutukset kohdepaikassa ja valitaan epäsuotuisimmaksi säätilaksi se, jossa vaikutukset ovat suurimmillaan. Tällaisia tarkasteluja on tehty muutamissa aikaisemmissa tutkimuksissa<sup>1,2</sup>. Tällä menettelyllä ei kuitenkaan välttämättä löydetä pahinta mahdollista säätilannetta, sillä tarkastelut joudutaan aina laskelmien laajuuden takia rajoittamaan suhteellisen lyhyeen aikaan, korkeintaan muutama vuoteen, jona aikana ei ehkä pahinta tilannetta esiinny.

Vaihtoehtoisesti voidaan suurimpien vaikutusten kannalta epäsuotuisin säätilanne pyrkiä määrittelemään suoraan leviämiseen liittyvien yleisten säännönmukaisuuksien perusteella. Tätä menettelyä on alla olevien sääparametrien määrittelyssä käytetty. Tavoitteena on tällöin ollut löytää sellainen säätila, joka on vaikutuksia ajatellen epäsuotuisin, mutta samalla kuitenkin realistinen. Tässä luvussa esitettävien parametrien mukainen säätila on todennäköisesti harvinainen, esiintyen ehkä vain noin kerran joka toinen vuosi. Vaikutuksia ajatellen vain hieman suotuisampi säätilanne saattaa kuitenkin esiintyä jo huomattavasti useammin. Tehdyt arviot ydinvoimalaitosonnettomuuden vaikutuksista eivät näin ollen ole säätilaoletusten takia suuruusluokaltaan yliarvioitua.

Seuraavassa on eritelty radioaktiivisten aineiden kulkeutumiseen vaikuttavien sääparametrien valinnat.

### 3.2 Tuulen nopeus

Virtauksen suunnassa tapahtuva päästön laimeneminen on kääntäen verrannollinen tuulen nopeuteen. Tarkastelulaskelmiin on valittu tuulen nopeudeksi  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Tämä nopeus on suhteellisen alhainen, mutta kuitenkin niin suuri, että voidaan ajatella tuulen suunnan pysyvän melko vakiona. Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki ja Kuola  $\Rightarrow$  Oulu -tapauksissa tuulen nopeudeksi on valittu  $5 \text{ m s}^{-1}$ , jotta pilvi yleensä kohtuullisessa ajassa ehtisi perille.

### 3.3 Pystysuuntainen laimeneminen

Pystysuuntaista sekoittumista rajoittavat maanpinta ja inversioerrokset<sup>a</sup> sekä turbulenttisen sekoittumisen tietty hitaus. Jos päästökorkeus on suuri, maanpintainversiot (inversiot, joiden alaraja on maanpinnassa) vaikuttavat siten, että ne eristävät päästöpilven maanpinnasta. Täten sellainen tilanne, jossa inversio alkaa heti maanpinnasta, ei nyt käsiteltävissä tapauksissa ole pahin mahdollinen. Mikäli päästö tapahtuisi matalampana tai jos tarkastelukohde olisi esimerkiksi korkea torni, inversiotilanne voisi olla pahin myös suhteellisen suurilla etäisyyksillä. Maaston korkeuserot eivät vaikuta samalla tavalla kuin korkea torni, koska virtaus tapahtuu maaston korkeuseroja myötäillen.

Suurimmat pitoisuudet lähellä maanpintaa saadaan tilanteissa, joissa esiintyy matalalla oleva yläinversio. Suomessa yläinversioiden alarajan korkeus vaihtelee tyypillisesti muutaman sadan metrin ja parin kilometrin välillä. Kun päästöpilven alkukorkeus on 100 m ja kulkeutumisetäisyys on melko suuri, täytyy pystysuuntaiselle sekoittumiselle olettaa vähintään 300–400 m, jotta sekoittuminen myös ulottuisi maanpintaan asti niin suurena, että se vastaa tasaisesti jakautunutta pitoisuutta. Vastaavasti on tapaukselle, jossa päästöpilven alkukorkeus on 500 m, oletettava vähintään n. 800–1000 m pystysuuntainen sekoittuminen, kun ehtona on pilven ulottaminen maanpintaan.

### 3.4 Horisontaalinen laimeneminen

Horisontaaliseen laimenemiseen (laimenemiseen kohtisuorasti tuulen suuntaa vasten) vaikuttavat ilmakehän turbulenssi, tuulen suunnan muuttuminen pystysuunnassa (eli ns. vertikaalinen tuuliväanne) sekä tuulen suunnan vaihtelut. Turbulenssin aiheuttama hajaantuminen on pienintä stabiilissa tilanteessa. Kulkeutumisetäisyyden kasvaessa vertikaalisen tuuliväanteen vaikutus kasvaa. Koska väanne on varsin suuri stabiilissa tilanteessa, stabiilit leviämisolosuhteet eivät suurilla etäisyyksillä anna korkeimpia pitoisuuksia, varsinkin jos päästön leviämiskorkeus on suuri. Maanpintapitoisuuksien kannalta pahimmaksi tilanteeksi on tästä syystä valittu lähes neutraali tilanne (Pasquill-luokkien D ja E välillä)<sup>b</sup>, jolloin voi ajatella, että synoptisen skaalan terminen tuulikomponentti kompensoi kitkatekijöistä aiheutuvan pystysuuntaisen väanteen. Vaikka horisontaalinen leviäminen onkin pienintä stabiileissa tilanteissa, aiheuttaa inversion päästön maanpinnasta erottava vaikutus sen, että stabiilit

<sup>a</sup> Kerrokset, joissa ilman lämpötila nousee ylöspäin mentäessä.

<sup>b</sup> Pasquill-luokat ovat yksi tapa kuvata ilmakehän stabiiliutta, so. leviämisolosuhteita. Ks. esim. ”Norlund G, Riekkinen A-L, Tammelin B. Pasquill-tyyppinen ilman epäpuhtauksien leviämismalli. Ilmatieteen laitoksen tiedonantoja No 31. Ilmatieteen laitos; 1976.”

inversiotilanteet (Pasquillin E- ja F-luokat) eivät edusta suurimpia pitoisuuksia.

Tuulen suunnan hidas (matalafrekvenssinen) vaihtelu, ns. meandering-ilmio, ei vaikuta lyhytaikaispitoisuuteen. Otosajan kasvaessa tuulen suunnan vaihtelut tulevat kuitenkin merkittäväksi. Tämä näkyy tietyssä kohdepaikassa pitoisuuden spektrinä, jossa esiintyy korkeamman ja matalamman pitoisuuden jaksoja. Tarkasteltaessa kohtaa, jossa pitoisuus alkuhetkellä on maksimissaan, pienenee keskipitoisuus tällöin otosajan kasvaessa.

Horizontaalista laimenemista kuvaavat hajontaparametrin  $\sigma_y$ -arvot otosajalle 5 min on arvioitu ns. Pasquill-Turner -käyristä (D- ja E-luokkien väliltä) sadan kilometrin etäisyydelle asti. Yli sadan kilometrin etäisyyksille  $\sigma_y$ -arvot on laskettu olettaen, että hajonta kasvaa verrannollisena etäisyyden neliöjuureen.  $\sigma_y$ -arvoissa ei ole oletettu, että synoptinen tuulen suunta vaihtelisi, vaan on otettu huomioon ainoastaan meandering-ilmio, joka johtuu mm. ilmakehän gravitaatioaaltoista. Hajontaparametrin  $\sigma_y$  kasvaminen otosajan kasvaessa on arvioitu kirjallisuudessa esiintyvien suositusten mukaiseksi.

Taulukoissa 3.1 ja 3.2 on eritelty parametrivalinnat kulkeutumistapauksittain.

## Viiteluettelo

1. Nordlund G, Rossi J, Savolainen I, Valkama, I. Ilmaan joutuvien radioaktiivisten päästöjen vaikutus väestön säteilyannoksiin laajoilla alueilla. VTT:n Tiedotteita 525. Valtion teknillinen tutkimuskeskus; Espoo 1985.
2. Nordlund G, Rossi J, Valkama I, Vuori, S. Probabilistic trajectory and dose analysis for Finland due to hypothetical radioactive releases at Sosnovyy Bor. VTT:n Tiedotteita 847. Valtion teknillinen tutkimuskeskus; Espoo 1988.



**Taulukko 3.1.** "Pahimman säätilan" leviämispärametrit tarkasteltavissa ydinvoimalaitosonnettomuustilanteissa, kun päästön alku- korkeus on 100 m.

Tämän taulukon arvoja tulisi käyttää vain sellaisissa tapauksissa, joissa päästön lämpöenergia on pienempi kuin n. 10 MW.

Laitos ⇒ kohde Etäisyys	Tuulen nopeus (m s <sup>-1</sup> )	Kulkeutumis- aika (h)	Pilveenjäätimis- kerroin*	Pystysuuntainen laimeneminen (m <sup>-1</sup> )	σ <sub>y</sub> -parametri eri otosajoille (km)			
					5 min	1 h	10 h	24 h
Loviisa ⇒ Helsinki 70 km	3	6,5	0,9	1/300	3,0	5,4	9,6	12,0
Olkiluoto ⇒ Turku 90 km	3	8,3	0,9	1/300	3,8	6,8	12,2	15,2
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki 220 km	3	20	0,9	1/400	5,2	9,4	16,6	20,8
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka 140 km	3	13	0,9	1/350	4,1	7,4	13,1	16,4
Forsmark ⇒ Turku 220 km	3	20	0,9	1/400	5,2	9,4	16,6	20,8

\* Pilveenjäätiskerroin kuvaa sitä osuutta maahan laskeutuvista aineista, joka on vielä jäljellä pilvessä kyseisellä kohdepaikkakunnalla (kun radioaktiivisen puoliintumisen vaikutuksia ei oteta huomioon). Kaasuille pilveenjäätiskerroin on 1.

Laskelmissa tarvittavat laimennuskertoimet maan pinnalla päästövoivan keskiakselin alapuolella arvioidaan seuraavan kaavan mukaan:

$$\text{laimennuskerroin} = \frac{1}{\text{tuulen nopeus}} \cdot \text{pilveenjäätiskerroin} \cdot \text{pystysuuntainen laimenneminen} \cdot 1 / (\sqrt{2\pi} \sigma_y) \left[ \frac{s}{m^3} \right]$$

**Taulukko 3.2.** "Pahimman säätötilan" leviämispärametrit tarkasteltavissa ydinvoimalaitosonnettomuustilanteissa. Päästön alkukorkeus 500 m.

Laitos ⇒ kohde Etäisyys	Tuulen nopeus (m s <sup>-1</sup> )	Kulkeutumis- aika (h)	Pilveenjäätimis- kerroin*	Pystysuuntainen laimeneminen (m <sup>-1</sup> )	σ <sub>y</sub> -parametri eri otosajoille (km)			
					5 min	1 h	10 h	24 h
Loviisa ⇒ Helsinki 70 km	3	6,5	1,0	1/800	3,0	5,4	9,6	12,0
Olkiluoto ⇒ Turku 90 km	3	8,3	1,0	1/800	3,8	6,8	12,2	15,2
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki 220 km	3	20	1,0	1/1000	5,2	9,4	16,6	20,8
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka 140 km	3	13	1,0	1/900	4,1	7,4	13,1	16,4
Forsmark ⇒ Turku 220 km	3	20	1,0	1/1000	5,2	9,4	16,6	20,8
Kuola ⇒ Oulu 410 km	5	23	0,9	1/1000	8,2	14,7	26,2	ei voida antaa
Ignalina ⇒ Helsinki 540 km	5	30	0,9	1/1000	9,3	16,7	29,8	ei voida antaa

\* Pilveenjäätiskerroin kuvaa sitä osuutta maahan laskeutuvista aineista, joka on vielä jäljellä pilvessä kyseisellä kohdepaikkakunnalla (kun radioaktiivisen puoliintumisen vaikutuksia ei oteta huomioon). Kaasuille pilveenjäätiskerroin on 1.

Laskelmissa tarvittavat laimennuskertoimet maan pinnalla päästävänan keskiakselin alapuolella arvioidaan seuraavan kaavan mukaan:

$$\text{laimennuskerroin} = \frac{1}{\text{tuulen nopeus}} \cdot \text{pilveenjäätiskerroin} \cdot \text{pystysuuntainen laimenneminen} \cdot 1 / (\sqrt{2\pi} \sigma_y) \left[ \frac{s}{m^3} \right]$$

# 4 Ydinvoimalaturman välittömät säteilyseuraukset

J. Lahtinen, H. Toivonen, R. Pöllänen

## 4 Ydinvoimalaturman välittömät säteilyseuraukset

### 4.1 Yleistä

Tämän luvun esityksessä keskitytään niihin säteilyvaikutuksiin, jotka aiheutuvat ydinvoimalaturman ensimmäisten vaiheiden aikana tapahtuvasta altistumisesta radioaktiivisille aineille (joko suoraan ulkoisen säteilyn tai hengityksen kautta). Tarkasteltava altistumisaika kattaa päästöpilven ylikulun ja ajan välittömästi sen jälkeen: kokonaisaikajänne on 48 tuntia päästöpilven tulosta kohdepaikkakunnalle (päästön kesto on 24 h). Radioaktiivisen laskeuman aiheuttamia pitkäaikaisvaikutuksia samoin kuin ravinnon kautta saatavia säteilyannoksia arvioidaan toisaalla (luku 5). Tämän luvun lopussa (kohta 4.7) tarkastellaan erikseen radioaktiivisten ydinpolttoainehiukkasten koostumusta ja kulkeutumista sekä niiden aiheuttamia annoksia.

Tässä yhteydessä tehtyjen laskujen tavoitteena on tuottaa ydinvoimalaturman säteilyseurauksista taustatietoa, jota voitaisiin hyödyntää järjestettäessä suojaus toimenpiteitä parhaalla mahdollisella tavalla. Annos- ja pituuslaskujen lähtötietoina käytetään erillisen lähdetermianalyysin tuloksia (luku 2) ja Ilmatieteen laitoksen (IL) toimittamia tapauskohtaisia leviämistilannekuvauksia (luku 3).

Kuvassa 4.1 on esitetty tarkastelussa mukana olevat voimalat ja kohdepaikkakunnat sekä päästöpilven kulkeutumisajat. Huom! Mukana on myös nyttemmin jo suljettu Ignalinan voimala Liettuassa.

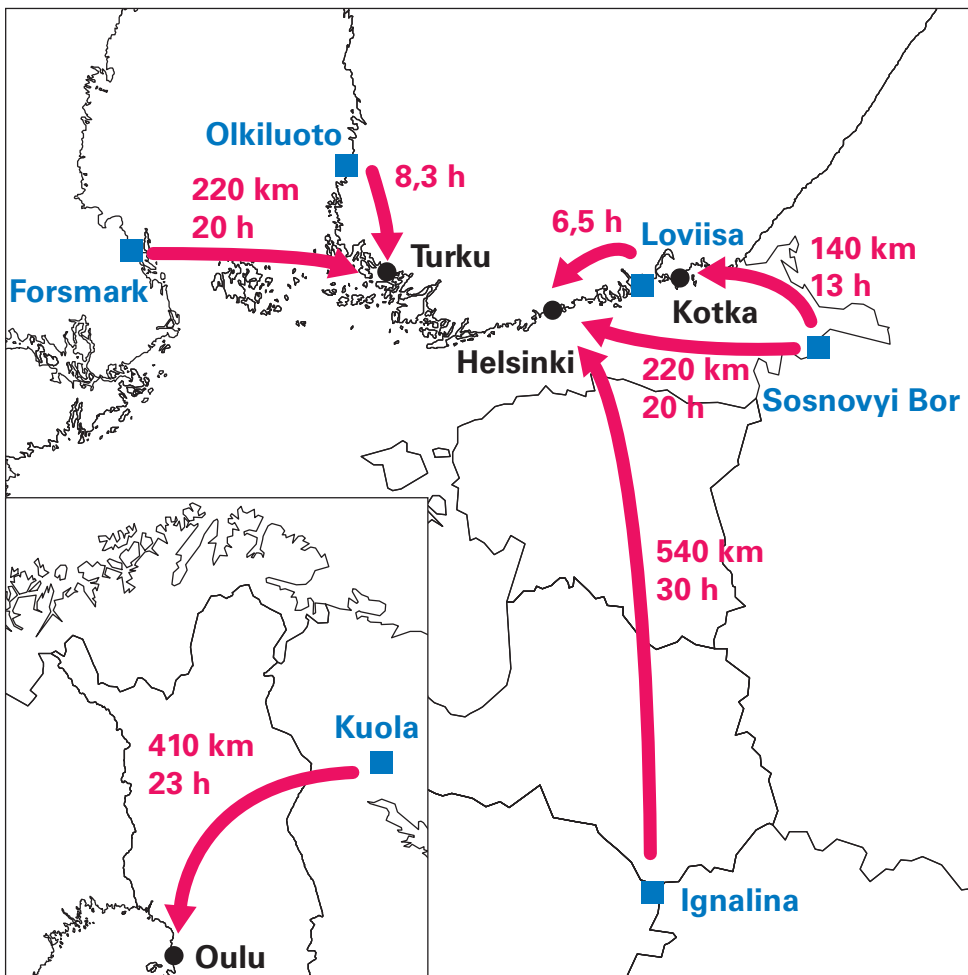
### 4.2 Inventaarit ja vapautumisosuudet

Liitteessä I on esitetty laskujen perustana käytetyt eri reaktorityyppien ns. referenssi-inventaarit (radionuklidimäärät) ja nuklidien annosmuuntokertoimet. Liitteen PWR-inventaari edustaa Loviisan reaktorien inventaaria ennen 1990-luvun lopun tehonkorotusta ja BWR-inventaari Olkiluodon reaktorien inventaaria ennen tehonkorotusta. Tätä raporttia varten alkuperäisten inventaarien perusteella vuonna 1993 tehtyjen Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki - ja Olkiluoto  $\Rightarrow$  Turku -laskelmien tulokset on skaalattu kyseisten laitosten tehonkorotusta vastaavilla tekijöillä 1,09 (Loviisa) ja 1,16 (Olkiluoto).

Sosnovyi Borin laitokselle on käytetty suoraan liitteen I RBMK-inventaaria. Muiden tarkastelussa mukana olevien ulkomaisten voimaloiden – Forsmark (BWR, sähköteho 1000 MW<sub>e</sub>), Kuola (PWR, 440 MW<sub>e</sub>) ja Ignalina (RBMK, 1500 MW<sub>e</sub>) – inventaarit on arvioitu kertomalla vastaava liitteessä I annettu reaktorityyppikohtainen inventaari kyseisen laitoksen ja liitteen I

taulukoidun referenssilaitoksen tehojen suhteella (ks. myös taulukko 2.1).

Eri nuklidiryhmien vapautumisosuuksia ja vapautumisen aikakäyttäytymistä on käsitelty reaktorityypeittäin luvussa 2. Yhteenvedo on taulukossa 4.1. Annetut vapautumisosuudet on laskuja tehtäessä tulkittu osuuksiksi alkuinventaarista, eikä niissä ole otettu huomioon päästön keston aikana reaktorissa tapahtuvaa lyhytikäisten radionuklidien puoliintumista tai niiden syntymistä muista nuklideista. Tästä mahdollisesti aiheutuvaa virhettä on tarkasteltu kohdan 4.5 yhteydessä.



**Kuva 4.1.** Ydinvoimalaonnettomuustarkastelussa mukana olevat voimalat ja kohdepaikkakunnat.

### 4.3 Leviäminen ilmakehässä

Säätilannekuvauksia ja leviämisp parametriarvoja samoin kuin niiden meteorologis-fysikaalista taustaa on selostettu edellä luvussa 3. Poikittaissuunnassa pitoisuus noudattaa Gaussin jakaumaa ja pystysuunnassa pitoisuus on tasan jakautunut maanpinnan ja tietyn tapauskohtaisen korkeuden (300...1000 m; ns. sekoituskorkeus) välille. Olettamus korkeussuuntaisesta tasajakaumasta ei pidä tarkasti ottaen paikkaansa lähellä maanpintaa. Maanpinnan läheisyydessä esiintyy todellisuudessa lähes aina pitoisuusgradientti, joka on seurausta mm. laskeumasta (maanpinnan lähellä pitoisuus on yleensä hieman pienempi kuin vähän ylempänä). Täydellisen tasajakauman oletaminen kaukana päästöpuolesta on kuitenkin usein käytetty likimääräistys.

Pilveenjäämiskerroin on kulkeutumismatkasta ja leviämiskorkeudesta<sup>a</sup> riippuen joko 1,0 tai 0,9 (edellä taulukot 3.1 ja 3.2). Käytännössä näin suuri pilveenjäämiskerroin tarkastelluissa tapauksissa olisi mahdollinen kaasuille ja pienille hiukkasille (< 10  $\mu\text{m}$ ). Eräät aineet – kuten cerium ja sirkoni – pysyvät tiukasti kiinni polttoaineen uraanimatriisissa.

Mikäli päästöjä aiheuttava onnettomuus on räjähdystyyppinen, syntyy myös suurehkoja kappaleita, joista valtaosa jää laitosalueelle. Onnettomuuden luonnetta tai syntymekanismia ei seurauslaskuissa kuitenkaan pohdita tarkemmin (ks. silti luku 2 ja kohta 4.7). Sen takia lähde-termi tulee tämän analyysin laskennallisten tulosten kannalta tulkita hiukan tavallisesta poikkeavalla tavalla eli siksi osuudeksi inventaarista, jolla on mahdollisuus kulkeutua kauas kaasuna tai pieninä hiukkasina.

Leviämiseen liittyvistä parametriarvoista on annettu yhteenveto taulukossa 4.2. Siinä on esitetty eri kohdepaikkakunnilla tiettyä otosaikaa vastaavat laimennuskertoimet<sup>b</sup>  $\chi$  maanpinnalla päästövanan keskiakselin<sup>c</sup> kohdalla ja poikittaiset hajontaparametrit  $\sigma_y$ . Huom! Jatkossa käytetään paljon termiä ”trajektorit”, jolla tässä raportissa tarkoitetaan – ellei erikseen muuta todeta – aluetta maan pinnalla päästövanan keskiakselin kohdalla.

Otos aika tarkoittaa sitä ajanjaksoa, jonka kuluessa tehtyihin havaintoihin parametrien arvot perustuvat: mitä pitempi otos aika, sen pitkäjaksoisemmat tuulen vaihtelut ja ilmakehän pyörteet on otettava huomioon. Otosajan (so. annos- ja pitoisuuslaskuissa tarkasteluajan) kasvaessa  $\sigma_y$  ja pilven keskimääräinen aktiivisuus pitoisuus kaukana päästövanan keskiakselilta kasvavat, kun taas pitoisuus akselilla ja sen läheisyydessä pienenee.

Taulukon 4.2 leviämisp parametrit ovat keskimääräisiä, kyseisellä pilven ylikulun alusta alkavalla aikajaksolla (0,T) vallitsevia arvoja. Muun pituisia

<sup>a</sup> Leviämiskorkeudella tarkoitetaan tässä selvityksessä pilven nousu- tai alkukorkeutta.

<sup>b</sup> Laimennuskertoimet on laskettu kuten luvun 2 taulukoissa 3.1 ja 3.2 on esitetty.

<sup>c</sup> Keskiakseli määräytyy keskimääräisestä tuulen suunnasta.

**Taulukko 4.1.** Eri nuklidiryhmien vapautumisosuudet alkuinventaarista reaktorityypeittäin ja päästöjaksoittain\*.

Ryhmä**/reaktori	Jakso 1 1 h	Jakso 2 5 h	Jakso 3 6 h	Jakso 4 12 h	Yhteensä 24 h
<b>Jalokaasut</b>					
PWR	0,50	0,50			1,0
BWR	0,50	0,50			1,0
RBMK	0,50	0,50			1,0
<b>Jodi</b>					
PWR	0,175	0,0795	0,0955		0,35
BWR	0,225	0,1023	0,1227		0,45
RBMK	0,30	0,1364	0,1636		0,60
<b>Cesium</b>					
PWR	0,175	0,0795	0,0955		0,35
BWR	0,075	0,0341	0,04 09		0,15
RBMK	0,20	0,0909	0,1091		0,40
<b>Telluuri</b>					
PWR	0,10	0,0455	0,0545		0,20
BWR	0,025	0,0054	0,0065	0,0130	0,05
RBMK	0,05	0,0227	0,0273		0,10
<b>Strontium ja barium</b>					
PWR	0,015	0,0033	0,0039	0,0078	0,03
BWR	0,025	0,0054	0,0065	0,0130	0,05
RBMK	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01
<b>Ruteeni</b>					
PWR	0,015	0,0033	0,0039	0,0078	0,03
BWR	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01
RBMK	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01
<b>Lantaani ja cerium</b>					
PWR	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01
BWR	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01
RBMK	0,005	0,0011	0,0013	0,0026	0,01

\* Päästöosuuksien suhteen on oletettu, että kokonaispäästöstä puolet vapautuu ensimmäisen tunnin aikana ja loput tasaisesti nuklidiryhmästä riippuen 5, 11 tai 23 tunnin kuluessa.

\*\* Ryhmiin kuuluvat yksittäiset nuklidit on lueteltu liitteessä I.

jaksoja vastaavat arvot saadaan logaritmisella interpoloinnilla. Tiettyä aikaväliä ( $T_1, T_2$ ) edustavat parametriarvot taas on arvioitu jaksojen ( $0, T_1$ ) ja ( $0, T_2$ ) arvojen perusteella käsittelemällä näitä puhtaan matemaattisina keskiarvoina (muitakin tulkintamahdollisuuksia on). ”Hetkellisiä” parametriarvoja (annosnopeus- ja pitoisuuslaskuissa) määrittäessä aikaväli  $T_2 - T_1$  on oletettu viideksi minuutiksi.

Niissä tapauksissa (Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki, Kuola  $\Rightarrow$  Oulu), joissa 24 h leviämismetriarvoja ei ole voitu antaa, on laskuissa oletettu, että välillä 10...24 h ei päästöpilven leveneminen lisäänty (laskentateknisistä syistä eräissä tuloksissa kuitenkin esiintyy vähäistä leviämistä).

**Taulukko 4.2.** Leviämiseen vaikuttavat parametrit ( $\chi$  = laimennuskerroin,  $\sigma_y$  = poikittainen hajontaparametri).

Tuulen nopeus on 3 ms<sup>-1</sup> paitsi Kuolan ja Ignalina tapauksissa 5 ms<sup>-1</sup>. Laimennuskoroin sisältää pilveenjäätämiskertoimen (0,9 tai 1). Pilveenjäätämiskoroin otetaan huomioon vain laskeutuvien nuklidien tapauksessa.

Laitos Kohde Etäisyys (km)	Leviämis- korkeus (m)	5 min		1 h		10 h		24 h	
		Otos aika $\sigma_y$ (km)	$\chi$ (sm <sup>-3</sup> )	Otos aika $\sigma_y$ (km)	$\chi$ (sm <sup>-3</sup> )	Otos aika $\sigma_y$ (km)	$\chi$ (sm <sup>-3</sup> )	Otos aika $\sigma_y$ (km)	$\chi$ (sm <sup>-3</sup> )
<b>Loviisa</b> Helsinki 70	100	3,0	0,133E-06	5,4	0,739E-07	9,6	0,416E-07	12,0	0,332E-07
	500	3,0	0,584E-07	5,4	0,308E-07	9,6	0,173E-07	12,0	0,139E-07
<b>Olkiluoto</b> Turku 90	100	3,8	0,105E-06	6,8	0,587E-07	12,2	0,327E-07	15,2	0,262E-07
	500	3,8	0,437E-07	6,8	0,244E-07	12,2	0,136E-07	15,2	0,109E-07
<b>Forsmark</b> Turku 220	100	5,2	0,575E-07	9,4	0,318E-07	16,6	0,180E-07	20,8	0,144E-07
	500	5,2	0,256E-07	9,4	0,141E-07	16,6	0,801E-08	20,8	0,639E-08
<b>Sosnovyi Bor</b> Kotka 140 Helsinki 220	100	4,1	0,834E-07	7,4	0,462E-07	13,1	0,261E-07	16,4	0,209E-07
	500	4,1	0,360E-07	7,4	0,200E-07	13,1	0,113E-07	16,4	0,901E-08
	100	5,2	0,575E-07	9,4	0,318E-07	16,6	0,180E-07	20,8	0,144E-07
	500	5,2	0,256E-07	9,4	0,141E-07	16,6	0,801E-08	20,8	0,639E-08
<b>Kuola</b> Oulu 410	500	8,2	0,876E-08	14,7	0,489E-08	26,2	0,274E-08		
	540	9,3	0,772E-08	16,7	0,430E-08	29,8	0,241E-08		



## 4.4 Annos- ja pitoisuuslaskenta

Annos- ja pitoisuuslaskut tehtiin OIVA-ohjelman<sup>1</sup> erikoisversiolla. Tarkasteltavat annostiet ovat hengityksen kautta aiheutuva sisäisen säteilyn annos sekä päästöpilvestä ja laskeumasta saatava ulkoisen säteilyn annos. Lähtötietoina käytettiin edellisissä kohdissa 4.2 ja 4.3 referoituja vapautumisarvioita ja sääparametriarvoja. Laskuissa on oletettu pilven olevan pystysuunnassa tasanjakautunut sekoituskorkeuteen ja poikittaissuunnassa gaussinen. Kaikki tässä luvussa esitettävät annokset ja pitoisuudet edustavat tilannetta maanpinnalla täysin suojautumattoman henkilön kannalta.

Hengityksen kautta saatava annos ja -annosnopeus ovat suoraan verrannollisia tarkastelukohdassa vallitsevaan (gaussisen) pilven aktiivisuuspitoisuuteen (ja siis laimennuskertoimeen), joten niiden arvioiminen on suoraviivaista. Hengityksen kautta saatavasta annoksesta puhuttaessa tarkoitetaan tässä efektiivistä annoskertymää, ts. tietyn tarkastelujakson aikana hengityksen mukana elimistöön joutuneiden radioaktiivisten aineiden viidenkymmenen vuoden aikana aiheuttamaa annosta. Vastaava annosnopeus kuvaa tämän annoskertymän kertymisnopeutta sinä aikana, kun hengitetään radioaktiivisia aineita sisältävää ilmaa. Hengitysnopeutena on käytetty arvoa 0,832 m<sup>3</sup>/h (20 m<sup>3</sup> vuorokaudessa), joka vastaa levossa olevan tai kevyttä työtä tekevän täysi-ikäisen henkilön hengitysnopeutta.

Pilven aiheuttama ulkoisen säteilyn annosnopeus (gammäsäteilystä) ei suoraan noudata lineaarista pitoisuusriippuvuutta, koska gammäsäteilyllä on ilmassa pitkä kantama. Kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa pilven dimensiot poikittaissuunnassa – jota kuvaa hajontaparametri  $\sigma_y$  – ovat kuitenkin suuret suhteessa gammäsäteilyn vapaamatkaan ilmassa, eikä pilven rajallinen korkeuskaan (300...1000 m) aiheuta suurta virhettä ns. puoliääretön-approksimaation käytölle. Pilven aiheuttaman ulkoisen säteilyn kokonaisannoksen ja -annosnopeuden voidaan näin ollen katsoa olevan likimain suoraan verrannollisia pilven aktiivisuuspitoisuuteen kussakin kohdassa.

Myös laskeumasta tulevan säteilyannoksen voidaan olettaa vaihtelevan poikittaissuunnassa samalla tavalla kuin itse laskeuma (gaussinen jakauma). Syntyvä virhe on tässä yhteydessä merkityksetön. Lasketut annokset ja annosnopeudet vastaavat tilannetta yhden metrin korkeudella äärettömän, sileän tason päällä. Maanpinnan epätasaisuuksien aiheuttamaa vaimennusta ei siis oteta huomioon.

Laskeuman kertymisnopeuden arvioimiseen käytetään depositionopeutta. Se kuvaa nopeutta (m s<sup>-1</sup>), jolla radioaktiiviset hiukkaset siirtyvät ilmasta erilaisille pinnoille. Keskimääräinen depositionopeus on kokonaislaskeuman (Bq m<sup>-2</sup>) ja maanpinnan läheisen ilman pitoisuusintegraalin (Bq·s m<sup>-3</sup>) suhde. Tässä analyysissä depositionopeudelle käytettiin arvoa 1 cm s<sup>-1</sup>, joka on tämän

tyyppisissä laskuissa usein käytetty kuivalaskeumaan liittyvä eräänlainen nuklidiriippumaton, keskimääräinen arvo. Depositionopeus riippuu paitsi säätelästä ja pinnan laadusta myös nuklidista – tai pikemminkin hiukkaskoosta – ja sen arvo voi vaihdella ainakin välillä  $0,01\text{--}10\text{ cm s}^{-1}$ . Tshernobylin laskeuman yhteydessä jodin depositionopeus oli alle  $1\text{ cm s}^{-1}$ ; sen sijaan polttoainehiukkaasiin kiinnittyneiden sironin ja ceriumin depositionopeus oli jopa  $5\text{ cm s}^{-1}$ . Tämän analyysin yhteydessä ei ole mahdollista tarkastella erilaisten depositionopeuksien vaikutusta säteilyseurauksiin. Todettakoon myös, että tässä tutkimuksessa otettiin huomioon vain kuivalaskeuma. Sade lisäksi laskeumaa mutta toisaalta myös pienentäisi pilvessä jäljellä olevien radioaktiivisten aineiden määrää tehokkaasti.

Täydellistä tasajakaumaa realistisemmän pystysuuntaisen pitoisuusjakauman (ks. edellinen kohta 4.3) käyttäminen vähentäisi lähinnä hengityksen ja laskeuman kautta saatavaa annosta.

Laskuja tehtäessä eri päästöjaksot käsiteltiin erillisinä peräkkäisinä päästöinä, joista aiheutuvat annokset ja pitoisuusintegraalit laskettiin loppuvaiheessa yhteen. Näin voitiin ottaa huomioon mm. se, että ensimmäisen päästöjaksoson ( $0\text{...}1\text{ h}$ ) aikana maahan laskeutuneet radioaktiiviset aineet leviävät suppeammalle alueelle (keskimääräinen  $\sigma_y$  jakson aikana pienempi) kuin esim. neljännen jakson ( $12\text{...}24\text{ h}$ ) aikana ( $\sigma_y$  suurempi). Tästä menettelystä seuraa, että vaikka leviäminen (ja keskimääräiset annosnopeudet) poikittais suunnassa oletetaan kunakin päästöjaksosona Gaussin jakauman mukaisiksi, ei esim. saatavien kahden vuorokauden kokonaisannosten etäisyysriippuvuutta keskiakselista voi esittää jakaumalla, jota kuvaisi vain yksi gaussisen mallin hajontaparametri  $\sigma_y$ .

## 4.5 Säteilyvaikutukset

Tehdyistä laskelmien tulokset on koottu tapauskohtaisesti liitteisiin II–VIII seuraavasti:

- Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki (liite II)
- Olkiluoto  $\Rightarrow$  Turku (liite III)
- Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Helsinki (liite IV)
- Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka (liite V)
- Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki (liite VI)
- Kuola  $\Rightarrow$  Oulu (liite VII)
- Forsmark  $\Rightarrow$  Turku (liite VIII)

Liitteiden kuvissa ja taulukoissa esitetään seuraavat tulokset:

**Kuvat:**

- Efektiiviset annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona (2 vrk).
- Kahden vuorokauden efektiivinen annos (so. ulkoisen säteilyn annokset ja pilven ylikulun aikana hengityksen kautta elimistöön tulleiden radionuklidien aiheuttama 50 vuoden annoskertymä) trajektorilta kohtisuoraan lasketun etäisyyden funktiona (jatkossa ”trajektorin sivussa”).
- $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa.

**Taulukot:**

- Jodi-isotooppien aktiivisuuspitoisuudet ja niistä aiheutuvat annokset trajektorilla.
- Kahden vuorokauden efektiiviset annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit
- Kahden vuorokauden efektiiviset annokset trajektorin sivussa.
- Efektiiviset annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona (2 vrk).
- Efektiiviset annosnopeudet kohtisuorassa trajektorin sivussa päästöpilven tullessa (kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan).
- $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua.
- $^{131}\text{I}$ -pitoisuus trajektorin sivussa päästöpilven tullessa (pitoisuus suurimmillaan)
- Tärkeimpien hengityksen kautta aiheutuvaan annokseen vaikuttavien nuklidien pitoisuusintegraalit trajektorilla.
- Ulkoinen säteilyn aiheuttama efektiivinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Liitteiden II – VIII kuvia ja lukuarvoja tarkasteltaessa on syytä pitää mielessä, että ne edustavat tiettyä, määrättyihin sekä fysikaalisiin että laskennallisiin olettamuksiin perustuvaa tilannetta. Päästöjaksojen (ja siis päästönopeuksien) vaihtumista vastaavat annosnopeuden tai muiden säteilysuureiden muutokset eivät todellisuudessa olisi aivan yhtä jyrkkiä kuin kuvissa on esitetty. Päästöpilven saapuessa annosnopeudet ja pitoisuudet nousisivat alussa todennäköisesti verrattain hitaasti johtuen pilven etureunalla kulkeutumisen aikana tapahtuneesta diffuusiosta. Pilvestä tulevan ulkoisen säteilyn muutoksia pehmentäisi käytännössä lisäksi se, että kova gammasäteily aiheuttaa annosta satojen metrien etäisyydeltä.

On kuitenkin toisaalta muistettava, että sekä Tshernobyl-onnettomuuden

että Sosnovyi Borin tapauksen<sup>d</sup> yhteydessä havaittiin melko nopeitakin pitoisuuksien ja säteilytasojen selviä vaihteluita (ks. kuva 6.1).

Taulukossa 4.3 on yhteenveto eri tapauksiin liittyvistä kahden vuorokauden annoksista ja maksimiannosnopeuksista trajektorilla. Annosnopeus hengityksen kautta ja pilvestä tulevan ulkoisen säteilyn aiheuttama annosnopeus ovat trajektorilla suurimmillaan heti päästöpilven saapumisen jälkeen, kun taas laskeuman aiheuttama annosnopeus saa maksiminsa myöhemmin. Niinä ajankohtina, jolloin trajektorilla saavutetaan suurimmat annosnopeudet ja -pitoisuudet, ei pilvi (tai kyseinen annosnopeus- ja pitoisuusjakauma) ole leveimmillään. Näin ollen kaukana trajektorista maksimiarvot esiintyvät myöhemmin kuin trajektorilla ja sen läheisyydessä.

Tässä tutkimuksessa oli mahdollista tarkastella säteilytilannetta vain kohdepaikkakunnalla (muutamien tärkeiden nuklidien kokonaislaskeumat on esitetty taulukossa 4.4) ja sen ympärillä trajektoriin nähden kohtisuorassa suunnassa. Näin ollen ei voida suoraan arvioida tietyn kriteerein määritellyn saastuneen alueen kokonaispinta-alaa. Taulukko 4.5 antaa kuitenkin käsityksen cesiumin saastuttaman alueen suuruudesta. Taulukossa on ilmoitettu tiettyä <sup>137</sup>Cs-laskeumaa vastaavan alueen leveys (kohtisuoraan trajektoria). On luultavaa, että useimmissa tapauksissa päästöpilvi tunkeutuisi lähes samanlaisena syvälle sisämaahan, jossa saaste leviäisi edelleen satojen kilometrien matkalla (maksimiarvot tosin pienentyisivät vähitellen).

Kuten aiemmin todettiin (ks. 4.2), taulukon 4.1 nuklidiryhmäkohtaisten vapautumisosuuksien on laskuja tehtäessä oletettu tarkoittavan osuuksia alkuinventaarista. Inventaariin sisältyvät lyhytikäiset nuklidit (puoliintumisaika pienempi kuin muutama tunti) hajoavat kuitenkin pois jo ensimmäisten tuntien aikana eikä niitä siis voi enää päästön loppupuolella vapautua ympäristöön niin paljon kuin taulukossa 4.1 ilmoitetaan (tosin eräitä lyhytikäisiä nuklideja myös syntyy koko ajan; esim. <sup>132</sup>Te → <sup>132</sup>I).

Inventaarin muuttumisesta aiheutuvien vaikutusten arvioimiseksi laskettiin eräitä säteilyseurauksia myös siinä tapauksessa, että annetut vapautumisosuudet tarkoittavat osuuksia kyseisen päästöjakson aikaisesta keskimääräisestä todellisesta nuklidikohtaisesta inventaarista. Tällöin lyhytikäisten radionuklidien kokonaispäästö on useimmissa tapauksissa aiemmin käytettyä pienempi. Tarkastelun kohteeksi valittiin tapaus Loviisa ⇒ Helsinki, jossa kulkeutumismatka ja -aika ovat lyhimät (70 km, 6,5 tuntia) ja jonka suhteen

<sup>d</sup> Päästöön johtanut polttoaineaurio Sosnovyi Borin voimalaitoksella maaliskuussa 1992. Katso esim. ”Toivonen H, Klemola S, Lahtinen J, Leppänen A, Pöllänen R, Kansanaho A, Savolainen A L, Sarkanen A, Valkama I, Jäntti M, Radioactive release from Sosnovyy Bor, St. Petersburg, in March 1992. STUK-A104. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1992.”

siis lyhytikäisten nuklidien vaikutukset ovat suurimmillaan.

Kahden vuorokauden kokonaisannokset trajektorilla pienenevät varsin vähän. Eniten väheni pilvestä saatava ulkoisen säteilyn annos (n. 10...15 %), mikä on seurausta lyhytikäisten nuklidien suhteellisen tärkeästä merkityksestä pilvestä tulevassa suorassa säteilyssä.

Yksittäisten lyhytikäisten nuklidien pitoisuuksissa ja niistä aiheutuviissa annoksissa ilmeni luonnollisesti eräitä selviäkin muutoksia. Liitteen II taulukoissa esitetyistä tuloksista esimerkiksi  $^{135}\text{I}$ -pitoisuusintegraali ( $^{135}\text{I}$ :n puoliintumisaika 6,6 tuntia) pieneni 15...20 % ja  $^{134}\text{I}$ :stä (puoliintumisaika 52,5 min) aiheutuva ulkoisen säteilyn annos pilvestä n. 50 %. Periaatteellisten johtopäätösten kannalta tällaisilla muutoksilla ei kuitenkaan ole merkitystä.

**Taulukko 4.3.** Efektiiviset maksimiannosnopeudet ja kahden ensimmäisen vuorokauden aikana saatavat annokset trajektorilla.

Huom! Taulukon kaikki luvut on pyöristetty kahteen merkitsevään numeroon. Tämän takia ei annoskomponenttien summa välttämättä ole sama kuin ilmoitettu kokonaisannos.

Laitos ⇒ kohde Leviämiskorkeus (m)	Hengitys		Pilvi		Laskeuma		Kokonais- annos* (mSv)
	Annos (mSv)	Annosnopeus (mSv h <sup>-1</sup> )	Annos (mSv)	Annosnopeus (mSv h <sup>-1</sup> )	Annos (mSv)	Annosnopeus (mSv h <sup>-1</sup> )	
Lovisa ⇒ Helsinki	350	440	11	13	160	4,2	530
	150	180	4,4	5,3	68	1,7	220
Olkiluoto ⇒ Turku	430	530	11	14	140	3,9	580
	180	220	4,6	5,5	57	1,6	240
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki	250	310	5,2	6,3	100	2,6	350
	110	140	2,3	2,8	44	1,1	160
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka	380	460	10	12	160	4,4	550
	160	200	4,4	5,2	71	1,9	240
Ignalina ⇒ Helsinki	48	58	0,81	0,97	17	0,44	66
Kuola ⇒ Oulu	19	23	0,32	0,39	7,5	0,18	27
Forsmark ⇒ Turku	260	320	3,7	4,5	70	1,7	340
500	120	150	1,6	2,0	31	0,76	150

\*1) Hengitysannoksen laskeminen yhteisen ulkoisten annosten kanssa on mielekästä vain säteilyn stokastisten vaikutusten kannalta.

Taulukko 4.4. Eräiden tärkeiden radionuklidien kokonaislaskeumat trajektorilla.

Laitos ⇒ kohde Leviämiskorkeus (m)	Nuklidikohtainen laskeuma (MBq m <sup>-2</sup> )										
	<sup>88</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>96</sup> Zr	<sup>103</sup> Ru	<sup>106</sup> Ru	<sup>131</sup> I	<sup>137</sup> Cs	<sup>138</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>141</sup> Ce	<sup>144</sup> Ce
Loviisa ⇒ Helsinki	21	1,9	13	37	13	260	47	32	13	9,6	
100											
500	8,6	0,79	5,3	15	5,3	110	19	13	5,2	4,0	
Olkiluoto ⇒ Turku	52	3,6	17	15	4,4	420	16	15	17	12	
100											
500	22	1,5	7,3	6,0	1,8	180	6,9	6,3	7,1	5,0	
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki	7,8	0,45	12	11	4,5	390	18	28	12	7,1	
100											
500	3,5	0,2	5,5	4,9	2	170	8,1	12	5,4	3,2	
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka	11	0,66	18	16	6,6	580	26	40	18	10	
100											
500	4,9	0,29	7,8	7	2,9	250	11	17	7,7	4,5	
Ignalina ⇒ Helsinki	1,6	0,094	2,6	2,3	0,94	76	3,7	5,6	2,5	1,5	
500											
Kuola ⇒ Oulu	1,2	0,11	0,74	2,1	0,76	14	2,7	1,8	0,73	0,56	
500											
Forsmark ⇒ Turku	33	2,3	11	9,3	2,8	260	11	9,7	11	7,7	
100											
500	15	1,0	5	4,1	1,3	120	4,8	4,3	4,8	3,4	

**Taulukko 4.5.**  $^{137}\text{Cs}$ -laskeuman saastuttaman alueen likimääräisiä leveyksiä. Tshernobylin onnettomuuden yhteydessä eräänä väestön poissiirron ja uudelleen asuttamisen kriteerinä pidettiin cesium-laskeuman arvoa  $1,5 \text{ MBq m}^{-2}$  ( $40 \text{ Ci km}^{-2}$ ).

Laitos $\Rightarrow$ kohde Leviämiskorkeus (m)	Alueen leveys (km)			
	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma ( $\text{MBq m}^{-2}$ )			
	10	5	1,5	0,5
Loviisa $\Rightarrow$ Helsinki				
100	20	29	44	56
500	9	18	33	46
Olkiluoto $\Rightarrow$ Turku				
100	14	26	44	60
500	–	12	31	46
Sosnovyi Bor $\Rightarrow$ Helsinki				
100	33	47	70	92
500	15	32	54	78
Sosnovyi Bor $\Rightarrow$ Kotka				
100	31	44	62	79
500	18	29	48	65
Ignalina $\Rightarrow$ Helsinki				
500	–	20	68	108
Kuola $\Rightarrow$ Oulu				
500	–	–	21	61
Forsmark $\Rightarrow$ Turku				
100	–	24	50	75
500	–	–	33	56

## 4.6 Päätelmiä ja tulosten tarkastelua

Ydinvoimalaonnettomuuksiin liittyviä väestönsuojaamisnäkökohtia on käsitelty luvuissa 6 ja 7 (sekä yhteenvetoluvussa 8).

Tässä luvussa esitettyjen laskelmien tuloksista voi – sekä lähde-termittä leviämistilanneoletukset mielessä pitäen – tehdä kolme selkeää johtopäätöstä:

1. Hengityksen kautta elimistöön kulkeutuu runsaasti radioaktiivisia aineita. Sisäinen annos, so. efektiivisen annoksen kertymä 50 vuoden kuluessa, on huomattavasti suurempi kuin ulkoisen säteilyn aiheuttama efektiivinen annos onnettomuuden alkuvaiheessa.
2. Radioaktiivinen jodi aiheuttaa kaikissa tutkituissa tapauksissa suurimman säteilyvaaran onnettomuuden alkuvaiheessa.
3. Kahden vuorokauden kokonaisannokset ovat kaikissa tarkastelluissa tapauksissa satoja millisievertejä lukuun ottamatta kulkeutumisia Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki ja Kuola  $\Rightarrow$  Oulu; näissä tapauksissa annokset ovat noin 5...6 kertaa pienempiä. Välittömät terveysvaikutukset ovat epäodennäköisiä.



Edellä esitettyjen tulosten osalta on syytä korostaa, että ne luultavasti ovat todennäköisten onnettomuustilanteiden vakavuutta voimakkaasti liioittelevia. Käytännössä vakavimmankin onnettomuuden päästö jäänee alle 10 % edellä oletetusta, koska monet radioaktiiviset aineet lähtisivät liikkeelle reaktorin jäänteistä vain hyvin poikkeuksellisissa olosuhteissa. Lisäksi suuri osa näistä aineista tarttuisi todennäköisesti reaktorista ulos johtavalla reitillä oleviin pintoihin pääsemättä koskaan ympäristöön.

Tässä selvityksessä säätilaksi valittiin kussakin tapauksessa seurausten kannalta vakava mutta ei kuitenkaan täysin epärealistinen tilanne. Sosnovyi Borin laitoksella tapahtuvan hypoteettisen onnettomuuden seurauksia Kotkassa ja Helsingissä STUK on tarkastellut myös ottaen lähtökohdaksi jonkin verran todennäköisemmät sääolot<sup>2</sup>. Samoilla lähdetermeillä säteilyannokset ovat tällöin (annostiestä ja kohdepaikkakunnasta riippuen) 2...5 kertaa pienemmät kuin tässä analyysissa.

Sosnovyi Borissa tapahtuvan onnettomuuden seurauksia<sup>3</sup> on arvioinut myös VTT ja Kuolan onnettomuuden seurauksia<sup>4</sup> Norjan säteilyturvaviranomainen. Tähän selvitykseen verrattuna kummankin analyysin tulokset ennustivat selvästi pienempiä säteilyannoksia vastaavilla etäisyyksillä laitoksesta. Vaikka eri tutkimuksia ei voikaan suoraan verrata, voidaan todeta, että erot johtuvat lähinnä lähdetermien eroavaisuuksista ja siitä, että mainituissa kahdessa tutkimuksessa sovellettiin osittain tilastollista lähestymistapaa: kulkeutumisanalyysien pohjana käytettiin todellisia tietyn pitkäkhön ajanjakson aikana havaittuja säätiloja, ei varta vasten määriteltyä hyvin epäsuotuisaa säätilannetta.

## **4.7 Ydinpolttoainehiukkaset - ominaisuudet, kulkeutuminen ja säteilyannos**

Ydinvoimalaturmassa ilmakehään vapautuvat radionuklidit ovat joko kaasumaisessa tai hiukkasmaisessa muodossa. Kaasumaisista radionuklideista tärkeimmät ovat jalokaasut sekä osa jodiyhdisteistä; muut radionuklidit ovat kiinteän tai nestemäisen aineen muodostamina hiukkasina niitä ympäröivässä kaasussa (aerosoleina).

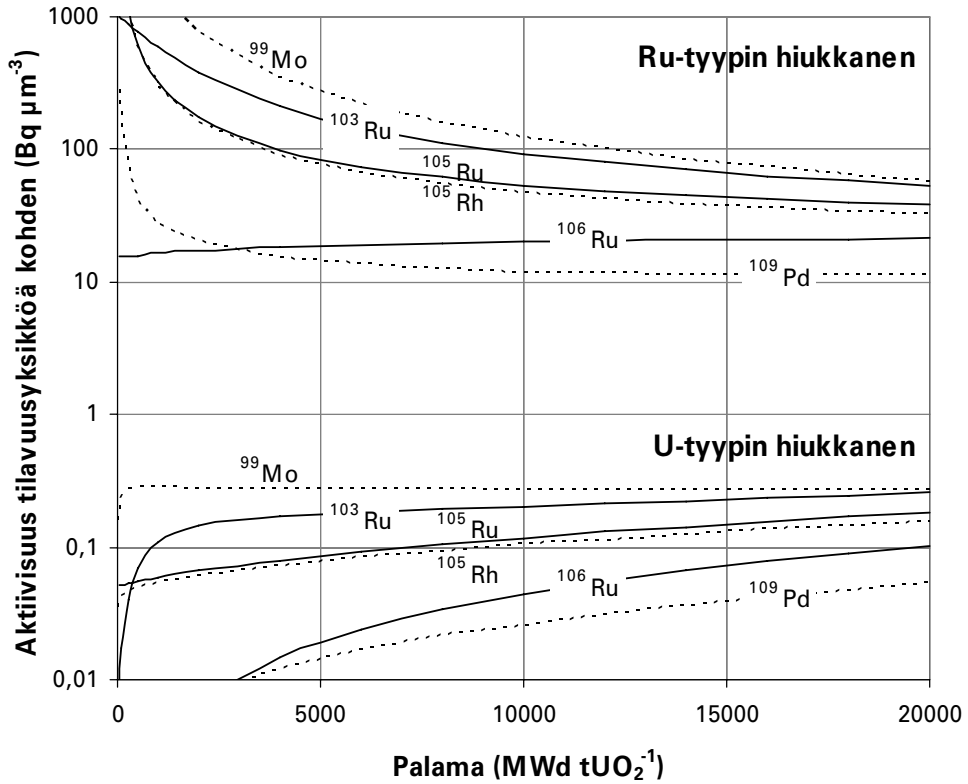
Onnettomuustilanteessa radionuklidien vapautumiseen vaikuttavat nuklidi-inventaarin lisäksi mm. onnettomuuden kulku ja aineiden kulkeutumisreitti. Ratkaiseva merkitys päästöissä on myös kunkin radionuklidin (tai yhdisteen, jossa nuklidi on kiinni) sulamis- ja höyrystymislämpötiloilla. Sydämensulamisonnettomuuksissa vapautuu enimmäkseen nuklideja, joilla on matala höyrystymislämpötila. Polttoainetta sirpaloivissa reaktiivisuus- tms. onnetto-

muuksissa vapautuvien aineiden nuklidikoostumus on lähempänä keskimääräistä palamaa vastaavaa koostumusta, vaikkakin helposti höyrystyviä aineita on eniten näissäkin tilanteissa.

Tshernobylin onnettomuudessa sekä 1950- ja 1960-luvuilla ilmakehässä suoritetuissa ydinasekokeissa ilmaan vapautui runsaasti niin sanottuja ”kuumia” hiukkasia. Sanaa ”kuuma” käytetään synonyymina erittäin aktiivisille hiukkasille eikä se viittaa hiukkasen lämpötilaan. Kuumat hiukkaset – jotka Tshernobylin onnettomuuden tapauksessa olivat sirpaloituneita ydinpolttoaineen osia – voivat olla niin aktiivisia, että jopa yksittäinen hiukkanen joutuessaan pitkäksi aikaa kosketukseen kudoksen kanssa voi aiheuttaa deterministisiä haittavaikutuksia.

Suurimmat ydinpolttoaineihiukkaset putosivat lähelle räjähdyspaikkaa. Tshernobylin turman jälkeen satojen mikrometrien hiukkasia löydettiin vaurioituneen voimalan lähiympäristöstä. Niiden aktiivisuus oli jopa yli miljoona becquereliä. Vielä yli tuhannen kilometrin päässä havaittiin yli 10  $\mu\text{m}$  hiukkasia, joiden aktiivisuus oli enemmän kuin 10 kBq. Suomesta löytyneiden hiukkasten aktiivisuus oli alle tuhat becquereliä.

Tshernobylin onnettomuudesta mekaanisesti vapautuneiden ns. U-tyypin ydinpolttoaineihiukkasten nuklidikoostumus oli vaikeasti höyrystyvien aineiden osalta yleensä suunnilleen samanlainen kuin säteilytetyssä ydinpolttoaineessa. Hiukkasten joukossa oli myös erittäin aktiivisia lähes pelkästään metalleista Mo, Tc, Ru, Rh ja Pd koostuvia hiukkasia. Kun esimerkiksi ruteniumin isotooppien keskimääräinen aktiivisuus ydinpolttoaineen tilavuusyksikköä kohti on luokkaa 0,05–0,2 Bq/ $\mu\text{m}^3$  (keskimääräiseen palamaan säteilytetty polttoaine), voi samojen nuklidien aktiivisuus näissä niin sanotuissa Ru-tyypin hiukkasissa olla jopa tuhatkertainen (kuva 4.2). Syynä on se, että ydinpolttoaineesta yli 90 prosenttia koostuu vähäaktiivisesta  $^{238}\text{U}$ :sta, jota Ru-tyypin hiukkasissa ei juuri ole.



**Kuva 4.2.** Nuklidien <sup>99</sup>Mo, <sup>103</sup>Ru, <sup>105</sup>Rh ja <sup>106</sup>Ru laskennallinen aktiivisuus yksikkötilavuutta kohden U- ja Ru-tyyppin hiukkasissa polttoaineesta otetun energian – palaman – funktiona.<sup>5</sup> U-tyyppin hiukkasten koostumus oletetaan samaksi kuin ydinpolttoaineen koostumus. Ru-tyyppin hiukkasissa on vain fission ja peräkkäisten beetahajoamisten kautta syntyneiden aineiden Mo, Tc, Ru, Rh ja Pd radionuklideja eikä lainkaan uraania.

**Taulukko 4.6.** U- ja Ru-tyyppin hiukkasten aktiivisuus (viitteessä 5 esitettyjen vaikeasti höyrystyvien nuklidien aktiivisuuksien summa) hiukkaskoon funktiona sekä 1 d että 10 d ketjureaktion päättymisen jälkeen. Hiukkasten oletetaan olevan peräisin keskimääräiseen palamaan säteilytetystä RBMK-polttoaineesta (Tshernobyl-reaktori).

$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Jäähymisaika 1 d		Jäähymisaika 10 d	
	U-tyyppi $A_{tot}$ (Bq)	Ru-tyyppi $A_{tot}$ (Bq)	U-tyyppi $A_{tot}$ (Bq)	Ru-tyyppi $A_{tot}$ (Bq)
1	3.0	130	1,3	57
2	24	1000	10	460
3	80	3500	35	1520
4	190	8000	83	3600
5	370	16000	160	7100
6	640	28000	280	12000
7	1000	43000	440	20000
8	1500	65000	660	29000
9	2200	94000	940	42000
10	3000	130000	1300	57000
15	9900	430000	4400	200000
20	24000	1000000	10000	460000

Ydinpolttoaineesta vapautuvien hiukkasten aktiivisuutta voidaan arvioida polttoaineen nuklidikoostumuksen perusteella ottaen huomioon fissio-reaktion pysähtymisen jälkeen tapahtuva radioaktiivisten aineiden hajoaminen. Esimerkiksi jos nuklidin  $i$  aktiivisuus ydinreaktorin polttoaineessa on  $10^{13}$  Bq/kg – kuten esimerkiksi  $^{95}\text{Zr}$  tai  $^{141}\text{Ce}$ -isotooppien aktiivisuus voi olla – ja tiheys  $10^4$  kg/m<sup>3</sup> (ydinpolttoaineen tiheys), on kyseisen nuklidin aktiivisuus mekaanisesti vapautuneessa halkaisijaltaan 10  $\mu\text{m}$  hiukkasessa noin 50 Bq, ja juuri ja juuri silmin havaittavassa 100  $\mu\text{m}$  hiukkasessa peräti 50 kBq. Taulukossa 4.6 on esitetty ydinpolttoaineen inventaaritietojen perusteella laskettu aktiivisuuksien summa sekä U- että Ru-tyyppin hiukkasille.

Suurten ydinpolttoaineesta vapautuneiden hiukkasten koostumus voi kuitenkin poiketa polttoaineen koostumuksesta. Esimerkiksi jodia ja cesiumia on saattanut höyrystyä, jolloin niiden määrä suurissa hiukkasissa on vähäinen; näitä helposti höyrystyviä aineita ei ole otettu huomioon taulukossa 4.6. Hiukkasten koostumus voi poiketa lähdemateriaalin koostumuksesta myös jos materiaali sulaa osittain ja sula kulkeutuu erilleen kiinteään olomuotoon jäävistä aineista. Hiukkasissa esiintyvien saman alkuaineen eri isotooppien välisen suhteen, esimerkiksi  $^{106}\text{Ru}/^{103}\text{Ru}$ , pitäisi kuitenkin vastata lähdemateriaalissa vallitsevaa isotooppisuhdetta, koska pääsääntöisesti saman alkuaineen eri isotoopit käyttäytyvät vapautumisprosessissa samalla tavalla.

On huomattava, että onnettomuustilanteissa ilmaan vapautuva aine määrä koostuu valtaosin muista kuin radioaktiivisista aineista. Kevytvesireaktoreista vapautuu lähinnä vesihöyryä, mutta myös erilaisia rakennemateriaaleja. Stabiilit aineet vaikuttavat merkittävästi radioaktiivisten aineiden käyttäytymiseen. Radionuklidit voivat joutua kulkemaan sellaisten virtausreittien läpi, jotka pidättävät osan alunperin sydäimestä liikkeelle lähteneistä aineista. Tällaisia päästöjä rajoittavia reittejä voivat olla mm. pitkät putkistot ja paksut vesikerrokset.

Radionuklidien kulkeutumiseen ilmassa vaikuttavat sekä ilmakehän leviämisolosuhteet että nuklidien esiintymismuoto. Suuret ydinpolttoainehiukkaset kulkeutuvatkin ilmakehässä toisin kuin pienet hiukkaset ja kaasumaiset aineet. Kaasumaisten aineiden trajektorit (tässä: kolmedimensioiset kulkureitit) eivät siten välttämättä ole riittäviä arvioitaessa onnettomuudessa vapautuvien radioaktiivisten aineiden kulkeutumista ja aluetta, jonne kuumat hiukkaset voivat kantautua. Suuri osa hiukkasiin sitoutuneista radioaktiivisista aineista ei pääse kulkeutumaan kaukana sijaiseville alueille. Etäisyys päästö- ja kohdepaikan välillä vaikuttaa säteilyseurauksiin pitoisuuden laimenemisen ja hiukkasten sedimentaation kautta. Tuulen nopeus ja etäisyys vaikuttavat siihen, minkä kokoisilla hiukkasilla on mahdollisuus saapua päästöalueelta kohdealueelle. Suuret hiukkaset putoavat matkan varrelle, kun taas pienet hiukkaset voivat pysyä pitkään joko pintailmassa tai ainakin ylemmissä ilmakerroksissa. Myös muiden meteorologisten tekijöiden, kuten esimerkiksi sateiden, vaikutus tulee ottaa huomioon arvioitaessa hiukkasten kulkeutumista.

Ydinpolttoainehiukkasten aiheuttama uhka poikkeaa tasaisen kontaminaation tapauksesta. Kudoksen kanssa kosketuksessa oleva beetasäteilyä lähettävä hiukkanen voi aiheuttaa suuren mutta erittäin paikallisen säteilyannoksen, kun taas kauempana, noin yli senttimetrin päässä, annos on vähäinen. Kokonsa takia suuret ydinpolttoainehiukkaset eivät hengitysilman mukana kulkeudu syvälle keuhkoihin, vaan jäävät hengitysteiden yläosiin. Akuutteja säteilyseurauksia tarkasteltaessa hiukkasten depositio ihoon ja tätä kautta saatava säteilyannos onkin varteenotettava altistusreitti. Taulukossa 4.7 on esitetty laskennallisia ihon säteilyannoksia erityyppisille ja erikokoisille ydinpolttoainehiukkasille olettaen hiukkasten olevan kiinnittyneenä ihon pintaan.

Vertailun vuoksi mainittakoon, että säteilyn käyttö tai muu säteilytoiminta ei saa vuodessa aiheuttaa väestölle 50 mSv suurempaa ihoannosta (ekvivalenttiannos). Tshernobylin onnettomuuden jälkeen aktiivisimmat Euroopasta, satojen kilometrien etäisyydeltä päästöpaikasta löydetyt ydinpolttoainehiukkaset olisivat voineet jopa alle tunnissa aiheuttaa tämän rajan ylityksen deponoiduttuaan ihon pintaan. Determinististen terveyshaittojen ilmaantumiseen olisi kuitenkin vaadittu kuitenkin yli vuorokauden kestävä ihokontakti.

**Taulukko 4.7.** Beetasäteilyn aiheuttama annosnopeus iholle erikokoisten U- ja Ru-tyyppin hiukkasten deponoiduttua ihon pintaan. Annokset on laskettu tyvisolukerroksen nimellissyvyydelle 70  $\mu\text{m}$  ja keskiarvoistettuna neliösenttimetrin pinta-alalle. Hiukkasten koostumus ja aktiivisuus oletettiin olevan taulukossa 4.6 esitetyn mukainen.

$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Jäähymisaika 1 d		Jäähymisaika 10 d	
	U-tyyppi ( $\text{mGy h}^{-1}$ )	Ru-tyyppi ( $\text{mGy h}^{-1}$ )	U-tyyppi ( $\text{mGy h}^{-1}$ )	Ru-tyyppi ( $\text{mGy h}^{-1}$ )
1	0,0036	0,15	0,0016	0,049
2	0,028	1,2	0,012	0,38
3	0,093	3,8	0,040	1,2
4	0,22	8,8	0,094	2,9
5	0,41	17	0,18	5,4
6	0,70	29	0,31	9,1
7	1,1	45	0,48	14
8	1,6	66	0,70	21
9	2,2	93	0,99	29
10	3,0	130	1,3	39
15	9,4	390	4,2	120
20	21	890	9,4	270

## Viiteluettelo

1. Lahtinen J, Blomqvist L, Savolainen A L. OIVA – a real-time system for off-site dose calculations during nuclear power plant accidents. Proceedings of the First Part of the Joint OECD (NEA)/CEC Workshop on Recent Advances in Reactor Accident Consequence Management, Rome, Italy, 25 – 29th January 1988. CSNI Report 145, Vol. II, 329 - 336. (Huom! Ohjelma ei enää ole STUKin käytössä.)
2. Lahtinen J, Toivonen H, Pöllänen R, Nordlund G. A hypothetical severe reactor accident in Sosnovyy Bor, Russia: Short-term radiological consequences in Southern Finland. STUK-A113. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1993.
3. Ilvonen M, Rossi J, Salonoja M. Sosnovyi Borin aiheuttama säteilyriski Suomessa. VTT:n tiedotteita 1579. VTT; Espoo 1994.
4. Larsen E, Naadland Holo E, Saltbones J, Stokke E. Kola konsekvensanalyse. Vurdering av dosemessige konsekvenser av en eventuell ulykke ved Kola kjernekraftverk. Strållevernrapport 1999:10. Statens strållevern; Österås 1999.
5. Pöllänen R. Nuclear fuel particles in the environment – characteristics, atmospheric transport and skin doses. STUK-A188. Radiation and Nuclear Safety Authority; Helsinki 2002.

## LIITE I. Laskuissa käytetyt eri reaktorityyppien perusradionuklidi-inventaarit ja nuklidien annosmuuntokertoimet

PWR: 465 MW<sub>e</sub> Loviisan VVER-reaktorien sähköteho ennen tehonkorotusta (terminen teho 1375 MW).

BWR: 735 MW<sub>e</sub> Olkiluodon kiehutusreaktorien sähköteho ennen tehonkorotusta (terminen teho 2160 MW).

RBMK: 1000 MW<sub>e</sub> sähköteho (terminen teho 3200 MW).

RYHMÄ ja NUKLIDI	INVENTAARI <sup>a</sup>			ANNOSKERTOIMET <sup>b</sup>		
	(GBq)			PILVI	LASK.	HENG.
	PWR	BWR	RBMK	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-2</sup>	Sv Bq
<b>Jalokaasut</b>						
KR-85M	.332E+09	.591E+09	.888E+09	.260E-10	.605E-12	.00E+00
KR-85	.140E+08	.189E+08	.330E+08	.821E-12	.364E-13	.00E+00
KR-87	.631E+09	.114E+10	.174E+10	.143E-09	.278E-11	.00E+00
KR-88	.887E+09	.161E+10	.252E+10	.355E-09	.562E-11	.00E+00
KR-89	.107E+10	.198E+10	.330E+10	.321E-09	.569E-11	.00E+00
XE-133	.275E+10	.432E+10	.730E+10	.558E-11	.160E-12	.00E+00
XE-135M	.549E+09	.837E+09	.120E+10	.673E-10	.141E-11	.00E+00
XE-135	.557E+09	.127E+10	.126E+10	.396E-10	.911E-12	.00E+00
XE-137	.240E+10	.377E+10	.560E+10	.343E-10	.115E-11	.00E+00
XE-138	.223E+10	.360E+10	.550E+10	.198E-09	.352E-11	.00E+00
<b>Jodi</b>						
I-131	.137E+10	.208E+10	.315E+10	.601E-10	.127E-11	.13E-07
I-132	.197E+10	.301E+10	.444E+10	.374E-09	.734E-11	.13E-09
I-133	.275E+10	.431E+10	.629E+10	.968E-10	.207E-11	.23E-08
I-134	.301E+10	.475E+10	.710E+10	.432E-09	.832E-11	.43E-10
I-135	.257E+10	.403E+10	.555E+10	.261E-09	.464E-11	.46E-09
<b>Cesium-ryhmä</b>						
RB-86	.280E+07	.220E+07	.962E+06	.170E-10	.558E-12	.17E-08
CS-134	.223E+09	.220E+09	.190E+09	.251E-09	.493E-11	.12E-07
CS-136	.693E+08	.820E+08	.950E+08	.353E-09	.670E-11	.19E-08
CS-137	.152E+09	.200E+09	.290E+09	.258E-12	.846E-14	.85E-08
<b>Telluuri-ryhmä</b>						
TE-127M	.200E+09	.280E+08	.407E+08	.504E-12	.219E-13	.57E-08
TE-127	.152E+09	.210E+09	.218E+09	.114E-11	.346E-13	.91E-10
TE-129M	.666E+08	.970E+08	.196E+09	.590E-11	.202E-12	.68E-08
TE-129	.444E+09	.650E+09	.115E+10	.968E-11	.382E-12	.21E-10
TE-131M	.201E+09	.300E+09	.481E+09	.233E-09	.443E-11	.24E-08
TE-131	.121E+10	.190E+10	.270E+10	.691E-10	.165E-11	.40E-10

RYHMÄ ja NUKILIDI	INVENTAARI <sup>a</sup>			ANNOSKERTOIMET <sup>b</sup>		
	(GBq)			PILVI	LASK.	HENG.
	PWR	BWR	RBMK	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-2</sup>	Sv Bq
TE-132	.194E+10	.300E+10	.444E+10	.342E-10	.774E-12	.35E-08
SB-127	.154E+08	.220E+09	.226E+09	.107E-09	.219E-11	.19E-08
SB-129	.451E+09	.660E+09	.122E+10	.235E-09	.450E-11	.17E-09
<b>Strontium</b>						
SR-89	.122E+10	.220E+10	.348E+10	.136E-11	.243E-12	.12E-07
SR-90	.110E+09	.150E+09	.200E+09	.330E-12	.497E-14	.35E-06
SR-91	.151E+10	.270E+10	.407E+10	.114E-09	.236E-11	.27E-09
SR-92	.168E+10	.290E+10	.460E+10	.217E-09	.374E-11	.21E-09
<b>Ruteeni-ryhmä</b>						
CO-58	.198E+08	.315E+08	.289E+08	.158E-09	.308E-11	.17E-08
CO-60	.735E+07	.118E+08	.107E+08	.407E-09	.713E-11	.56E-07
MO-99	.246E+10	.390E+10	.592E+10	.258E-10	.626E-12	.13E-08
TC-99M	.215E+10	.350E+10	.518E+10	.208E-10	.461E-12	.82E-11
RU-103	.219E+10	.310E+10	.500E+10	.760E-10	.156E-11	.25E-08
RU-105	.155E+10	.210E+10	.266E+10	.127E-09	.265E-11	.13E-09
RU-106	.753E+09	.920E+09	.200E+10	.000E+00	.000E+00	.13E-06
RH-105	.141E+10	.190E+10	.181E+10	.125E-10	.265E-12	.15E-09
<b>Lantaani-ryhmä</b>						
Y-90	.115E+09	.160E+09	.260E+09	.226E-11	.385E-12	.26E-08
Y-91	.159E+10	.280E+10	.450E+10	.198E-11	.264E-12	.14E-07
Y-92	.190E+10	.300E+10	.460E+10	.446E-10	.126E-11	.21E-09
Y-93	.205E+10	.340E+10	.520E+10	.179E-10	.713E-12	.62E-09
ZR-95	.224E+10	.370E+10	.555E+10	.120E-09	.234E-11	.63E-08
ZR-97	.224E+10	.360E+10	.555E+10	.311E-10	.832E-12	.13E-08
NB-95	.225E+10	.370E+10	.555E+10	.125E-09	.242E-11	.16E-08
NB-97	.226E+10	.370E+10	.540E+10	.108E-09	.229E-11	.23E-10
LA-140	.245E+10	.390E+10	.592E+10	.385E-09	.688E-11	.97E-09
LA-141	.240E+10	.360E+10	.530E+10	.925E-11	.504E-12	.15E-09
LA-142	.230E+10	.350E+10	.520E+10	.493E-09	.796E-11	.55E-10
PR-143	.201E+10	.344E+10	.481E+10	.623E-12	.716E-13	.25E-08
ND-147	.898E+09	.150E+10	.222E+10	.212E-10	.497E-12	.21E-08
AM-241	.146E+06	.320E+06	.629E+06	.298E-11	.943E-13	.70E-04
CM-242	.583E+08	.180E+09	.259E+08	.162E-13	.311E-14	.35E-05
CM-244	.249E+07	.300E+07	.851E+06	.138E-13	.276E-14	.40E-04
<b>Cerium-ryhmä</b>						
CE-141	.225E+10	.360E+10	.555E+10	.122E-10	.276E-12	.26E-08
CE-143	.204E+10	.340E+10	.481E+10	.421E-10	.103E-11	.11E-08



RYHMÄ ja NUKILIDI	INVENTAARI <sup>a</sup>			ANNOSKERTOIMET <sup>b</sup>		
	(GBq)			PILVI	LASK.	HENG.
	PWR	BWR	RBMK	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> Bq m <sup>-2</sup>	Sv Bq
CE-144	.168E+10	.250E+10	.315E+10	.291E-11	.677E-13	.10E-06
NP-239	.285E+11	.260E+11	.607E+11	.265E-10	.601E-12	.75E-09
PU-238	.327E+07	.220E+07	.211E+07	.145E-13	.287E-14	.61E-04
PU-239	.424E+06	.520E+06	.850E+06	.131E-13	.126E-14	.64E-04
PU-240	.730E+06	.800E+06	.120E+07	.143E-13	.275E-14	.64E-04
PU-241	.171E+09	.220E+09	.170E+09	.000E+00	.000E+00	.93E-06
<b>Barium</b>						
BA-139	.235E+10	.390E+10	.580E+10	.778E-11	.493E-12	.47E-10
BA-140	.236E+10	.380E+10	.592E+10	.299E-10	.680E-12	.11E-08
<b>Tärkeimmät tytärnuklidit jotka eivät sisälly eo. nuklideihin</b>						
RB-88				.118E-09	.239E-11	.26E-10
Y-91M				.839E-10	.172E-11	.10E-10
NB-97M				.118E-09	.232E-11	.19E-10
RH-103M				.322E-13	.371E-14	.13E-11
RH-105M				.457E-11	.116E-12	.00E+00
RH-106				.364E-10	.115E-11	.00E+00
BA-137M				.958E-10	.194E-11	.00E+00
PR-144M				.839E-12	.319E-13	.00E+00
PR-144				.857E-11	.551E-12	.12E-10

<sup>a</sup> Taulukossa esitetyt Loviisan (PWR) ja Olkiluodon (BWR) inventaarit on pääsääntöisesti otettu voimaloiden FSAR-raporteista ja valmiussuunnitelmista. Inventaarit edustavat tilannetta, jossa reaktori on toiminut "kauan" täydellä teholla (ennen 1990-luvun lopun tehokorotusta).

RBMK-reaktorin inventaarille on käytetty useampia, sekalaisia lähteitä (mm. Tshernobyl-onnettomuusreaktoriin liittyviä tietoja). Eräiden nuklidien määrät on arvioitu vastaavan kokoisten kevytvesireaktoreiden inventaarin pohjalta. Kokonaisuudessaan RBMK-reaktorin inventaari kuvaa keskimääräistä käytön aikaista tilannetta.

<sup>b</sup> Pilvi- ja laskeuma-annoskertoimet (efektiivinen annos) on saatu viitteestä 1, hengitysannoskertoimet taas (efektiiviselle annoskertymälle) viitteestä 2. Laskeuma-annoskertoimet kuvaavat tilannetta yhden metrin korkeudella äärettömästä, sileästä tasopinnoista. Pilvi- ja laskeuma-annosmuutokertoimet ovat nuklidikohtaisia eivätkä siis sisällä tytärnuklidien osuutta.

## Viitteet

1. Kocher, D.C. Dose-rate conversion factors for external exposure to photons and electrons. *Health Physics* 45 (1983) 3, 665 - 686.
2. Birchall, A. and Hutton, C.A. Microcomputer program to display committed equivalent organ doses and committed effective doses from intakes of radionuclides. National Radiological Protection Board, Chilton, UK; 1992. NRPB-SR245.

## LIITE II. Loviisa ⇒ Helsinki

### Säteilyseurausanalyysi: Loviisa ⇒ Helsinki

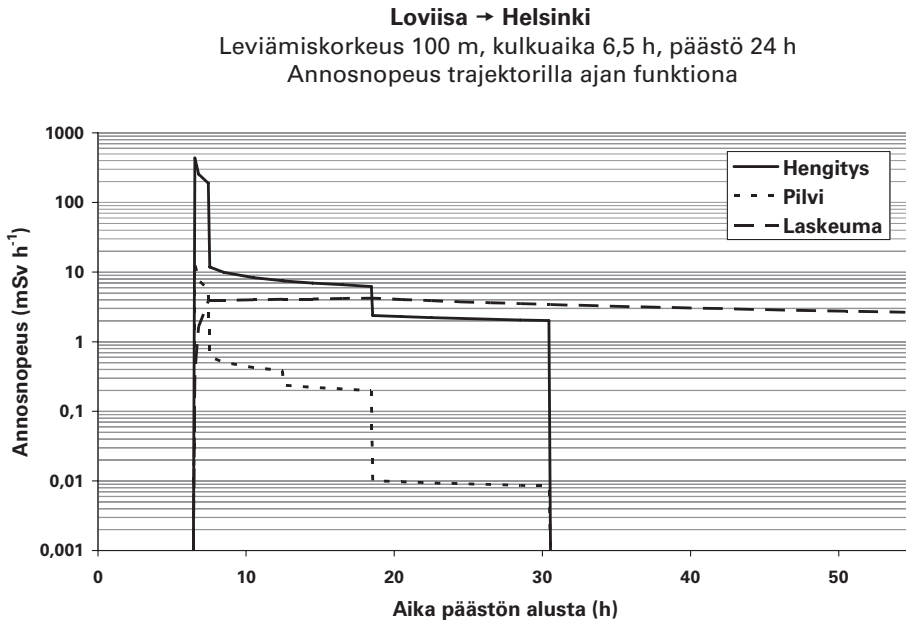
Kuvissa II.1–II.6 ja taulukoissa II.1–II.17 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Loviisa PWR-voimala ja kohde Helsinki. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on kaksi, 100 m ja 500 m. Kuvat ja taulukot on järjestetty siten, että ensin – oheisen taulukon II.1 jälkeen – ovat 100 metrin leviämiskorkeuteen liittyvät tulokset (kuvat II.1–II.3, taulukot II.2–II.9) ja sen jälkeen vastaavat 500 metrin korkeuden tulokset (kuvat II.4–II.6, taulukot II.10–II.17).

Loviisan voimalan etäisyys Helsingistä on noin 70 km. Seurausanalyysilaskut on alun perin tehty liitteessä I esitetylle PWR-reaktorin perusintentaarille (terminen teho 1375 MW; Loviisan reaktorit ennen tehonkorotusta). Kaikki nämä aiemmin lasketut tulokset on yksinkertaisesti kerrottu tekijällä 1,09 vastaamaan nykyistä termistä tehoa 1500 MW.

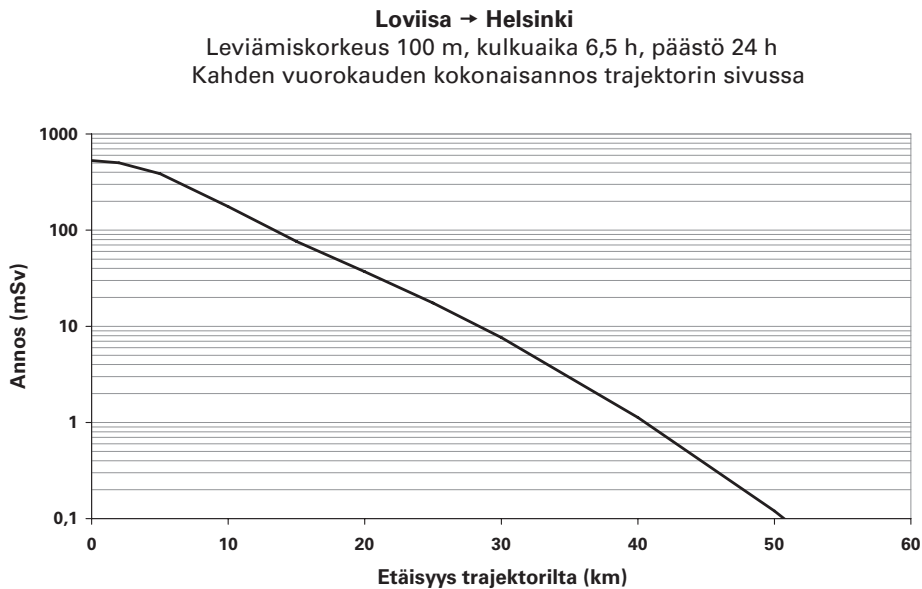
Lähdetermi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

**Taulukko II.1.** Tapaus Loviisa ⇒ Helsinki. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannokset (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
<b>Leviämiskorkeus 100 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	9,5	8,4	15,6	9,1
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	7,8	7,0	13,0	7,6
Kilpirauhasen annos (mGy)	1700	15,0	500	59
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	85	0,75	25	2,9
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	24,0	0,21	7,0	0,82
<b>Leviämiskorkeus 500 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	3,9	3,5	6,5	3,8
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	3,3	2,9	5,4	3,2
Kilpirauhasen annos (mGy)	720	6,2	206	2,4
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	35	0,31	10,3	1,2
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	24,0	0,21	7,0	0,82

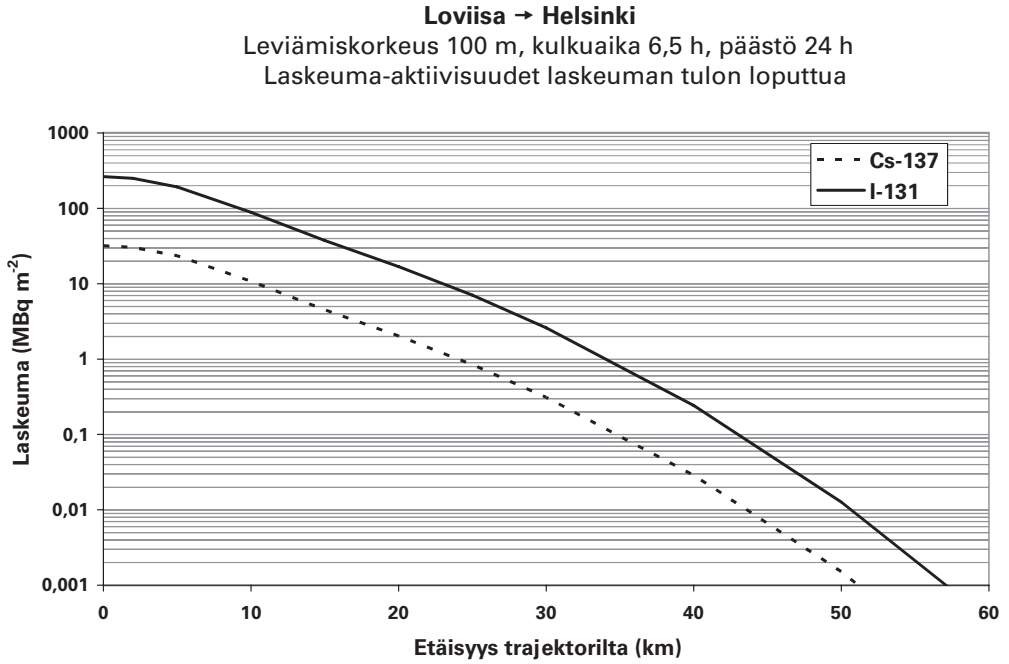


**Kuva II.1.** Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



**Kuva II.2.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengitysannoksen ja ulkoisten annoksien yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva II.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (30,5 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko II.2.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 6.5 h (pilven tulo) – 54.5 h  
Kokonaisannos 527 mSv (hengitys 353, pivi 10.9, laskeuma 163). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-131	8.49E+01	24.01	I-132	2.62E+00	24.01	I-132	6.32E+01	38.68	I-131	1.00E+02	19.04
RU-106	3.89E+01	11.01	I-135	1.99E+00	18.27	I-133	2.26E+01	13.84	I-132	6.66E+01	12.61
CM-242	2.70E+01	7.64	I-133	1.25E+00	11.52	I-131	1.52E+01	9.27	I-133	4.87E+01	9.22
PU-238	2.65E+01	7.48	KR-88	1.25E+00	11.49	I-135	1.21E+01	7.38	RU-106	3.89E+01	7.38
I-133	2.49E+01	7.02	I-131	4.72E-01	4.33	CS-134	1.05E+01	6.45	CM-242	2.70E+01	5.12
CE-144	2.22E+01	6.29	RB-88	4.60E-01	4.22	LA-140	7.14E+00	4.37	PU-238	2.65E+01	5.01
PU-241	2.11E+01	5.97	XE-135	4.43E-01	4.06	TE-132	6.40E+00	3.92	TE-132	2.44E+01	4.63
TE-132	1.79E+01	5.04	CS-134	3.27E-01	3.00	CS-136	4.19E+00	2.56	CS-134	2.39E+01	4.52
SR-90	1.54E+01	4.33	XE-133	2.91E-01	2.67	NP-239	3.10E+00	1.89	CE-144	2.22E+01	4.22
CM-244	1.32E+01	3.74	TE-132	2.09E-01	1.92	BA-137M	2.68E+00	1.64	PU-241	2.11E+01	4.00
CS-134	1.30E+01	3.67	LA-140	1.80E-01	1.65	TE-131M	2.59E+00	1.59	I-135	1.70E+01	3.21
CS-137	6.29E+00	1.78	CS-136	1.41E-01	1.29	RU-103	2.55E+00	1.56	SR-90	1.54E+01	2.90
PU-240	6.18E+00	1.75	TE-131M	1.35E-01	1.23	NB-95	1.38E+00	0.85	CM-244	1.32E+01	2.50
SR-89	5.81E+00	1.64	SB-129	1.28E-01	1.17	ZR-95	1.32E+00	0.80	LA-140	7.70E+00	1.46

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
PU-239	3.61E+00	1.02	NP-239	1.11E-01	1.02	BA-140	1.14E+00	0.70	CS-137	6.30E+00	1.19
TE-127M	3.17E+00	0.90	XE-135M	8.33E-02	0.76	MO-99	8.77E-01	0.54	PU-240	6.18E+00	1.17
Y-91	2.96E+00	0.84	BA-137M	8.06E-02	0.74	RH-106	6.61E-01	0.40	SR-89	6.03E+00	1.14
I-135	2.92E+00	0.82	RU-103	7.91E-02	0.73	TC-99M	6.10E-01	0.37	NP-239	5.82E+00	1.10
NP-239	2.62E+00	0.74	KR-85M	6.15E-02	0.56	SB-129	5.55E-01	0.34	CS-136	4.96E+00	0.94
RU-103	2.17E+00	0.61	KR-87	5.11E-02	0.47	SR-91	4.99E-01	0.31	RU-103	4.80E+00	0.91
ZR-95	1.86E+00	0.53	SR-91	5.11E-02	0.47	NB-97	4.93E-01	0.30	TE-131M	3.88E+00	0.74
AM-241	1.36E+00	0.38	NB-95	4.47E-02	0.41	NB-97M	4.50E-01	0.28	PU-239	3.61E+00	0.68
MO-99	1.19E+00	0.34	I-134	4.41E-02	0.40	CE-143	3.01E-01	0.18	ZR-95	3.23E+00	0.61
TE-131M	1.16E+00	0.33	ZR-95	4.27E-02	0.39	PR-144	2.34E-01	0.14	TE-127M	3.19E+00	0.60
BA-140	1.02E+00	0.29	RU-105	3.40E-02	0.31	Y-91M	2.28E-01	0.14	Y-91	3.07E+00	0.58

**Taulukko II.3.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva II.2). Tarkasteluaikaväli 6.5 - 54.5 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	353	10.9	163	527
2	336	10.4	155	501
5	259	7.99	119	386
10	120	3.63	52.8	176
15	53.2	1.49	21.6	76.3
20	26.7	0.651	9.69	37.0
25	13.1	0.267	4.16	17.5
30	5.91	9.91E-02	1.61	7.62
40	0.938	1.04E-02	0.179	1.13
50	1.05E-01	7.76E-04	1.38E-02	0.120
60	8.19E-03	4.37E-05	8.04E-04	9.03E-03
70	4.25E-04	1.93E-06	3.62E-05	4.63E-04
80	1.44E-05	6.17E-08	1.17E-06	1.56E-05
90	3.12E-07	1.32E-09	2.50E-08	3.38E-07
100	4.32E-09	1.82E-11	3.44E-10	4.68E-09

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko II.4.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva II.1).

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
6.45	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.55	4.37E+05	1.31E+04	374	4.50E+05
6.8	2.55E+05	7.63E+03	1.62E+03	2.65E+05
7.45	1.90E+05	5.66E+03	3.79E+03	1.99E+05
7.55	1.18E+04	602	3.93E+03	1.64E+04
8.5	9.91E+03	507	3.92E+03	1.44E+04
10.5	8.32E+03	425	4.00E+03	1.28E+04
12.45	7.53E+03	385	4.07E+03	1.20E+04
12.55	7.46E+03	237	4.07E+03	1.18E+04
14.5	6.95E+03	221	4.11E+03	1.13E+04
16.5	6.58E+03	209	4.16E+03	1.09E+04
18.45	6.21E+03	197	4.22E+03	1.06E+04
18.55	2.39E+03	10.1	4.22E+03	6.62E+03
20.5	2.30E+03	9.72	4.03E+03	6.34E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
22.5	2.22E+03	9.40	3.88E+03	6.11E+03
24.5	2.16E+03	9.11	3.74E+03	5.91E+03
26.5	2.10E+03	8.87	3.63E+03	5.73E+03
28.5	2.05E+03	8.65	3.52E+03	5.58E+03
30.45	2.01E+03	8.47	3.43E+03	5.44E+03
30.55	0.00E+00	0.00E+00	3.42E+03	3.42E+03
34.5	0.00E+00	0.00E+00	3.25E+03	3.25E+03
38.5	0.00E+00	0.00E+00	3.10E+03	3.10E+03
42.5	0.00E+00	0.00E+00	2.96E+03	2.96E+03
46.5	0.00E+00	0.00E+00	2.84E+03	2.84E+03
50.5	0.00E+00	0.00E+00	2.75E+03	2.75E+03
54.5	0.00E+00	0.00E+00	2.65E+03	2.65E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekkästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko II.5.** Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	4.37E+05	1.31E+04	374	4.50E+05
2	3.50E+05	1.05E+04	300	3.61E+05
5	1.09E+05	3.26E+03	93.2	1.12E+05
10	1.69E+03	50.6	1.45	1.74E+03
15	1.62	4.87E-02	1.40E-03	1.68
20	9.77E-05	2.92E-06	8.35E-08	1.01E-04
25	3.64E-10	1.09E-11	3.12E-13	3.75E-10
30	8.43E-17	2.52E-18	7.22E-20	8.69E-17
40	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekkästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.



**Taulukko II.6.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva II.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	3.19E+07	2.63E+08
2	3.04E+07	2.50E+08
5	2.34E+07	1.93E+08
10	1.07E+07	8.87E+07
15	4.50E+06	3.75E+07
20	2.02E+06	1.69E+07
25	8.41E+05	7.05E+06
30	3.11E+05	2.61E+06
40	2.88E+04	2.42E+05
50	1.50E+03	1.26E+04
60	42.0	353
70	0.611	5.14
80	4.65E-03	3.92E-02
90	1.85E-05	1.56E-04
100	3.84E-08	3.23E-07

**Taulukko II.7.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	9.46E+06
2	7.58E+06
5	2.35E+06
10	3.66E+04
15	35.2
20	2.11E-03
25	7.88E-09
30	1.82E-15
40	0.00E+00

**Taulukko II.8.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	7.86E+06
<sup>132</sup> I	7.00E+06
<sup>133</sup> I	1.30E+07
<sup>135</sup> I	7.62E+06
<sup>106</sup> Ru	3.61E+05
<sup>132</sup> Te	6.13E+06
<sup>144</sup> Ce	2.67E+05
<sup>242</sup> Cm	9.29E+03
<sup>90</sup> Sr	5.26E+04
<sup>238</sup> Pu	521
<sup>241</sup> Pu	2.73E+04

**Taulukko II.9.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

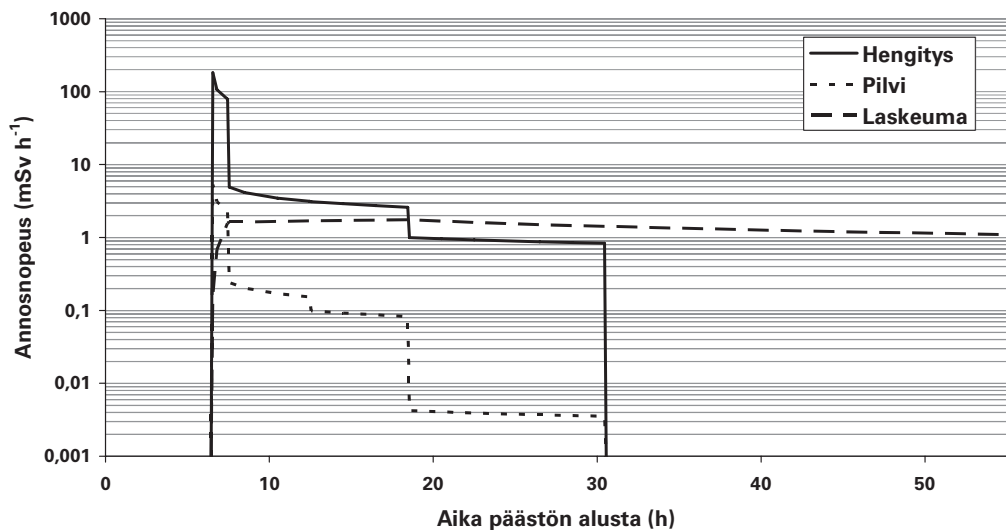
Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h)	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
6.45	0.269	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.55	0.273	1.31E+04	374	1.34E+04	0.662
6.8	0.283	7.63E+03	1.62E+03	9.25E+03	3.14
7.45	0.31	5.66E+03	3.79E+03	9.45E+03	8.80
7.55	0.315	602	3.93E+03	4.53E+03	9.47
12.45	0.519	385	4.07E+03	4.45E+03	31.1
12.55	0.523	237	4.07E+03	4.31E+03	31.5
18.45	0.769	197	4.22E+03	4.41E+03	57.1
18.55	0.773	10.1	4.22E+03	4.23E+03	57.6
30.45	1.269	8.47	3.43E+03	3.43E+03	102
30.55	1.273	0.00E+00	3.42E+03	3.42E+03	103
54.5	2.271	0.00E+00	2.65E+03	2.65E+03	174
78.5	3.271	0.00E+00	2.22E+03	2.22E+03	232
102.5	4.271	0.00E+00	1.93E+03	1.93E+03	282

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
126.5	5.271	0.00E+00	1.71E+03	1.71E+03	326
150.5	6.271	0.00E+00	1.53E+03	1.53E+03	364
174.5	7.271	0.00E+00	1.38E+03	1.38E+03	399
198.5	8.271	0.00E+00	1.26E+03	1.26E+03	431
222.5	9.271	0.00E+00	1.17E+03	1.17E+03	460
246.5	10.271	0.00E+00	1.08E+03	1.08E+03	487
270.5	11.271	0.00E+00	1.01E+03	1.01E+03	512
294.5	12.271	0.00E+00	944	944	535
318.5	13.271	0.00E+00	891	891	557
342.5	14.271	0.00E+00	845	845	579
366.5	15.271	0.00E+00	803	803	598
390.5	16.271	0.00E+00	768	768	617
414.5	17.271	0.00E+00	737	737	635
438.5	18.271	0.00E+00	709	709	652
462.5	19.271	0.00E+00	683	683	669
486.5	20.271	0.00E+00	662	662	686
510.5	21.271	0.00E+00	641	641	701
534.5	22.271	0.00E+00	622	622	716
558.5	23.271	0.00E+00	606	606	730
582.5	24.271	0.00E+00	591	591	744
606.5	25.271	0.00E+00	577	577	759
630.5	26.271	0.00E+00	564	564	773
654.5	27.271	0.00E+00	553	553	786
678.5	28.271	0.00E+00	541	541	799
702.5	29.271	0.00E+00	531	531	812
726.5	30.271	0.00E+00	521	521	825 1 kk
750.5	31.271	0.00E+00	512	512	837
774.5	32.271	0.00E+00	504	504	849
798.5	33.271	0.00E+00	496	496	861
822.5	34.271	0.00E+00	488	488	873
846.5	35.271	0.00E+00	482	482	885
870.5	36.271	0.00E+00	475	475	896
894.5	37.271	0.00E+00	469	469	908
918.5	38.271	0.00E+00	463	463	919
942.5	39.271	0.00E+00	458	458	930
966.5	40.271	0.00E+00	452	452	941
990.5	41.271	0.00E+00	447	447	952
1014.5	42.271	0.00E+00	443	443	962
1038.5	43.271	0.00E+00	438	438	972

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1062.5	44.271	0.00E+00	434	434	983
1086.5	45.271	0.00E+00	429	429	993
1110.5	46.271	0.00E+00	425	425	1.00E+03
1134.5	47.271	0.00E+00	422	422	1.01E+03
1158.5	48.271	0.00E+00	419	419	1.02E+03
1182.5	49.271	0.00E+00	415	415	1.03E+03
1206.5	50.271	0.00E+00	412	412	1.04E+03
1230.5	51.271	0.00E+00	409	409	1.05E+03
1254.5	52.271	0.00E+00	405	405	1.06E+03
1278.5	53.271	0.00E+00	402	402	1.07E+03
1302.5	54.271	0.00E+00	400	400	1.08E+03
1326.5	55.271	0.00E+00	397	397	1.09E+03
1350.5	56.271	0.00E+00	395	395	1.10E+03
1374.5	57.271	0.00E+00	392	392	1.11E+03
1398.5	58.271	0.00E+00	389	389	1.12E+03
1422.5	59.271	0.00E+00	387	387	1.13E+03
1446.5	60.271	0.00E+00	385	385	1.14E+03 2 kk
1470.5	61.271	0.00E+00	383	383	1.14E+03
1494.5	62.271	0.00E+00	380	380	1.16E+03
1518.5	63.271	0.00E+00	379	379	1.17E+03
1542.5	64.271	0.00E+00	377	377	1.18E+03
1566.5	65.271	0.00E+00	375	375	1.19E+03
1590.5	66.271	0.00E+00	374	374	1.20E+03
1614.5	67.271	0.00E+00	372	372	1.20E+03
1638.5	68.271	0.00E+00	370	370	1.21E+03
1662.5	69.271	0.00E+00	368	368	1.22E+03
1686.5	70.271	0.00E+00	366	366	1.23E+03
1710.5	71.271	0.00E+00	365	365	1.24E+03
1734.5	72.271	0.00E+00	364	364	1.24E+03
1758.5	73.271	0.00E+00	362	362	1.25E+03
1782.5	74.271	0.00E+00	361	361	1.26E+03
1806.5	75.271	0.00E+00	360	360	1.28E+03
1830.5	76.271	0.00E+00	358	358	1.29E+03
1854.5	77.271	0.00E+00	356	356	1.29E+03
1878.5	78.271	0.00E+00	355	355	1.30E+03
1902.5	79.271	0.00E+00	354	354	1.31E+03
1926.5	80.271	0.00E+00	353	353	1.32E+03
1950.5	81.271	0.00E+00	352	352	1.32E+03
1974.5	82.271	0.00E+00	351	351	1.33E+03

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1998.5	83.271	0.00E+00	349	349	1.34E+03
2022.5	84.271	0.00E+00	348	348	1.35E+03
2046.5	85.271	0.00E+00	347	347	1.36E+03
2070.5	86.271	0.00E+00	346	346	1.36E+03
2094.5	87.271	0.00E+00	344	344	1.37E+03
2118.5	88.271	0.00E+00	343	343	1.38E+03
2142.5	89.271	0.00E+00	343	343	1.40E+03
2166.5	90.271	0.00E+00	342	342	1.40E+03 3 kk
2190.5	91.271	0.00E+00	341	341	1.41E+03

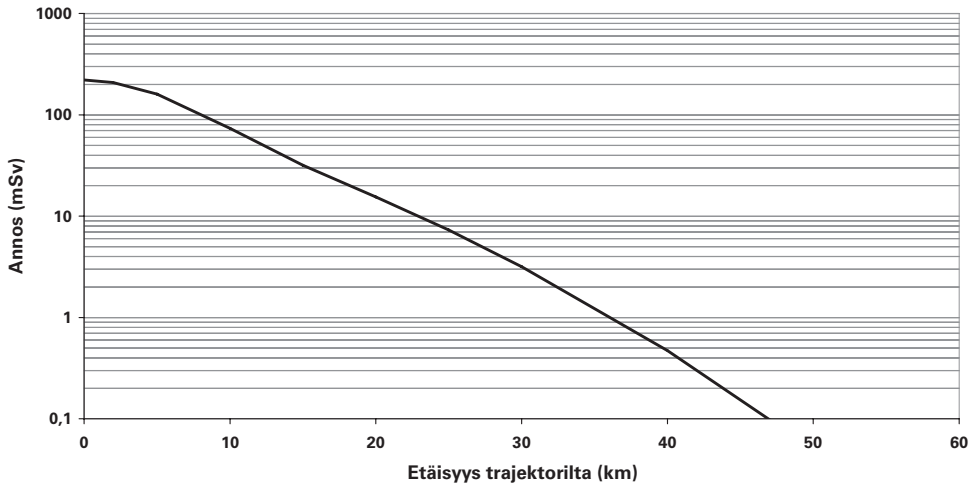
**Loviisa → Helsinki**  
 Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 6,5 h, päästö 24 h  
 Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona



Kuva II.4. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.

**Loviisa → Helsinki**

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 6,5 h, päästö 24 h  
Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa

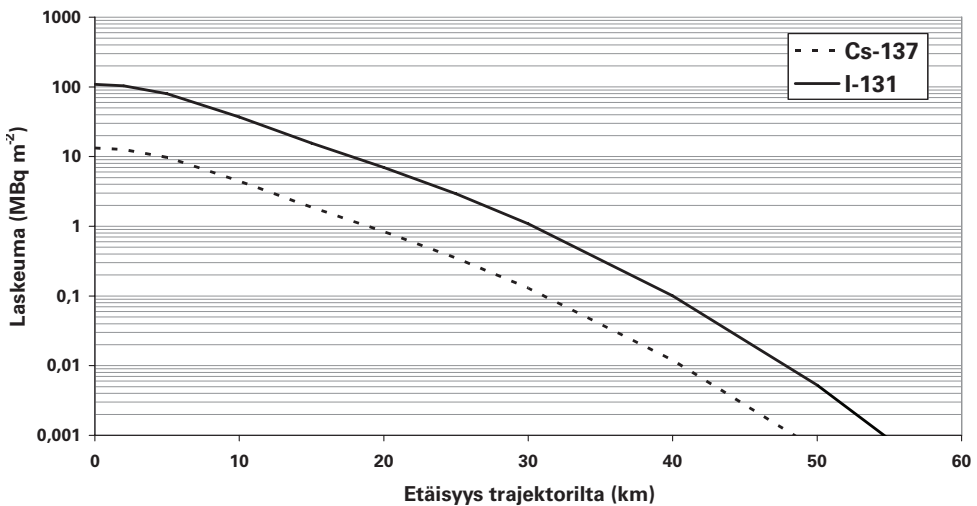


**Kuva II.5.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.

**Loviisa → Helsinki**

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 6,5 h, päästö 24 h  
Laskeuma-aktiivisuudet laskeuman tulo loputtua



**Kuva II.6.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (30,5 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko II.10.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 6.5 h (piiven tulo) – 54.5 h  
Kokonaisannos 220 mSv (hengitys 147, piivi 4.44, laskeuma 67.9). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekkäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-131	3.54E+01	24.01	I-132	1.09E+00	24.56	I-132	2.63E+01	38.68	I-131	4.19E+01	19.06
RU-106	1.62E+01	11.01	I-135	8.31E-01	18.69	I-133	9.38E+00	13.84	I-132	2.77E+01	12.59
CM-242	1.12E+01	7.64	I-133	5.23E-01	11.79	I-131	6.29E+00	9.27	I-133	2.03E+01	9.22
PU-238	1.10E+01	7.48	KR-88	4.70E-01	10.58	I-135	5.01E+00	7.38	RU-106	1.62E+01	7.39
I-133	1.03E+01	7.02	I-131	1.96E-01	4.43	CS-134	4.38E+00	6.45	CM-242	1.12E+01	5.13
CE-144	9.27E+00	6.29	RB-88	1.74E-01	3.92	LA-140	2.96E+00	4.37	PU-238	1.10E+01	5.02
PU-241	8.80E+00	5.97	XE-135	1.69E-01	3.81	TE-132	2.66E+00	3.92	TE-132	1.02E+01	4.63
TE-132	7.42E+00	5.04	CS-134	1.36E-01	3.07	CS-136	1.74E+00	2.56	CS-134	9.92E+00	4.52
SR-90	6.38E+00	4.33	XE-133	1.09E-01	2.46	NP-239	1.29E+00	1.89	CE-144	9.28E+00	4.22
CM-244	5.50E+00	3.74	TE-132	8.73E-02	1.97	BA-137M	1.11E+00	1.64	PU-241	8.80E+00	4.00
CS-134	5.41E+00	3.67	LA-140	7.50E-02	1.69	TE-131M	1.08E+00	1.59	I-135	7.05E+00	3.21
CS-137	2.62E+00	1.78	CS-136	5.88E-02	1.32	RU-103	1.06E+00	1.56	SR-90	6.38E+00	2.91
PU-240	2.57E+00	1.75	TE-131M	5.61E-02	1.26	NB-95	5.76E-01	0.85	CM-244	5.50E+00	2.51
SR-89	2.42E+00	1.64	SB-129	5.30E-02	1.19	ZR-95	5.46E-01	0.80	LA-140	3.20E+00	1.46
PU-239	1.50E+00	1.02	NP-239	4.63E-02	1.04	BA-140	4.76E-01	0.70	CS-137	2.63E+00	1.19
TE-127M	1.32E+00	0.90	XE-135M	3.44E-02	0.78	MO-99	3.64E-01	0.54	PU-240	2.57E+00	1.17
Y-91	1.23E+00	0.84	BA-137M	3.36E-02	0.76	RH-106	2.75E-01	0.40	SR-89	2.51E+00	1.14
I-135	1.21E+00	0.82	RU-103	3.29E-02	0.74	TC-99M	2.54E-01	0.37	NP-239	2.42E+00	1.10
NP-239	1.09E+00	0.74	KR-85M	2.31E-02	0.52	SB-129	2.31E-01	0.34	CS-136	2.06E+00	0.94

HENGITYS		PILVI		LASKEUMA		YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
RU-103	9.03E-01	0.61	SR-91	2.13E-02	0.48	SR-91	2.07E-01	0.31
ZR-95	7.77E-01	0.53	KR-87	1.92E-02	0.43	NB-97	2.05E-01	0.30
AM-241	5.66E-01	0.38	NB-95	1.86E-02	0.42	NB-97M	1.87E-01	0.28
MO-99	4.97E-01	0.34	I-134	1.84E-02	0.41	CE-143	1.24E-01	0.18
TE-131M	4.81E-01	0.33	ZR-95	1.78E-02	0.40	PR-144	9.73E-02	0.14
BA-140	4.24E-01	0.29	RU-105	1.42E-02	0.32	Y-91M	9.46E-02	0.14
						RU-103	1.99E+00	0.91
						TE-131M	1.61E+00	0.74
						PU-239	1.50E+00	0.68
						ZR-95	1.34E+00	0.61
						TE-127M	1.33E+00	0.61
						Y-91	1.28E+00	0.58



**Taulukko II.11.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva II.5). Tarkasteluaikaväli 6.5–54.5 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	147	4.45	67.9	220
2	140	4.22	64.4	208
5	108	3.26	49.3	160
10	49.8	1.48	21.9	73.2
15	22.1	0.610	8.95	31.7
20	11.1	0.267	4.02	15.5
25	5.45	0.110	1.73	7.29
30	2.46	4.10E-02	0.669	3.17
40	0.391	4.33E-03	7.44E-02	0.470
50	4.39E-02	3.23E-04	5.76E-03	5.00E-02
60	3.40E-03	1.82E-05	3.35E-04	3.76E-03
70	1.77E-04	8.02E-07	1.50E-05	1.93E-04
80	5.97E-06	2.56E-08	4.84E-07	6.49E-06
90	1.30E-07	5.49E-10	1.04E-08	1.41E-07
100	1.80E-09	7.59E-12	1.44E-10	1.95E-09

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko II.12.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva II.4).

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
6.45	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.55	1.82E+05	5.32E+03	155	1.87E+05
6.8	1.06E+05	3.11E+03	673	1.10E+05
7.45	7.89E+04	2.30E+03	1.57E+03	8.28E+04
7.55	4.91E+03	241	1.64E+03	6.77E+03
8.5	4.13E+03	203	1.64E+03	5.96E+03
10.5	3.47E+03	170	1.66E+03	5.30E+03
12.45	3.14E+03	154	1.69E+03	4.98E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
12.55	3.11E+03	98.5	1.69E+03	4.89E+03
14.5	2.90E+03	91.9	1.71E+03	4.70E+03
16.5	2.74E+03	87.0	1.73E+03	4.56E+03
18.45	2.59E+03	82.2	1.75E+03	4.43E+03
18.55	996	4.21	1.75E+03	2.75E+03
20.5	958	4.05	1.68E+03	2.64E+03
22.5	925	3.91	1.61E+03	2.54E+03
24.5	898	3.79	1.56E+03	2.45E+03
26.5	874	3.70	1.50E+03	2.39E+03
28.5	853	3.61	1.46E+03	2.32E+03
30.45	835	3.53	1.43E+03	2.27E+03
30.55	0.0	0.0	1.43E+03	1.43E+03
34.5	0.0	0.0	1.35E+03	1.35E+03
38.5	0.0	0.0	1.29E+03	1.29E+03
42.5	0.0	0.0	1.23E+03	1.23E+03
46.5	0.0	0.0	1.18E+03	1.18E+03
50.5	0.0	0.0	1.14E+03	1.14E+03
54.5	0.0	0.0	1.10E+03	1.10E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko II.13.** Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	1.82E+05	5.32E+03	155	1.87E+05
2	1.46E+05	4.26E+03	124	1.50E+05
5	4.53E+04	1.33E+03	38.6	4.68E+04
10	704	20.6	0.598	700
15	0.678	1.98E-02	5.77E-04	0.699
20	4.07E-05	1.19E-06	3.46E-08	4.19E-05
25	1.52E-10	4.43E-12	1.29E-13	1.56E-10
30	3.51E-17	1.03E-18	2.99E-20	3.62E-17
40	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko II.14.** Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m.  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva II.6).

Etäisyys trajektorilta (km)	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	$^{131}\text{I}$ -laskeuma ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
0	1.33E+07	1.09E+08
2	1.26E+07	1.04E+08
5	9.76E+06	8.02E+07
10	4.46E+06	3.70E+07
15	1.87E+06	1.56E+07
20	8.37E+05	7.00E+06
25	3.50E+05	2.93E+06
30	1.30E+05	1.08E+06
40	1.20E+04	1.00E+05
50	626	5.25E+03
60	17.4	146
70	0.254	2.14
80	1.94E-03	1.62E-02
90	7.70E-06	6.46E-05
100	1.59E-08	1.34E-07

**Taulukko II.15.** Loviisa  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m.  $^{131}\text{I}$  -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus ( $\text{Bq m}^{-3}$ )
0	3.93E+06
2	3.15E+06
5	9.81E+05
10	1.53E+04
15	14.7
20	8.79E-04
25	3.27E-09
30	7.59E-16
40	0.00E+00

**Taulukko II.16.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	3.27E+06
<sup>132</sup> I	2.91E+06
<sup>133</sup> I	5.41E+06
<sup>135</sup> I	3.17E+06
<sup>106</sup> Ru	1.50E+05
<sup>132</sup> Te	2.55E+06
<sup>144</sup> Ce	1.11E+05
<sup>242</sup> Cm	3.87E+03
<sup>90</sup> Sr	2.19E+04
<sup>238</sup> Pu	217
<sup>241</sup> Pu	1.13E+04

**Taulukko II.17.** Loviisa ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
6.45	0.269	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.55	0.273	5.32E+03	155	5.47E+03	0.269
6.8	0.283	3.11E+03	673	3.78E+03	1.28
7.45	0.31	2.30E+03	1.57E+03	3.88E+03	3.60
7.55	0.315	241	1.64E+03	1.87E+03	3.87
12.45	0.519	154	1.69E+03	1.84E+03	12.8
12.55	0.523	98.5	1.69E+03	1.79E+03	13.0
18.45	0.769	82.2	1.75E+03	1.83E+03	23.7
18.55	0.773	4.21	1.75E+03	1.75E+03	23.8
30.45	1.269	3.53	1.43E+03	1.43E+03	42.5
30.55	1.273	0.00E+00	1.43E+03	1.43E+03	42.6
54.5	2.271	0.00E+00	1.10E+03	1.10E+03	72.3
78.5	3.271	0.00E+00	924	924	96.5
102.5	4.271	0.00E+00	802	802	117
126.5	5.271	0.00E+00	710	710	135
150.5	6.271	0.00E+00	635	635	152
174.5	7.271	0.00E+00	576	576	166
198.5	8.271	0.00E+00	525	525	179

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
222.5	9.271	0.00E+00	484	484	191
246.5	10.271	0.00E+00	448	448	203
270.5	11.271	0.00E+00	419	419	213
294.5	12.271	0.00E+00	392	392	222
318.5	13.271	0.00E+00	371	371	231
342.5	14.271	0.00E+00	351	351	240
366.5	15.271	0.00E+00	334	334	249
390.5	16.271	0.00E+00	319	319	256
414.5	17.271	0.00E+00	306	306	264
438.5	18.271	0.00E+00	294	294	271
462.5	19.271	0.00E+00	284	284	278
486.5	20.271	0.00E+00	275	275	284
510.5	21.271	0.00E+00	266	266	291
534.5	22.271	0.00E+00	258	258	298
558.5	23.271	0.00E+00	252	252	303
582.5	24.271	0.00E+00	245	245	310
606.5	25.271	0.00E+00	240	240	315
630.5	26.271	0.00E+00	234	234	320
654.5	27.271	0.00E+00	229	229	327
678.5	28.271	0.00E+00	225	225	332
702.5	29.271	0.00E+00	220	220	337
726.5	30.271	0.00E+00	217	217	342 1 kk
750.5	31.271	0.00E+00	213	213	348
774.5	32.271	0.00E+00	209	209	353
798.5	33.271	0.00E+00	206	206	358
822.5	34.271	0.00E+00	203	203	363
846.5	35.271	0.00E+00	201	201	367
870.5	36.271	0.00E+00	197	197	372
894.5	37.271	0.00E+00	195	195	377
918.5	38.271	0.00E+00	192	192	382
942.5	39.271	0.00E+00	190	190	386
966.5	40.271	0.00E+00	187	187	390
990.5	41.271	0.00E+00	185	185	396
1014.5	42.271	0.00E+00	184	184	400
1038.5	43.271	0.00E+00	182	182	404
1062.5	44.271	0.00E+00	180	180	409
1086.5	45.271	0.00E+00	179	179	413
1110.5	46.271	0.00E+00	177	177	416
1134.5	47.271	0.00E+00	175	175	421

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1158.5	48.271	0.00E+00	173	173	425
1182.5	49.271	0.00E+00	172	172	429
1206.5	50.271	0.00E+00	171	171	434
1230.5	51.271	0.00E+00	170	170	438
1254.5	52.271	0.00E+00	168	168	441
1278.5	53.271	0.00E+00	167	167	446
1302.5	54.271	0.00E+00	166	166	450
1326.5	55.271	0.00E+00	165	165	453
1350.5	56.271	0.00E+00	164	164	458
1374.5	57.271	0.00E+00	162	162	461
1398.5	58.271	0.00E+00	161	161	465
1422.5	59.271	0.00E+00	161	161	470
1446.5	60.271	0.00E+00	160	160	473 2 kk
1470.5	61.271	0.00E+00	159	159	477
1494.5	62.271	0.00E+00	158	158	481
1518.5	63.271	0.00E+00	157	157	485
1542.5	64.271	0.00E+00	157	157	488
1566.5	65.271	0.00E+00	156	156	493
1590.5	66.271	0.00E+00	155	155	496
1614.5	67.271	0.00E+00	155	155	499
1638.5	68.271	0.00E+00	154	154	504
1662.5	69.271	0.00E+00	153	153	507
1686.5	70.271	0.00E+00	153	153	510
1710.5	71.271	0.00E+00	152	152	514
1734.5	72.271	0.00E+00	152	152	518
1758.5	73.271	0.00E+00	150	150	521
1782.5	74.271	0.00E+00	149	149	525
1806.5	75.271	0.00E+00	149	149	529
1830.5	76.271	0.00E+00	148	148	532
1854.5	77.271	0.00E+00	148	148	536
1878.5	78.271	0.00E+00	147	147	540
1902.5	79.271	0.00E+00	147	147	543
1926.5	80.271	0.00E+00	146	146	546
1950.5	81.271	0.00E+00	146	146	550
1974.5	82.271	0.00E+00	146	146	554
1998.5	83.271	0.00E+00	145	145	557
2022.5	84.271	0.00E+00	145	145	560
2046.5	85.271	0.00E+00	144	144	564
2070.5	86.271	0.00E+00	144	144	568

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2094.5	87.271	0.00E+00	143	143	571
2118.5	88.271	0.00E+00	143	143	574
2142.5	89.271	0.00E+00	143	143	578
2166.5	90.271	0.00E+00	142	142	581 3 kk
2190.5	91.271	0.00E+00	142	142	584

## LIITE III. Olkiluoto ⇒ Turku

### Säteilyseurausanalyysi: Olkiluoto ⇒ Turku

Kuvissa III.1–III.6 ja taulukoissa III.1–III.17 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Olkiluoto BWR-voimala ja kohde Turku. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on kaksi, 100 m ja 500 m. Kuvat ja taulukot on järjestetty siten, että ensin – oheisen taulukon III.1 jälkeen – ovat 100 metrin leviämiskorkeuteen liittyvät tulokset (kuvat III.1–III.3, taulukot III.2–III.9) ja sen jälkeen vastaavat 500 metrin korkeuden tulokset (kuvat III.4–III.6, taulukot III.10–III.17).

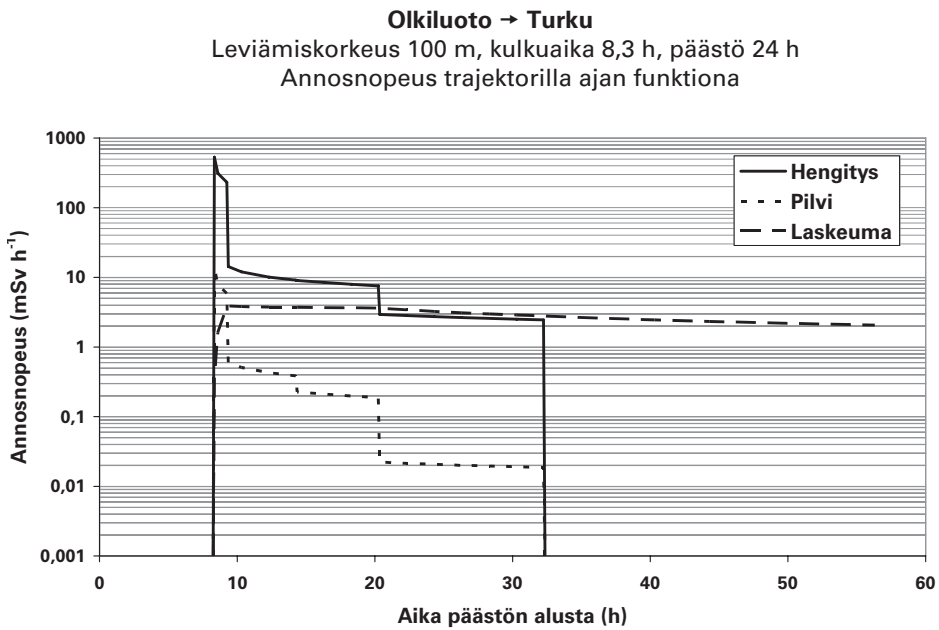
Olkiluodon voimalan etäisyys Turusta on noin 90 km. Seurausanalyysilaskut on alun perin tehty liitteessä I esitetyille BWR-reaktorin perusinventaarille (terminen teho 2160 MW; Olkiluodon reaktorit ennen tehonkorotusta). Kaikki aiemmin lasketut tulokset on yksinkertaisesti kerrottu tekijällä 1,16 vastaamaan nykyistä termistä tehoa 2500 MW.

Lähdetermi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

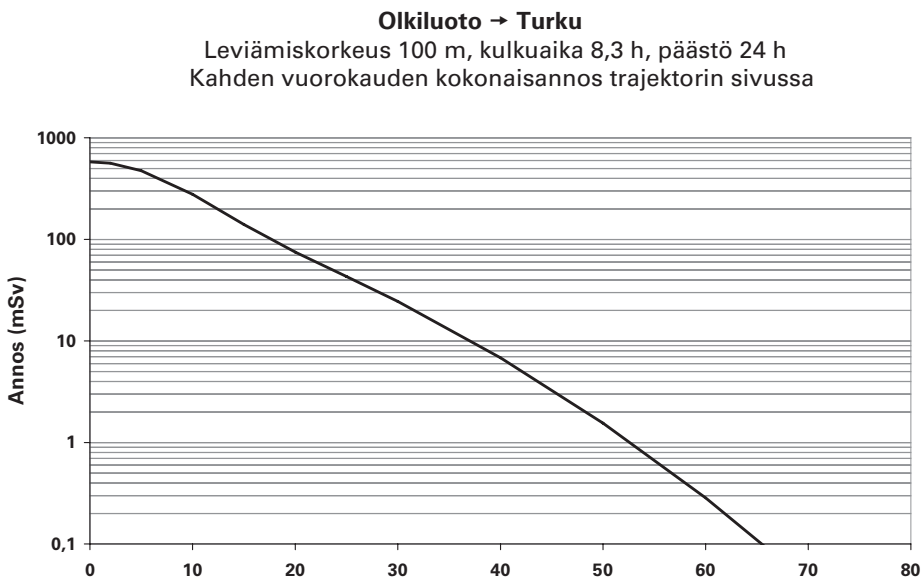
**Taulukko III.1.** Tapaus Olkiluoto ⇒ Turku. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannokset (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
<b>Leviämiskorkeus 100 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	15,4	4,0	24,7	12,8
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	12,7	3,3	20,6	10,6
Kilpirauhasen annos (mGy)	2760	7,2	790	80
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	138	0,36	39	4,0
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	31,9	0,08	9,1	0,95
<b>Leviämiskorkeus 500 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	6,4	1,7	10,3	5,3
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	5,3	1,4	8,6	4,4
Kilpirauhasen annos (mGy)	1160	3,0	328	34
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	57	0,15	16,4	1,7
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	31,9	0,08	9,1	0,95



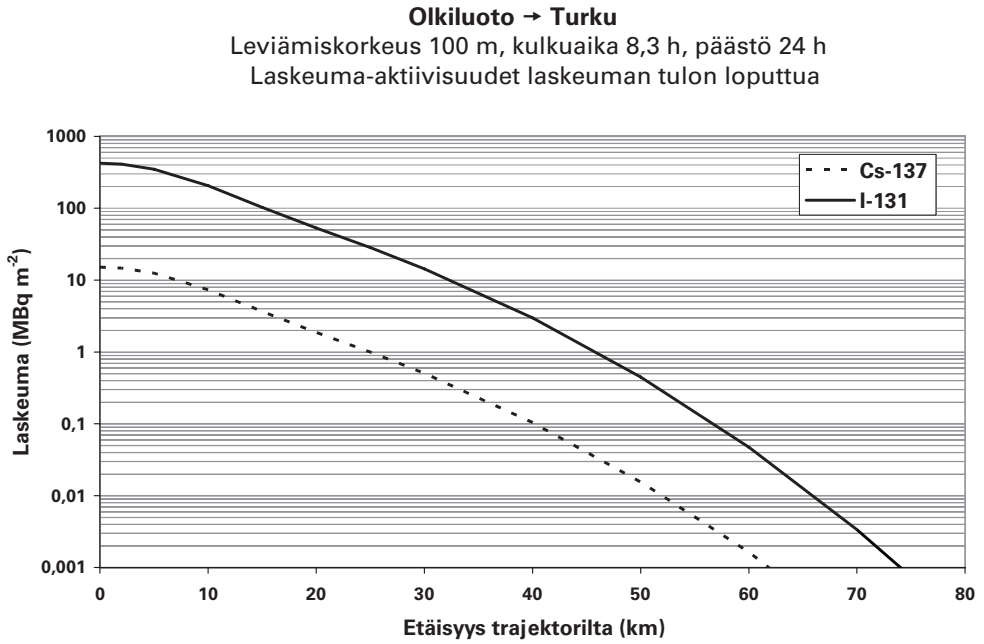


Kuva III.1. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



Kuva III.2. Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityspanoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva III.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (32,3 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko III.2.** Oikiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nukliidit.

Integrointi välillä 8.3 h (pilven tulo) – 56.3 h  
 Kokonaisannos 578 mSv (hengitys 430, pivi 11.2, laskeuma 137). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.
I-131	1.38E+02	31.94	I-135	2.79E+00	24.79	I-133	3.59E+01	26.18	I-131	1.63E+02	28.12
CM-242	6.99E+01	16.21	I-133	1.99E+00	17.75	I-131	2.44E+01	17.86	I-133	7.72E+01	13.34
I-133	3.93E+01	9.14	I-132	1.24E+00	11.00	I-132	1.97E+01	14.37	CM-242	6.99E+01	12.07
SR-90	2.90E+01	6.75	KR-88	1.23E+00	10.96	I-135	1.69E+01	12.31	SR-90	2.90E+01	5.02
CE-144	2.78E+01	6.44	I-131	7.66E-01	6.81	LA-140	1.40E+01	10.22	CE-144	2.78E+01	4.8
PU-241	2.28E+01	5.28	XE-135	7.61E-01	6.78	CS-134	3.74E+00	2.73	I-135	2.37E+01	4.09
PU-238	1.49E+01	3.46	RB-88	4.54E-01	4.03	BA-140	2.57E+00	1.87	PU-241	2.28E+01	3.93
SR-89	1.46E+01	3.39	XE-133	3.82E-01	3.4	NP-239	2.30E+00	1.68	I-132	2.13E+01	3.67
CM-244	1.33E+01	3.1	LA-140	3.03E-01	2.7	NB-95	1.91E+00	1.39	SR-89	1.52E+01	2.62
RU-106	1.33E+01	3.09	XE-135M	1.16E-01	1.03	TE-132	1.89E+00	1.38	LA-140	1.49E+01	2.58
PU-240	5.68E+00	1.32	CS-134	1.16E-01	1.03	ZR-95	1.82E+00	1.33	PU-238	1.49E+01	2.58
TE-132	5.40E+00	1.25	SR-91	1.12E-01	1.00	CS-136	1.77E+00	1.29	CM-244	1.33E+01	2.31
CS-134	4.62E+00	1.07	NP-239	8.31E-02	0.74	BA-137M	1.27E+00	0.93	RU-106	1.33E+01	2.3
Y-91	4.40E+00	1.02	BA-140	7.44E-02	0.66	SR-91	1.09E+00	0.8	CS-134	8.47E+00	1.46

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-135	4.07E+00	0.95	KR-85M	6.94E-02	0.62	RU-103	1.01E+00	0.74	TE-132	7.36E+00	1.27
PU-239	3.70E+00	0.86	TE-132	6.36E-02	0.57	TE-131M	7.24E-01	0.53	PU-240	5.68E+00	0.98
CS-137	2.97E+00	0.69	NB-95	6.16E-02	0.55	NB-97	6.17E-01	0.45	BA-140	4.92E+00	0.85
ZR-95	2.58E+00	0.6	CS-136	5.97E-02	0.53	NB-97M	5.63E-01	0.41	Y-91	4.56E+00	0.79
AM-241	2.49E+00	0.58	ZR-95	5.91E-02	0.53	SR-89	5.59E-01	0.41	ZR-95	4.45E+00	0.77
BA-140	2.28E+00	0.53	Y-91M	5.15E-02	0.46	Y-91M	4.99E-01	0.36	NP-239	4.35E+00	0.75
NP-239	1.96E+00	0.45	SR-92	5.02E-02	0.45	SB-127	4.10E-01	0.3	PU-239	3.70E+00	0.64
CE-141	1.04E+00	0.24	NB-97	3.97E-02	0.35	CE-143	4.04E-01	0.3	CS-137	2.99E+00	0.51
PR-143	9.55E-01	0.22	NB-97M	3.92E-02	0.35	MO-99	3.79E-01	0.28	NB-95	2.63E+00	0.45
RU-103	8.57E-01	0.2	TE-131M	3.84E-02	0.34	PR-144	2.92E-01	0.21	AM-241	2.49E+00	0.43
NB-95	6.58E-01	0.15	BA-137M	3.81E-02	0.34	TC-99M	2.66E-01	0.19	CS-136	2.09E+00	0.36

**Taulukko III.3.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva III.2). Tarkasteluaikaväli 8.3 – 56.3 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	430	11.2	137	578
2	418	10.9	132	561
5	354	9.22	112	474
10	208	5.40	64.2	278
15	106	2.67	31.2	140
20	57.6	1.35	16.0	75.0
25	33.7	0.716	8.82	43.2
30	19.3	0.367	4.79	24.5
40	5.52	8.24E-02	1.20	6.81
50	1.28	1.54E-02	0.248	1.55
60	0.241	2.41E-03	4.18E-02	0.285
70	3.59E-02	3.14E-04	5.77E-03	4.20E-02
80	4.22E-03	3.39E-05	6.49E-04	4.91E-03
90	3.84E-04	2.97E-06	5.79E-05	4.44E-04
100	2.67E-05	2.04E-07	3.99E-06	3.09E-05

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko III.4.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva III.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
8.25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.35	5.33E+05	1.35E+04	371	5.47E+05
8.6	3.11E+05	7.88E+03	1.62E+03	3.22E+05
9.25	2.31E+05	5.84E+03	3.75E+03	2.41E+05
9.35	1.42E+04	604	3.89E+03	1.87E+04
10.3	1.20E+04	509	3.81E+03	1.63E+04
12.3	1.01E+04	427	3.75E+03	1.42E+04
14.25	9.14E+03	386	3.71E+03	1.32E+04
14.35	9.05E+03	226	3.71E+03	1.30E+04
16.3	8.43E+03	211	3.67E+03	1.23E+04
18.3	7.98E+03	199	3.64E+03	1.18E+04
20.25	7.54E+03	187	3.63E+03	1.14E+04
20.35	2.94E+03	22.2	3.62E+03	6.57E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
22.3	2.82E+03	21.4	3.41E+03	6.26E+03
24.3	2.73E+03	20.7	3.24E+03	5.99E+03
26.3	2.65E+03	20.0	3.10E+03	5.77E+03
28.3	2.58E+03	19.6	2.99E+03	5.58E+03
30.3	2.51E+03	19.1	2.88E+03	5.41E+03
32.25	2.45E+03	18.6	2.80E+03	5.28E+03
32.35	0.00E+00	0.00E+00	2.79E+03	2.79E+03
36.3	0.00E+00	0.00E+00	2.60E+03	2.60E+03
40.3	0.00E+00	0.00E+00	2.45E+03	2.45E+03
44.3	0.00E+00	0.00E+00	2.33E+03	2.33E+03
48.3	0.00E+00	0.00E+00	2.23E+03	2.23E+03
52.3	0.00E+00	0.00E+00	2.14E+03	2.14E+03
56.3	0.00E+00	0.00E+00	2.07E+03	2.07E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko III.5.** Oikiluoto  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	5.33E+05	1.35E+04	371	5.47E+05
2	4.64E+05	1.18E+04	323	4.77E+05
5	2.24E+05	5.69E+03	156	2.30E+05
10	1.68E+04	425	11.7	1.71E+04
15	221	5.6	0.154	227
20	0.515	1.31E-02	3.59E-04	0.529
25	2.13E-04	5.40E-06	1.48E-07	2.19E-04
30	1.56E-08	3.96E-10	1.09E-11	1.60E-08
40	4.64E-19	1.18E-20	3.23E-22	4.76E-19
50	1.35E-32	3.44E-34	9.44E-36	1.39E-32
60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko III.6.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m.  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva III.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	$^{131}\text{I}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	1.52E+07	4.25E+08
2	1.47E+07	4.12E+08
5	1.25E+07	3.49E+08
10	7.30E+06	2.06E+08
15	3.64E+06	1.03E+08
20	1.86E+06	5.30E+07
25	9.89E+05	2.82E+07
30	5.03E+05	1.43E+07
40	1.04E+05	2.97E+06
50	1.55E+04	4.47E+05
60	1.63E+03	4.71E+04
70	116	3.38E+03
80	5.54	165
90	0.176	5.67
100	3.73E-03	0.150

**Taulukko III.7.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m.  $^{131}\text{I}$  -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	1.54E+07
2	1.34E+07
5	6.48E+06
10	4.82E+05
15	6.36E+03
20	14.8
25	6.14E-03
30	4.50E-07
40	1.34E-17
50	3.91E-31
60	0.00E+00

**Taulukko III.8.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	1.27E+07
<sup>132</sup> I	3.30E+06
<sup>133</sup> I	2.06E+07
<sup>135</sup> I	1.06E+07
<sup>242</sup> Cm	2.39E+04
<sup>244</sup> Cm	401
<sup>88</sup> Sr	1.46E+06
<sup>90</sup> Sr	1.00E+05
<sup>144</sup> Ce	3.33E+05
<sup>238</sup> Pu	294
<sup>241</sup> Pu	2.94E+04

**Taulukko III.9.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
8.25	0.344	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.35	0.348	1.35E+04	371	1.39E+04	0.684
8.6	0.358	7.88E+03	1.62E+03	9.50E+03	3.23
9.25	0.385	5.84E+03	3.75E+03	9.59E+03	9.01
9.35	0.39	604	3.89E+03	4.49E+03	9.70
14.25	0.594	386	3.71E+03	4.11E+03	30.3
14.35	0.598	226	3.71E+03	3.93E+03	30.7
20.25	0.844	187	3.63E+03	3.82E+03	53.3
20.35	0.848	22.2	3.62E+03	3.64E+03	53.8
32.25	1.344	18.6	2.80E+03	2.81E+03	91.3
32.35	1.348	0.00E+00	2.79E+03	2.79E+03	91.6
56.3	2.346	0.00E+00	2.07E+03	2.07E+03	148
80.3	3.346	0.00E+00	1.76E+03	1.76E+03	193
104.3	4.346	0.00E+00	1.57E+03	1.57E+03	234
128.3	5.346	0.00E+00	1.45E+03	1.45E+03	270
152.3	6.346	0.00E+00	1.34E+03	1.34E+03	303
176.3	7.346	0.00E+00	1.25E+03	1.25E+03	334
200.3	8.346	0.00E+00	1.17E+03	1.17E+03	363
224.3	9.346	0.00E+00	1.10E+03	1.10E+03	391

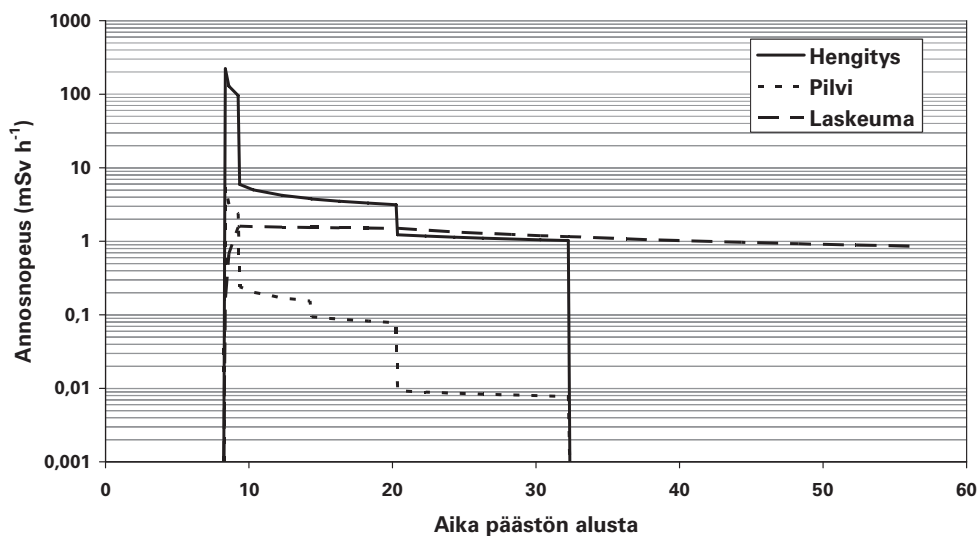


Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
248.3	10.346	0.00E+00	1.04E+03	1.04E+03	417
272.3	11.346	0.00E+00	978	978	441
296.3	12.346	0.00E+00	923	923	464
320.3	13.346	0.00E+00	874	874	485
344.3	14.346	0.00E+00	828	828	506
368.3	15.346	0.00E+00	787	787	525
392.3	16.346	0.00E+00	749	749	544
416.3	17.346	0.00E+00	714	714	561
440.3	18.346	0.00E+00	680	680	577
464.3	19.346	0.00E+00	650	650	594
488.3	20.346	0.00E+00	622	622	609
512.3	21.346	0.00E+00	596	596	624
536.3	22.346	0.00E+00	572	572	638
560.3	23.346	0.00E+00	550	550	651
584.3	24.346	0.00E+00	528	528	664
608.3	25.346	0.00E+00	508	508	676
632.3	26.346	0.00E+00	489	489	688
656.3	27.346	0.00E+00	472	472	700
680.3	28.346	0.00E+00	456	456	710
704.3	29.346	0.00E+00	441	441	722
728.3	30.346	0.00E+00	427	427	732 1 kk
752.3	31.346	0.00E+00	413	413	742
776.3	32.346	0.00E+00	400	400	752
800.3	33.346	0.00E+00	389	389	761
824.3	34.346	0.00E+00	377	377	771
848.3	35.346	0.00E+00	367	367	780
872.3	36.346	0.00E+00	358	358	788
896.3	37.346	0.00E+00	347	347	797
920.3	38.346	0.00E+00	339	339	805
944.3	39.346	0.00E+00	331	331	813
968.3	40.346	0.00E+00	323	323	820
992.3	41.346	0.00E+00	315	315	828
1016.3	42.346	0.00E+00	308	308	835
1040.3	43.346	0.00E+00	301	301	843
1064.3	44.346	0.00E+00	295	295	850
1088.3	45.346	0.00E+00	288	288	857
1112.3	46.346	0.00E+00	283	283	864
1136.3	47.346	0.00E+00	278	278	871
1160.3	48.346	0.00E+00	272	272	877

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1184.3	49.346	0.00E+00	267	267	884
1208.3	50.346	0.00E+00	263	263	891
1232.3	51.346	0.00E+00	258	258	897
1256.3	52.346	0.00E+00	255	255	902
1280.3	53.346	0.00E+00	250	250	908
1304.3	54.346	0.00E+00	246	246	915
1328.3	55.346	0.00E+00	243	243	921
1352.3	56.346	0.00E+00	239	239	927
1376.3	57.346	0.00E+00	236	236	933
1400.3	58.346	0.00E+00	233	233	937
1424.3	59.346	0.00E+00	229	229	943
1448.3	60.346	0.00E+00	227	227	949 2 kk
1472.3	61.346	0.00E+00	223	223	955
1496.3	62.346	0.00E+00	221	221	959
1520.3	63.346	0.00E+00	219	219	965
1544.3	64.346	0.00E+00	216	216	970
1568.3	65.346	0.00E+00	214	214	975
1592.3	66.346	0.00E+00	212	212	980
1616.3	67.346	0.00E+00	209	209	986
1640.3	68.346	0.00E+00	207	207	990
1664.3	69.346	0.00E+00	205	205	995
1688.3	70.346	0.00E+00	204	204	1.00E+03
1712.3	71.346	0.00E+00	201	201	1.01E+03
1736.3	72.346	0.00E+00	199	199	1.01E+03
1760.3	73.346	0.00E+00	198	198	1.01E+03
1784.3	74.346	0.00E+00	197	197	1.02E+03
1808.3	75.346	0.00E+00	194	194	1.02E+03
1832.3	76.346	0.00E+00	193	193	1.03E+03
1856.3	77.346	0.00E+00	191	191	1.03E+03
1880.3	78.346	0.00E+00	190	190	1.04E+03
1904.3	79.346	0.00E+00	189	189	1.04E+03
1928.3	80.346	0.00E+00	187	187	1.05E+03
1952.3	81.346	0.00E+00	186	186	1.05E+03
1976.3	82.346	0.00E+00	185	185	1.06E+03
2000.3	83.346	0.00E+00	184	184	1.06E+03
2024.3	84.346	0.00E+00	182	182	1.06E+03
2048.3	85.346	0.00E+00	180	180	1.07E+03
2072.3	86.346	0.00E+00	179	179	1.07E+03
2096.3	87.346	0.00E+00	179	179	1.08E+03

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2120.3	88.346	0.00E+00	178	178	1.08E+03
2144.3	89.346	0.00E+00	177	177	1.09E+03
2168.3	90.346	0.00E+00	176	176	1.09E+03 3 kk
2192.3	91.346	0.00E+00	175	175	1.09E+03

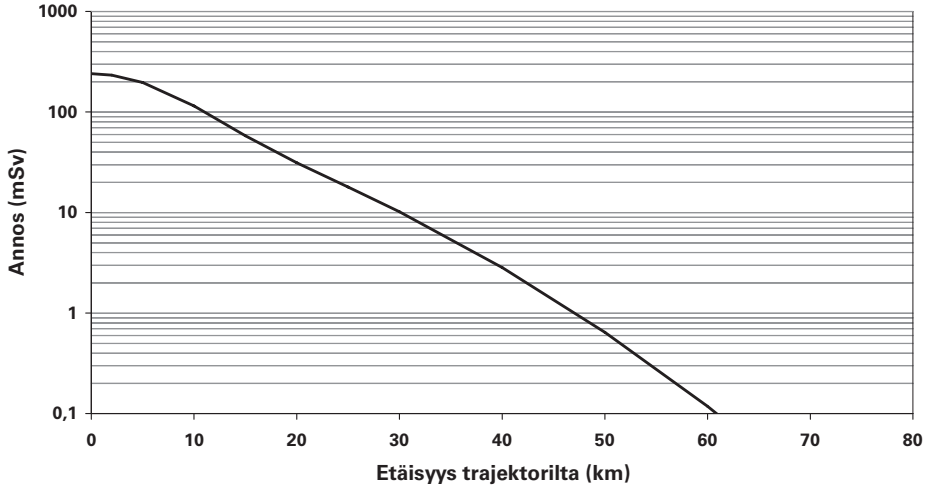
**Olkiluoto → Turku**  
 Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 8,3 h, päästö 24 h  
 Annosnopeus trajektorilla ajan funktiona



Kuva III.4. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.

## Olkiluoto → Turku

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 8,3 h, päästö 24 h  
Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa

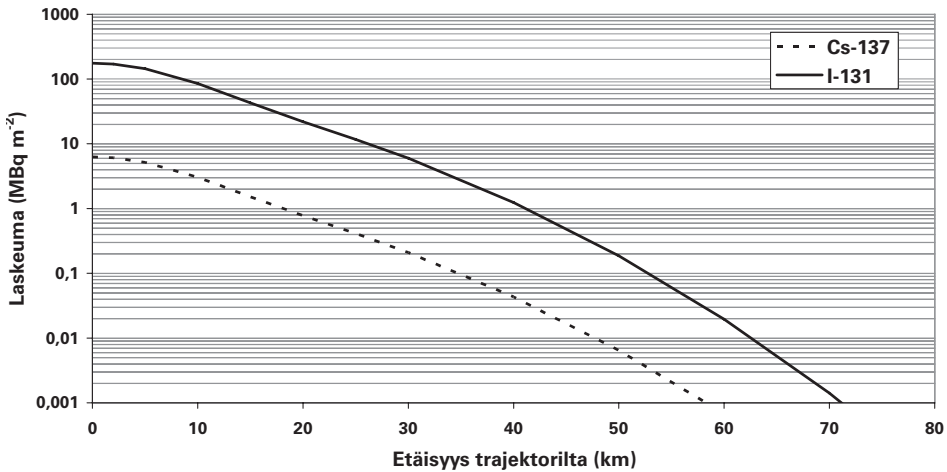


**Kuva III.5.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengitysannoksen ja ulkoisten annoksien yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.

## Olkiluoto → Turku

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 8,3 h, päästö 24 h  
Laskeuma-aktiivisuudet laskeuman tulon loputtua



**Kuva III.6.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (32,3 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko III.10.** Oikiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksilln vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 8.3 h (pilven tulo) – 56.3 h  
 Kokonaisannos 240 mSv (hengitys 179, piivi 4.56, laskeuma 56.9). Huomi! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-131	5.73E+01	31.94	I-135	1.16E+00	25.42	I-133	1.49E+01	26.18	I-131	6.78E+01	28.14
CM-242	2.90E+01	16.21	I-133	8.30E-01	18.2	I-131	1.02E+01	17.86	I-133	3.22E+01	13.34
I-133	1.64E+01	9.14	I-132	5.14E-01	11.28	I-132	8.17E+00	14.37	CM-242	2.90E+01	12.08
SR-90	1.21E+01	6.75	KR-88	4.62E-01	10.11	I-135	7.00E+00	12.31	SR-90	1.21E+01	5.03
CE-144	1.15E+01	6.44	I-131	3.18E-01	6.99	LA-140	5.81E+00	10.22	CE-144	1.16E+01	4.8
PU-241	9.46E+00	5.28	XE-135	2.92E-01	6.39	CS-134	1.56E+00	2.73	I-135	9.86E+00	4.09
PU-238	6.21E+00	3.46	RB-88	1.71E-01	3.75	BA-140	1.06E+00	1.87	PU-241	9.46E+00	3.93
SR-89	6.07E+00	3.39	XE-133	1.43E-01	3.14	NP-239	9.58E-01	1.69	I-132	8.84E+00	3.67
CM-244	5.55E+00	3.1	LA-140	1.26E-01	2.77	NB-95	7.91E-01	1.39	SR-89	6.31E+00	2.62
RU-106	5.53E+00	3.09	CS-134	4.84E-02	1.06	TE-132	7.84E-01	1.38	PU-238	6.21E+00	2.58
PU-240	2.38E+00	1.32	XE-135M	4.81E-02	1.06	ZR-95	7.58E-01	1.33	LA-140	6.20E+00	2.58
TE-132	2.24E+00	1.25	SR-91	4.68E-02	1.02	CS-136	7.36E-01	1.29	CM-244	5.55E+00	2.31
CS-134	1.92E+00	1.07	NP-239	3.46E-02	0.76	BA-137M	5.26E-01	0.93	RU-106	5.53E+00	2.3
Y-91	1.83E+00	1.02	BA-140	3.10E-02	0.68	SR-91	4.54E-01	0.8	CS-134	3.52E+00	1.46
I-135	1.70E+00	0.95	TE-132	2.65E-02	0.58	RU-103	4.19E-01	0.74	TE-132	3.07E+00	1.27
PU-239	1.54E+00	0.86	KR-85M	2.60E-02	0.57	TE-131M	3.01E-01	0.53	PU-240	2.36E+00	0.98
CS-137	1.24E+00	0.69	NB-95	2.57E-02	0.56	NB-97	2.56E-01	0.45	BA-140	2.05E+00	0.85

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
ZR-95	1.07E+00	0.6	CS-136	2.49E-02	0.54	NB-97M	2.34E-01	0.41	Y-91	1.90E+00	0.79
AM-241	1.04E+00	0.58	ZR-95	2.46E-02	0.54	SR-89	2.33E-01	0.41	ZR-95	1.85E+00	0.77
BA-140	9.46E-01	0.53	Y-91M	2.14E-02	0.47	Y-91M	2.07E-01	0.36	NP-239	1.80E+00	0.75
NP-239	8.18E-01	0.45	SR-92	2.09E-02	0.46	SB-127	1.70E-01	0.3	PU-239	1.54E+00	0.64
CE-141	4.32E-01	0.24	NB-97	1.65E-02	0.36	CE-143	1.68E-01	0.3	CS-137	1.24E+00	0.52
PR-143	3.97E-01	0.22	NB-97M	1.63E-02	0.36	MO-99	1.57E-01	0.28	NB-95	1.09E+00	0.45
RU-103	3.56E-01	0.2	TE-131M	1.60E-02	0.35	PR-144	1.21E-01	0.21	AM-241	1.04E+00	0.43
NB-95	2.74E-01	0.15	BA-137M	1.59E-02	0.35	TC-99M	1.10E-01	0.19	CS-136	8.71E-01	0.36

**Taulukko III.11.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva III.5). Tarkasteluvaikaväli 8.3 - 56.3 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	179	4.56	56.9	240
2	174	4.42	55.0	233
5	147	3.75	46.4	197
10	86.3	2.20	26.6	115
15	44.1	1.09	13.0	58
20	23.9	0.553	6.65	31.2
25	14.0	0.293	3.67	17.9
30	8.06	0.150	1.99	10.2
40	2.30	3.40E-02	0.502	2.83
50	0.535	6.40E-03	0.103	0.644
60	0.100	1.00E-03	1.74E-02	0.118
70	1.49E-02	1.31E-04	2.41E-03	1.75E-02
80	1.76E-03	1.41E-05	2.70E-04	2.05E-03
90	1.60E-04	1.24E-06	2.41E-05	1.85E-04
100	1.11E-05	8.48E-08	1.65E-06	1.28E-05

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko III.12.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva III.4).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
8.25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.35	2.22E+05	5.48E+03	154	2.28E+05
8.6	1.30E+05	3.20E+03	668	1.33E+05
9.25	9.61E+04	2.37E+03	1.55E+03	1.00E+05
9.35	5.94E+03	241	1.61E+03	7.79E+03
10.3	5.01E+03	202	1.59E+03	6.79E+03
12.3	4.20E+03	170	1.56E+03	5.92E+03
14.25	3.81E+03	154	1.54E+03	5.50E+03
14.35	3.76E+03	93.6	1.54E+03	5.40E+03
16.3	3.51E+03	87.2	1.53E+03	5.13E+03
18.3	3.32E+03	82.5	1.52E+03	4.92E+03
20.25	3.14E+03	78.0	1.50E+03	4.72E+03
20.35	1.23E+03	9.26	1.50E+03	2.73E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
22.3	1.18E+03	8.91	1.42E+03	2.60E+03
24.3	1.14E+03	8.61	1.34E+03	2.49E+03
26.3	1.10E+03	8.35	1.28E+03	2.39E+03
28.3	1.07E+03	8.13	1.24E+03	2.31E+03
30.3	1.05E+03	7.94	1.19E+03	2.26E+03
32.25	1.02E+03	7.76	1.16E+03	2.20E+03
32.35	0.00E+00	0.00E+00	1.16E+03	1.16E+03
36.3	0.00E+00	0.00E+00	1.08E+03	1.08E+03
40.3	0.00E+00	0.00E+00	1.02E+03	1.02E+03
44.3	0.00E+00	0.00E+00	968	968
48.3	0.00E+00	0.00E+00	926	926
52.3	0.00E+00	0.00E+00	890	890
56.3	0.00E+00	0.00E+00	858	858

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko III.13.** Oikiluoto  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	2.22E+05	5.48E+03	154	2.28E+05
2	1.93E+05	4.78E+03	134	1.98E+05
5	9.35E+04	2.30E+03	64.8	9.58E+04
10	6.97E+03	172	4.82	7.14E+03
15	91.9	2.27	0.064	94.2
20	0.214	5.30E-03	1.48E-04	0.22
25	8.87E-05	2.19E-06	6.14E-08	9.09E-05
30	6.49E-09	1.61E-10	4.50E-12	6.66E-09
40	1.93E-19	4.77E-21	1.34E-22	1.98E-19
50	5.65E-33	1.40E-34	3.91E-36	5.80E-33
60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.



**Taulukko III.14.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva III.6).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	6.28E+06	1.76E+08
2	6.09E+06	1.70E+08
5	5.16E+06	1.45E+08
10	3.03E+06	8.53E+07
15	1.52E+06	4.28E+07
20	7.74E+05	2.20E+07
25	4.11E+05	1.17E+07
30	2.09E+05	5.98E+06
40	4.32E+04	1.24E+06
50	6.46E+03	1.86E+05
60	678	1.96E+04
70	48.2	1.41E+03
80	2.30	68.8
90	7.31E-02	2.36
100	1.55E-03	6.26E-02

**Taulukko III.15.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	6.39E+06
2	5.57E+06
5	2.68E+06
10	2.00E+05
15	2.64E+03
20	6.17
25	2.55E-03
30	1.86E-07
40	5.55E-18
50	1.62E-31
60	0.00E+00

**Taulukko III.16.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	5.30E+06
<sup>132</sup> I	1.38E+06
<sup>133</sup> I	8.57E+06
<sup>135</sup> I	4.43E+06
<sup>242</sup> Cm	9.98E+03
<sup>244</sup> Cm	166
<sup>89</sup> Sr	6.08E+05
<sup>90</sup> Sr	4.15E+04
<sup>144</sup> Ce	1.39E+05
<sup>238</sup> Pu	122
<sup>241</sup> Pu	1.22E+04

**Taulukko III.17.** Olkiluoto ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
8.25	0.344	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.35	0.348	5.48E+03	154	5.63E+03	0.278
8.6	0.358	3.20E+03	668	3.88E+03	1.32
9.25	0.385	2.37E+03	1.55E+03	3.93E+03	3.68
9.35	0.39	241	1.61E+03	1.85E+03	3.96
14.25	0.594	154	1.54E+03	1.70E+03	12.5
14.35	0.598	93.6	1.54E+03	1.63E+03	12.6
20.25	0.844	78.0	1.50E+03	1.59E+03	22.1
20.35	0.848	9.26	1.50E+03	1.52E+03	22.2
32.25	1.344	7.76	1.16E+03	1.17E+03	37.8
32.35	1.348	0.00E+00	1.16E+03	1.16E+03	37.9
56.3	2.346	0.00E+00	858	858	61.4
80.3	3.346	0.00E+00	731	731	80.3
104.3	4.346	0.00E+00	656	656	97.0
128.3	5.346	0.00E+00	602	602	112
152.3	6.346	0.00E+00	558	558	126
176.3	7.346	0.00E+00	521	521	139
200.3	8.346	0.00E+00	487	487	150
224.3	9.346	0.00E+00	457	457	162

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
248.3	10.346	0.00E+00	430	430	172
272.3	11.346	0.00E+00	406	406	183
296.3	12.346	0.00E+00	384	384	192
320.3	13.346	0.00E+00	363	363	201
344.3	14.346	0.00E+00	345	345	209
368.3	15.346	0.00E+00	327	327	218
392.3	16.346	0.00E+00	311	311	226
416.3	17.346	0.00E+00	296	296	233
440.3	18.346	0.00E+00	282	282	239
464.3	19.346	0.00E+00	270	270	246
488.3	20.346	0.00E+00	258	258	252
512.3	21.346	0.00E+00	248	248	259
536.3	22.346	0.00E+00	237	237	265
560.3	23.346	0.00E+00	228	228	271
584.3	24.346	0.00E+00	220	220	275
608.3	25.346	0.00E+00	211	211	281
632.3	26.346	0.00E+00	204	204	286
656.3	27.346	0.00E+00	197	197	290
680.3	28.346	0.00E+00	190	190	295
704.3	29.346	0.00E+00	183	183	300
728.3	30.346	0.00E+00	177	177	304 1 kk
752.3	31.346	0.00E+00	171	171	308
776.3	32.346	0.00E+00	167	167	312
800.3	33.346	0.00E+00	162	162	316
824.3	34.346	0.00E+00	157	157	320
848.3	35.346	0.00E+00	153	153	324
872.3	36.346	0.00E+00	148	148	327
896.3	37.346	0.00E+00	145	145	331
920.3	38.346	0.00E+00	141	141	334
944.3	39.346	0.00E+00	138	138	338
968.3	40.346	0.00E+00	134	134	341
992.3	41.346	0.00E+00	131	131	344
1016.3	42.346	0.00E+00	128	128	347
1040.3	43.346	0.00E+00	125	125	351
1064.3	44.346	0.00E+00	123	123	353
1088.3	45.346	0.00E+00	120	120	356
1112.3	46.346	0.00E+00	118	118	359
1136.3	47.346	0.00E+00	115	115	362
1160.3	48.346	0.00E+00	113	113	364

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1184.3	49.346	0.00E+00	111	111	367
1208.3	50.346	0.00E+00	109	109	370
1232.3	51.346	0.00E+00	107	107	373
1256.3	52.346	0.00E+00	106	106	375
1280.3	53.346	0.00E+00	104	104	377
1304.3	54.346	0.00E+00	102	102	379
1328.3	55.346	0.00E+00	101	101	382
1352.3	56.346	0.00E+00	99.3	99.3	384
1376.3	57.346	0.00E+00	97.9	97.9	386
1400.3	58.346	0.00E+00	96.5	96.5	390
1424.3	59.346	0.00E+00	95.3	95.3	392
1448.3	60.346	0.00E+00	94.1	94.1	393 2 kk
1472.3	61.346	0.00E+00	92.9	92.9	396
1496.3	62.346	0.00E+00	91.8	91.8	398
1520.3	63.346	0.00E+00	90.7	90.7	400
1544.3	64.346	0.00E+00	89.7	89.7	403
1568.3	65.346	0.00E+00	88.7	88.7	405
1592.3	66.346	0.00E+00	87.8	87.8	407
1616.3	67.346	0.00E+00	86.9	86.9	410
1640.3	68.346	0.00E+00	86.1	86.1	411
1664.3	69.346	0.00E+00	85.2	85.2	413
1688.3	70.346	0.00E+00	84.3	84.3	415
1712.3	71.346	0.00E+00	83.7	83.7	418
1736.3	72.346	0.00E+00	82.8	82.8	419
1760.3	73.346	0.00E+00	82.1	82.1	421
1784.3	74.346	0.00E+00	81.5	81.5	423
1808.3	75.346	0.00E+00	80.8	80.8	425
1832.3	76.346	0.00E+00	80.2	80.2	427
1856.3	77.346	0.00E+00	79.5	79.5	429
1880.3	78.346	0.00E+00	78.9	78.9	430
1904.3	79.346	0.00E+00	78.3	78.3	433
1928.3	80.346	0.00E+00	77.8	77.8	435
1952.3	81.346	0.00E+00	77.2	77.2	436
1976.3	82.346	0.00E+00	76.7	76.7	439
2000.3	83.346	0.00E+00	76.1	76.1	440
2024.3	84.346	0.00E+00	75.7	75.7	442
2048.3	85.346	0.00E+00	75.2	75.2	444
2072.3	86.346	0.00E+00	74.7	74.7	445
2096.3	87.346	0.00E+00	74.3	74.3	448

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2120.3	88.346	0.00E+00	73.8	73.8	449
2144.3	89.346	0.00E+00	73.4	73.4	451
2168.3	90.346	0.00E+00	72.9	72.9	452 3 kk
2192.3	91.346	0.00E+00	72.5	72.5	455

## LIITE IV Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki

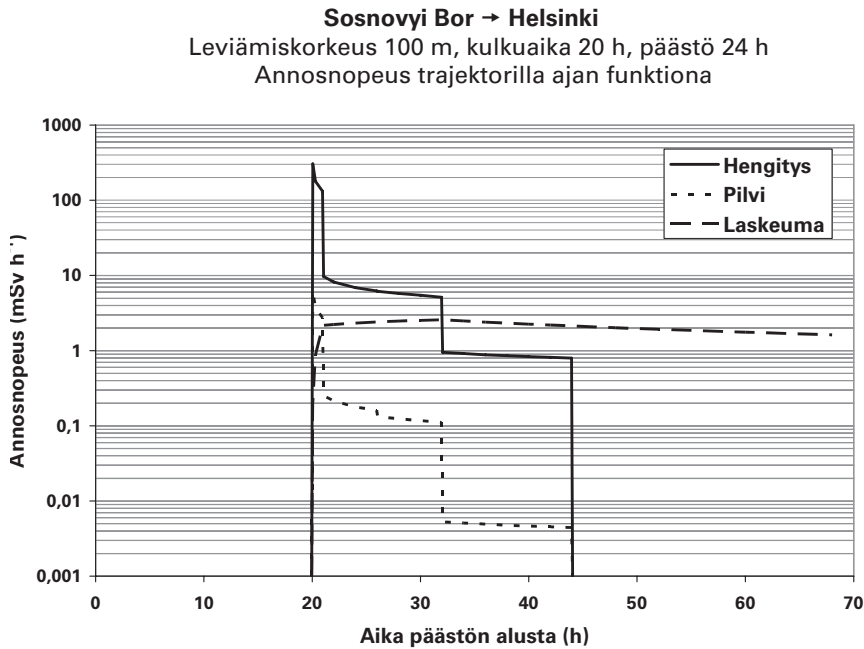
### Säteilyseurausanalyysi: Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki

Kuvissa IV.1–IV.6 ja taulukoissa IV.1–IV.17 on esitetty edellä kohdassa IV.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Sosnovyi Borin RBMK-voimala ja kohde Helsinki. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on kaksi, 100 m ja 500 m. Kuvat ja taulukot on järjestetty siten, että ensin – oheisen taulukon IV.1 jälkeen – ovat 100 metrin leviämiskorkeuteen liittyvät tulokset (kuvat IV.1–IV.3, taulukot IV.2–IV.9) ja sen jälkeen vastaavat 500 metrin korkeuden tulokset (kuvat IV.4–IV.6, taulukot IV.10–IV.17).

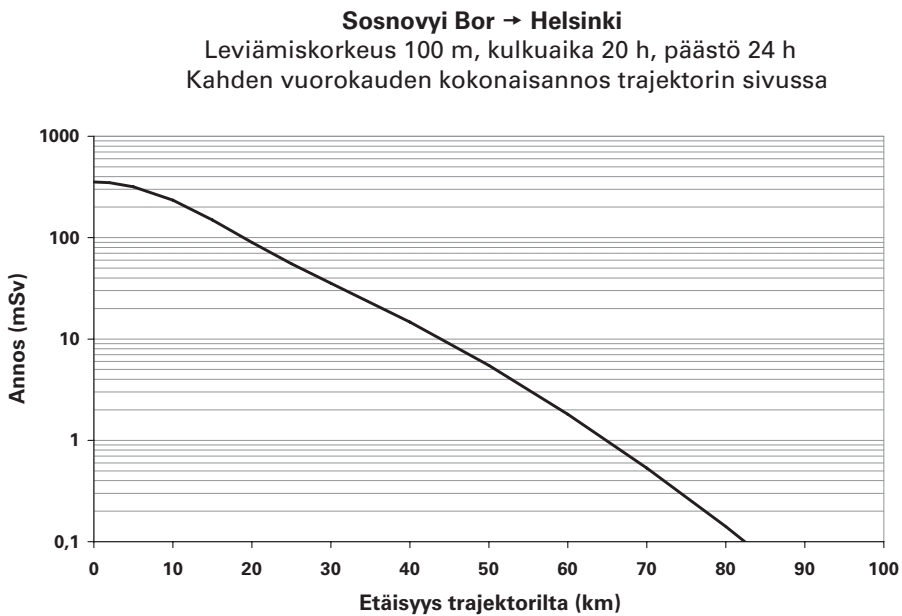
Sosnovyi Borin voimalan etäisyys Helsingistä on noin 220 km. Laskuissa käytetty inventaari on liitteessä I esitetty 1000 MW<sub>e</sub> RBMK-reaktorin perusinventaari. Lähde-termi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

**Taulukko IV.1.** Tapaus Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysansokset (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
Leviämiskorkeus 100 m				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	14,0	3,1	15,5	3,3
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	11,7	2,6	12,8	2,7
Kilpirauhasen annos (mGy)	2520	5,6	492	20
Efektiivinen hengitysansos (mSv)	126	0,28	25	1,0
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysansoksesta (%)	50,6	0,11	9,8	0,42
Leviämiskorkeus 500 m				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	6,3	1,4	6,9	1,5
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	5,2	1,2	5,7	1,2
Kilpirauhasen annos (mGy)	1120	2,5	218	9,3
Efektiivinen hengitysansos (mSv)	56	0,12	10,9	0,46
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysansoksesta (%)	50,6	0,11	9,8	0,42

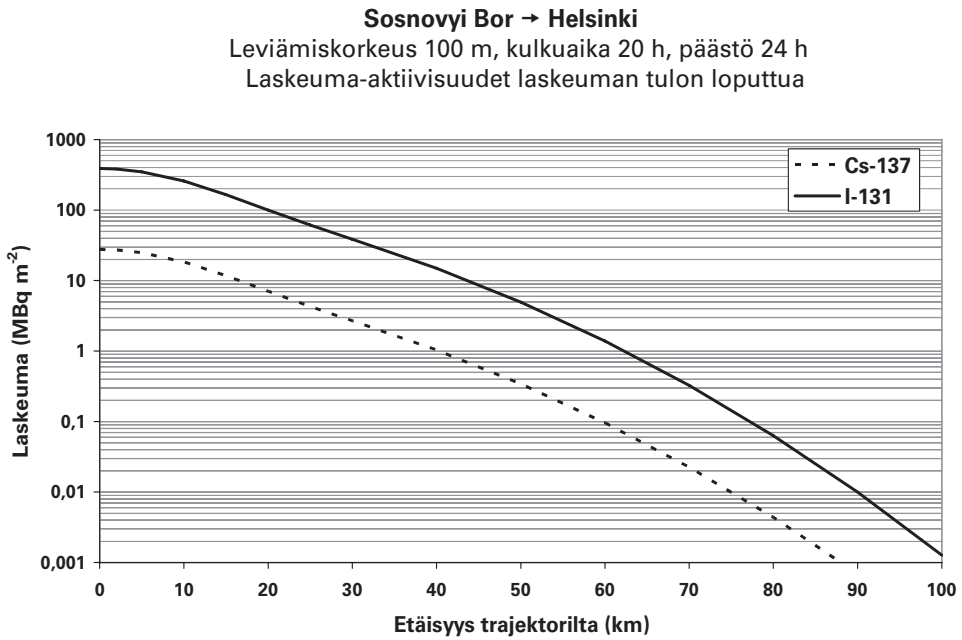


Kuva IV.1. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



Kuva IV.2. Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityspanoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva IV.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (44 h päästön alkamisen jälkeen).



**Taulukko IV.2. Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.**

Integrointi välillä 20.0 h (pihven tulo) – 68.0 h.  
 Kokonaisannos 354 mSv (hengitys 250, pilvi 5.22, laskeuma 99.7). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.
I-131	.126E+03	50.58	I-133	.124E+01	23.82	I-132	.252E+02	25.32	I-131	.149E+03	42.14
I-133	.248E+02	9.84	I-132	.965E+00	18.48	I-131	.224E+02	22.50	I-133	.482E+02	13.59
CE-144	.165E+02	6.62	I-135	.711E+00	13.61	I-133	.224E+02	22.44	I-132	.265E+02	7.47
RU-106	.137E+02	5.47	I-131	.702E+00	13.44	I-135	.430E+01	4.31	CE-144	.166E+02	4.67
PU-241	.831E+01	3.33	XE-135	.322E+00	6.16	CS-134	.409E+01	4.10	RU-106	.137E+02	3.85
TE-132	.718E+01	2.88	XE-133	.292E+00	5.60	LA-140	.398E+01	4.00	TE-132	.984E+01	2.78
PU-238	.677E+01	2.71	LA-140	.143E+00	2.74	TE-132	.258E+01	2.59	CS-134	.925E+01	2.61
CS-137	.543E+01	2.18	CS-134	.127E+00	2.43	CS-136	.252E+01	2.53	PU-241	.831E+01	2.34
CS-134	.504E+01	2.02	CS-136	.851E-01	1.63	BA-137M	.232E+01	2.32	PU-238	.677E+01	1.91
CM-242	.475E+01	1.90	TE-132	.845E-01	1.62	NP-239	.221E+01	2.22	I-135	.605E+01	1.71
PU-240	.404E+01	1.62	NP-239	.796E-01	1.52	NB-95	.135E+01	1.36	CS-137	.544E+01	1.53
SR-90	.368E+01	1.47	BA-137M	.696E-01	1.33	ZR-95	.128E+01	1.29	CM-242	.475E+01	1.34
Y-91	.330E+01	1.32	KR-88	.524E-01	1.00	TE-131M	.902E+00	0.90	LA-140	.443E+01	1.25
PU-239	.287E+01	1.15	TE-131M	.468E-01	0.90	RU-103	.763E+00	0.77	NP-239	.416E+01	1.17
AM-241	.232E+01	0.93	NB-95	.437E-01	0.84	SB-127	.393E+00	0.39	PU-240	.404E+01	1.14
SR-89	.218E+01	0.87	ZR-95	.417E-01	0.80	BA-140	.369E+00	0.37	SR-90	.368E+01	1.04
NP-239	.187E+01	0.75	XE-135M	.296E-01	0.57	NB-97	.278E+00	0.28	Y-91	.342E+01	0.96
ZR-95	.182E+01	0.73	RU-103	.237E-01	0.45	NB-97M	.254E+00	0.26	ZR-95	.315E+01	0.89
CM-244	.179E+01	0.72	RB-88	.194E-01	0.37	MO-99	.241E+00	0.24	CS-136	.299E+01	0.84

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-135	.104E+01	0.42	NB-97	.179E-01	0.34	RH-106	.231E+00	0.23	PU-239	.287E+01	0.81
CE-141	.749E+00	0.30	NB-97M	.177E-01	0.34	CE-143	.212E+00	0.21	BA-137M	.239E+01	0.67
RU-103	.648E+00	0.26	SB-127	.138E-01	0.26	PR-144	.174E+00	0.17	AM-241	.232E+01	0.65
PR-143	.627E+00	0.25	BA-140	.107E-01	0.20	TC-99M	.169E+00	0.17	SF-89	.226E+01	0.64
TE-129M	.587E+00	0.24	CE-143	.842E-02	0.16	CE-141	.149E+00	0.15	NB-95	.186E+01	0.53
NB-95	.467E+00	0.19	SB-129	.811E-02	0.16	Y-91	.118E+00	0.12	CM-244	.179E+01	0.50

**Taulukko IV.3.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva IV.2). Tarkasteluaikaväli 20.00 - 68.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	250	5.22	99.7	354
2	245	5.13	97.9	348
5	224	4.7	89.4	318
10	166	3.47	65.4	235
15	106	2.21	41.2	149
20	64.2	1.33	24.2	89.7
25	39.9	0.805	14.5	55.2
30	25.9	0.505	9.07	35.5
40	11	0.196	3.55	14.7
50	4.19	6.69E-02	1.23	5.48
60	1.42	1.99E-02	0.369	1.81
70	0.431	5.18E-03	9.73E-02	0.534
80	0.117	1.19E-03	2.26E-02	0.141
90	2.87E-02	2.45E-04	4.71E-03	3.37E-02
100	6.30E-03	4.60E-05	8.96E-04	7.25E-03

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.4.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva IV.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
19.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	3.05E+05	6.29E+03	199	3.11E+05
20.3	1.78E+05	3.67E+03	876	1.83E+05
20.95	1.32E+05	2.72E+03	2.09E+03	1.37E+05
21.05	9.69E+03	252	2.17E+03	1.21E+04
22	8.17E+03	213	2.23E+03	1.06E+04
24	6.85E+03	178	2.33E+03	9.36E+03
25.95	6.20E+03	161	2.40E+03	8.77E+03
26.05	6.16E+03	133	2.41E+03	8.70E+03
28	5.74E+03	124	2.47E+03	8.33E+03
30	5.43E+03	117	2.52E+03	8.07E+03
31.95	5.13E+03	111	2.57E+03	7.81E+03
32.05	948	5.29	2.57E+03	3.52E+03
34	912	5.09	2.48E+03	3.39E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
36	881	4.92	2.39E+03	3.28E+03
38	855	4.77	2.32E+03	3.18E+03
40	832	4.64	2.25E+03	3.09E+03
42	812	4.53	2.19E+03	3.00E+03
43.95	794	4.43	2.13E+03	2.93E+03
44.05	0.00E+00	0.00E+00	2.13E+03	2.13E+03
48	0.00E+00	0.00E+00	2.02E+03	2.02E+03
52	0.00E+00	0.00E+00	1.92E+03	1.92E+03
56	0.00E+00	0.00E+00	1.83E+03	1.83E+03
60	0.00E+00	0.00E+00	1.76E+03	1.76E+03
64	0.00E+00	0.00E+00	1.69E+03	1.69E+03
68	0.00E+00	0.00E+00	1.62E+03	1.62E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.5.** Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aikaisemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	3.05E+05	6.29E+03	199	3.11E+05
2	2.83E+05	5.84E+03	185	2.89E+05
5	1.92E+05	3.96E+03	125	1.96E+05
10	4.80E+04	990	31.3	4.90E+04
15	4.76E+03	98.1	3.1	4.86E+03
20	187	3.86	0.122	191
25	2.92	6.02E-02	1.90E-03	2.98
30	1.81E-02	3.72E-04	1.18E-05	1.84E-02
40	4.32E-08	8.91E-10	2.82E-11	4.41E-08
50	2.56E-15	5.27E-17	1.67E-18	2.61E-15
60	3.75E-24	7.74E-26	2.45E-27	3.83E-24
70	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.6.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva IV.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	2.77E+07	3.89E+08
2	2.72E+07	3.83E+08
5	2.49E+07	3.50E+08
10	1.84E+07	2.59E+08
15	1.17E+07	1.66E+08
20	7.03E+06	1.00E+08
25	4.27E+06	6.11E+07
30	2.68E+06	3.85E+07
40	1.03E+06	1.49E+07
50	3.42E+05	4.94E+06
60	9.58E+04	1.38E+06
70	2.25E+04	3.25E+05
80	4.36E+03	6.31E+04
90	689	9.97E+03
100	88.1	1.27E+03

**Taulukko IV.7.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	1.40E+07
2	1.30E+07
5	8.82E+06
10	2.20E+06
15	2.18E+05
20	8.59E+03
25	134
30	0.829
40	1.98E-06
50	1.17E-13
60	1.72E-22
70	0.00E+00

**Taulukko IV.8.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Nuklidien pitoisuus-integraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	1.17E+07
<sup>132</sup> I	2.58E+06
<sup>133</sup> I	1.28E+07
<sup>135</sup> I	2.72E+06
<sup>106</sup> Pu	1.26E+05
<sup>132</sup> Te	2.47E+06
<sup>144</sup> Ce	1.99E+05
<sup>134</sup> Cs	5.05E+05
<sup>137</sup> Cs	7.68E+05
<sup>238</sup> Pu	133
<sup>241</sup> Pu	1.07E+04

**Taulukko IV.9.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 100 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
19.95	0.831	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	0.835	6.29E+03	199	6.49E+03	0.319
20.3	0.846	3.67E+03	876	4.55E+03	1.52
20.95	0.873	2.72E+03	2.09E+03	4.81E+03	4.35
21.05	0.877	252	2.17E+03	2.43E+03	4.7
25.95	1.081	161	2.40E+03	2.57E+03	16.8
26.05	1.085	133	2.41E+03	2.54E+03	17.1
31.95	1.331	111	2.57E+03	2.68E+03	32.5
32.05	1.335	5.29	2.57E+03	2.57E+03	32.7
43.95	1.831	4.43	2.13E+03	2.14E+03	60.5
44.05	1.835	0.00E+00	2.13E+03	2.13E+03	60.7
68	2.833	0.00E+00	1.62E+03	1.62E+03	105
92	3.833	0.00E+00	1.34E+03	1.34E+03	140
116	4.833	0.00E+00	1.16E+03	1.16E+03	170
140	5.833	0.00E+00	1.02E+03	1.02E+03	196
164	6.833	0.00E+00	919	919	219
188	7.833	0.00E+00	835	835	240
212	8.833	0.00E+00	765	765	260

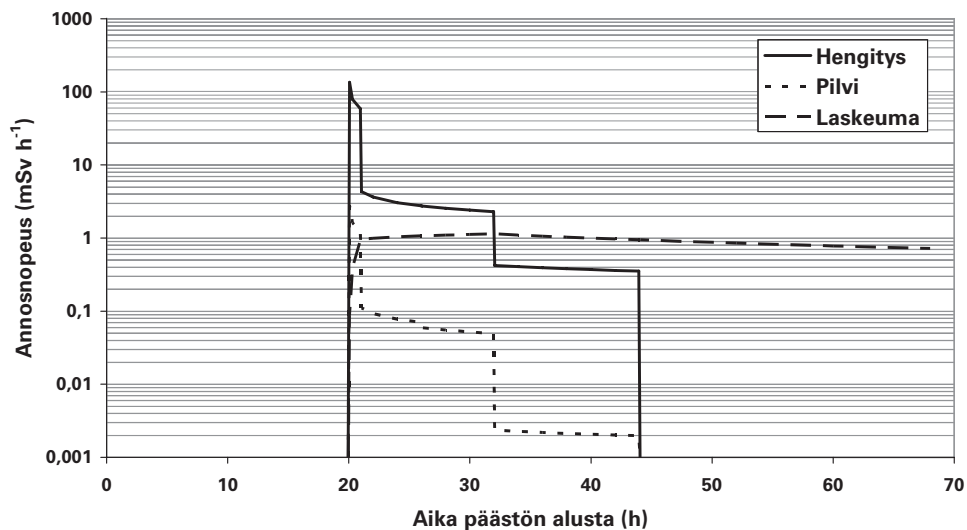
Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
236	9.833	0.00E+00	706	706	277
260	10.833	0.00E+00	656	656	294
284	11.833	0.00E+00	612	612	309
308	12.833	0.00E+00	573	573	323
332	13.833	0.00E+00	540	540	336
356	14.833	0.00E+00	510	510	349
380	15.833	0.00E+00	484	484	361
404	16.833	0.00E+00	460	460	372
428	17.833	0.00E+00	439	439	383
452	18.833	0.00E+00	420	420	393
476	19.833	0.00E+00	403	403	403
500	20.833	0.00E+00	388	388	413
524	21.833	0.00E+00	374	374	422
548	22.833	0.00E+00	361	361	431
572	23.833	0.00E+00	350	350	439
596	24.833	0.00E+00	339	339	447
620	25.833	0.00E+00	329	329	455
644	26.833	0.00E+00	320	320	463
668	27.833	0.00E+00	312	312	471
692	28.833	0.00E+00	304	304	478
716	29.833	0.00E+00	297	297	485
740	30.833	0.00E+00	290	290	492 1 kk
764	31.833	0.00E+00	284	284	499
788	32.833	0.00E+00	278	278	506
812	33.833	0.00E+00	273	273	513
836	34.833	0.00E+00	268	268	519
860	35.833	0.00E+00	263	263	526
884	36.833	0.00E+00	259	259	532
908	37.833	0.00E+00	255	255	538
932	38.833	0.00E+00	251	251	544
956	39.833	0.00E+00	247	247	550
980	40.833	0.00E+00	244	244	556
1004	41.833	0.00E+00	241	241	562
1028	42.833	0.00E+00	238	238	567
1052	43.833	0.00E+00	235	235	573
1076	44.833	0.00E+00	232	232	579
1100	45.833	0.00E+00	230	230	584
1124	46.833	0.00E+00	227	227	590
1148	47.833	0.00E+00	225	225	595

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1172	48.833	0.00E+00	223	223	601
1196	49.833	0.00E+00	221	221	606
1220	50.833	0.00E+00	219	219	611
1244	51.833	0.00E+00	217	217	616
1268	52.833	0.00E+00	215	215	622
1292	53.833	0.00E+00	214	214	627
1316	54.833	0.00E+00	212	212	632
1340	55.833	0.00E+00	210	210	637
1364	56.833	0.00E+00	209	209	642
1388	57.833	0.00E+00	208	208	647
1412	58.833	0.00E+00	206	206	652
1436	59.833	0.00E+00	205	205	657
1460	60.833	0.00E+00	204	204	662 2 kk
1484	61.833	0.00E+00	202	202	667
1508	62.833	0.00E+00	201	201	672
1532	63.833	0.00E+00	200	200	676
1556	64.833	0.00E+00	199	199	681
1580	65.833	0.00E+00	198	198	686
1604	66.833	0.00E+00	197	197	691
1628	67.833	0.00E+00	196	196	695
1652	68.833	0.00E+00	195	195	700
1676	69.833	0.00E+00	194	194	705
1700	70.833	0.00E+00	193	193	709
1724	71.833	0.00E+00	192	192	714
1748	72.833	0.00E+00	192	192	719
1772	73.833	0.00E+00	191	191	723
1796	74.833	0.00E+00	190	190	728
1820	75.833	0.00E+00	189	189	732
1844	76.833	0.00E+00	189	189	737
1868	77.833	0.00E+00	188	188	741
1892	78.833	0.00E+00	187	187	746
1916	79.833	0.00E+00	186	186	750
1940	80.833	0.00E+00	186	186	755
1964	81.833	0.00E+00	185	185	759
1988	82.833	0.00E+00	184	184	764
2012	83.833	0.00E+00	184	184	768
2036	84.833	0.00E+00	183	183	773
2060	85.833	0.00E+00	182	182	777
2084	86.833	0.00E+00	182	182	781

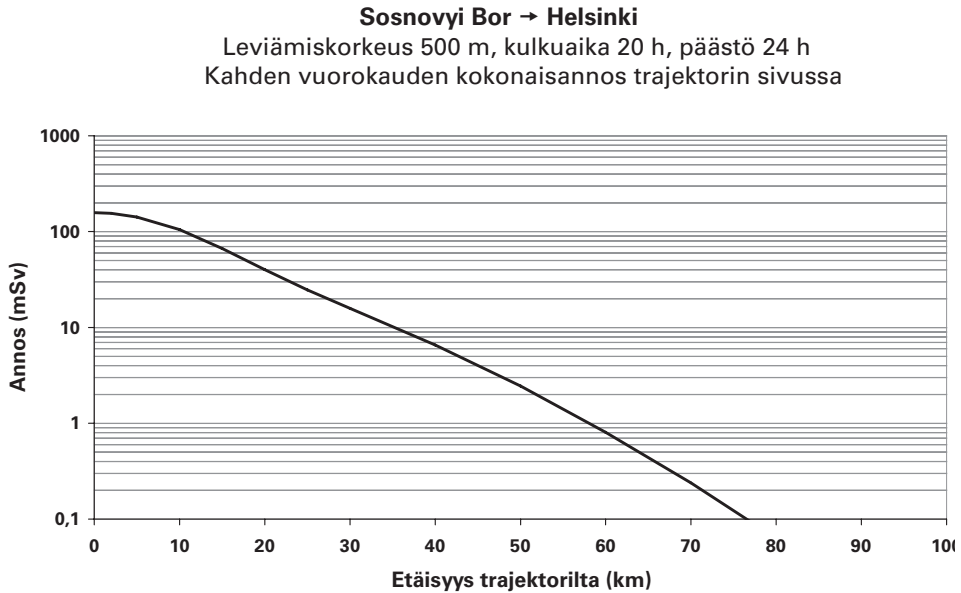


Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2108	87.833	0.00E+00	181	181	786
2132	88.833	0.00E+00	181	181	790
2156	89.833	0.00E+00	180	180	794
2180	90.833	0.00E+00	179	179	799 3 kk
2204	91.833	0.00E+00	179	179	803

**Sosnovyi Bor → Helsinki**  
 Leviämiskorkeus 500 m, kulku aika 20 h, päästö 24 h  
 Annosnopeus trajektorilla ajan funktiona

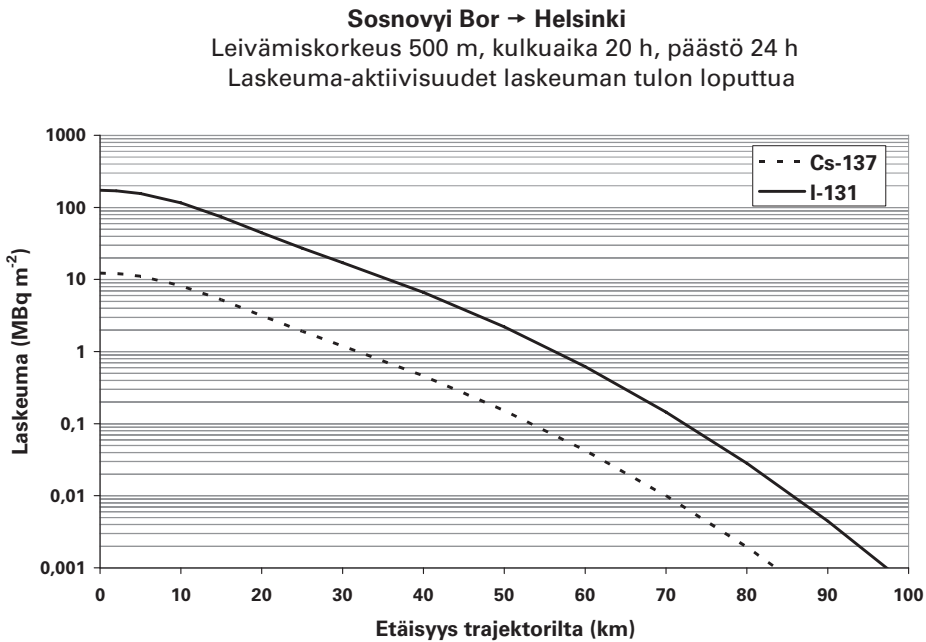


Kuva IV.4. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



**Kuva IV.5.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva IV.6.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (44 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko IV.10.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, levämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 20.0 h (pilven tulo) – 68.0 h.  
Kokonaisannos 1.58 mSv (hengitys 111, pivi 2.30, laskeuma 44.4). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUJUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-131	.562E+02	50.58	I-133	.554E+00	24.10	I-132	.112E+02	25.32	I-131	.665E+02	42.15
I-133	.109E+02	9.84	I-132	.430E+00	18.69	I-131	.998E+01	22.50	I-133	.214E+02	13.59
CE-144	.736E+01	6.62	I-135	.316E+00	13.77	I-133	.995E+01	22.44	I-132	.118E+02	7.47
RU-106	.608E+01	5.47	I-131	.313E+00	13.60	I-135	.191E+01	4.31	CE-144	.737E+01	4.67
PU-241	.370E+01	3.33	XE-135	.133E+00	5.81	CS-134	.182E+01	4.10	RU-106	.608E+01	3.85
TE-132	.320E+01	2.88	XE-133	.117E+00	5.10	LA-140	.177E+01	4.00	TE-132	.438E+01	2.78
PU-238	.301E+01	2.71	LA-140	.638E-01	2.77	TE-132	.115E+01	2.59	CS-134	.412E+01	2.61
CS-137	.242E+01	2.18	CS-134	.565E-01	2.46	CS-136	.112E+01	2.53	PU-241	.370E+01	2.34
CS-134	.224E+01	2.02	CS-136	.379E-01	1.65	BA-137M	.103E+01	2.32	PU-238	.301E+01	1.91
CM-242	.212E+01	1.90	TE-132	.376E-01	1.64	NP-239	.983E+00	2.22	I-135	.269E+01	1.71
PU-240	.180E+01	1.62	NP-239	.354E-01	1.54	NB-95	.602E+00	1.36	CS-137	.242E+01	1.54
SR-90	.164E+01	1.47	BA-137M	.310E-01	1.35	ZR-95	.571E+00	1.29	CM-242	.212E+01	1.34
Y-91	.147E+01	1.32	KR-88	.210E-01	0.91	TE-131M	.401E+00	0.90	LA-140	.197E+01	1.25
PU-239	.128E+01	1.15	TE-131M	.208E-01	0.91	RU-103	.339E+00	0.77	NP-239	.185E+01	1.17
AM-241	.103E+01	0.93	NB-95	.195E-01	0.85	SB-127	.175E+00	0.39	PU-240	.180E+01	1.14
SR-89	.970E+00	0.87	ZR-95	.186E-01	0.81	BA-140	.164E+00	0.37	SR-90	.164E+01	1.04

HENGITYS			PILVI			LASKEUJUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
NP-239	.834E+00	0.75	XE-135M	.131E-01	0.57	NB-97	.124E+00	0.28	Y-91	.152E+01	0.96
ZR-95	.812E+00	0.73	RU-103	.105E-01	0.46	NB-97M	.113E+00	0.26	ZR-95	.140E+01	0.89
CM-244	.796E+00	0.72	NB-97	.798E-02	0.35	MO-99	.107E+00	0.24	CS-136	.133E+01	0.84
I-135	.463E+00	0.42	NB-97M	.789E-02	0.34	RH-106	.103E+00	0.23	PU-239	.128E+01	0.81
CE-141	.334E+00	0.30	RB-88	.778E-02	0.34	CE-143	.941E-01	0.21	BA-137M	.106E+01	0.67
RU-103	.288E+00	0.26	SB-127	.612E-02	0.27	PR-144	.774E-01	0.17	AM-241	.103E+01	0.65
PR-143	.279E+00	0.25	BA-140	.477E-02	0.21	TC-99M	.754E-01	0.17	SR-89	.101E+01	0.64
TE-129M	.261E+00	0.24	CE-143	.375E-02	0.16	CE-141	.665E-01	0.15	NB-95	.829E+00	0.53
NB-95	.208E+00	0.19	SB-129	.361E-02	0.16	Y-91	.524E-01	0.12	CM-244	.796E+00	0.50

**Taulukko IV.11.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva IV.5). Tarkasteluaikaväli 20.00 – 68.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	111	2.3	44.4	158
2	109	2.26	43.6	155
5	100	2.07	39.8	142
10	73.9	1.53	29.2	105
15	47.3	0.975	18.3	66.6
20	28.6	0.584	10.8	40
25	17.8	0.355	6.45	24.6
30	11.5	0.223	4.03	15.8
40	4.89	8.67E-02	1.58	6.56
50	1.86	2.96E-02	0.545	2.44
60	0.633	8.81E-03	0.164	0.805
70	0.192	2.30E-03	4.33E-02	0.238
80	5.23E-02	5.29E-04	1.01E-02	6.29E-02
90	1.28E-02	1.09E-04	2.09E-03	1.50E-02
100	2.81E-03	2.04E-05	3.98E-04	3.23E-03

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.12.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva IV.4).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
19.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	1.36E+05	2.77E+03	88.3	1.39E+05
20.3	7.93E+04	1.62E+03	389	8.13E+04
20.95	5.88E+04	1.20E+03	929	6.10E+04
21.05	4.32E+03	110	967	5.39E+03
22	3.64E+03	92.8	994	4.72E+03
24	3.05E+03	77.9	1.04E+03	4.17E+03
25.95	2.76E+03	70.5	1.07E+03	3.90E+03
26.05	2.74E+03	59.1	1.07E+03	3.87E+03
28	2.56E+03	55.1	1.10E+03	3.71E+03
30	2.42E+03	52.1	1.12E+03	3.59E+03
31.95	2.29E+03	49.2	1.14E+03	3.48E+03
32.05	422	2.35	1.14E+03	1.57E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
34	406	2.27	1.10E+03	1.51E+03
36	392	2.19	1.06E+03	1.46E+03
38	381	2.12	1.03E+03	1.41E+03
40	370	2.07	1.00E+03	1.37E+03
42	361	2.02	973	1.34E+03
43.95	354	1.97	949	1.30E+03
44.05	0.00E+00	0.00E+00	947	947
48	0.00E+00	0.00E+00	898	898
52	0.00E+00	0.00E+00	854	854
56	0.00E+00	0.00E+00	815	815
60	0.00E+00	0.00E+00	781	781
64	0.00E+00	0.00E+00	750	750
68	0.00E+00	0.00E+00	722	722

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.13.** Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aikaisemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	1.36E+05	2.77E+03	88.3	1.39E+05
2	1.26E+05	2.57E+03	82	1.29E+05
5	8.57E+04	1.74E+03	55.6	8.75E+04
10	2.14E+04	436	13.9	2.19E+04
15	2.12E+03	43.2	1.38	2.17E+03
20	83.4	1.7	5.42E-02	85.2
25	1.3	2.65E-02	8.45E-04	1.33
30	8.05E-03	1.64E-04	5.23E-06	8.22E-03
40	1.93E-08	3.92E-10	1.25E-11	1.97E-08
50	1.14E-15	2.32E-17	7.40E-19	1.16E-15
60	1.67E-24	3.41E-26	1.09E-27	1.71E-24
70	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko IV.14.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva IV.6).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	1.23E+07	1.73E+08
2	1.21E+07	1.70E+08
5	1.11E+07	1.56E+08
10	8.17E+06	1.16E+08
15	5.22E+06	7.40E+07
20	3.13E+06	4.46E+07
25	1.90E+06	2.72E+07
30	1.19E+06	1.71E+07
40	4.59E+05	6.62E+06
50	1.52E+05	2.20E+06
60	4.26E+04	6.17E+05
70	9.99E+03	1.45E+05
80	1.94E+03	2.81E+04
90	306	4.44E+03
100	39.1	568

**Taulukko IV.15.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	6.25E+06
2	5.80E+06
5	3.94E+06
10	9.84E+05
15	9.75E+04
20	3.83E+03
25	59.8
30	0.37
40	8.85E-07
50	5.24E-14
60	7.69E-23
70	0.00E+00

**Taulukko IV.16.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuus-integraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	5.20E+06
<sup>132</sup> I	1.15E+06
<sup>133</sup> I	5.72E+06
<sup>135</sup> I	1.21E+06
<sup>106</sup> Ru	5.62E+04
<sup>132</sup> Te	1.10E+06
<sup>144</sup> Ce	8.85E+04
<sup>134</sup> Cs	2.25E+05
<sup>137</sup> Cs	3.42E+05
<sup>238</sup> Pu	59.4
<sup>241</sup> Pu	4.78E+03

**Taulukko IV.17.** Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
19.95	0.831	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	0.835	2.77E+03	88.3	2.86E+03	0.141
20.3	0.846	1.62E+03	389	2.01E+03	0.672
20.95	0.873	1.20E+03	929	2.13E+03	1.92
21.05	0.877	110	967	1.08E+03	2.08
25.95	1.081	70.5	1.07E+03	1.14E+03	7.46
26.05	1.085	59.1	1.07E+03	1.13E+03	7.58
31.95	1.331	49.2	1.14E+03	1.19E+03	14.4
32.05	1.335	2.35	1.14E+03	1.14E+03	14.5
43.95	1.831	1.97	949	951	26.9
44.05	1.835	0.00E+00	947	947	27
68	2.833	0.00E+00	722	722	46.6
92	3.833	0.00E+00	597	597	62.4
116	4.833	0.00E+00	515	515	75.6
140	5.833	0.00E+00	455	455	87.2
164	6.833	0.00E+00	409	409	97.6
188	7.833	0.00E+00	372	372	107



Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
212	8.833	0.00E+00	341	341	115
236	9.833	0.00E+00	314	314	123
260	10.833	0.00E+00	292	292	131
284	11.833	0.00E+00	272	272	137
308	12.833	0.00E+00	255	255	144
332	13.833	0.00E+00	240	240	150
356	14.833	0.00E+00	227	227	155
380	15.833	0.00E+00	215	215	161
404	16.833	0.00E+00	205	205	166
428	17.833	0.00E+00	195	195	170
452	18.833	0.00E+00	187	187	175
476	19.833	0.00E+00	180	180	179
500	20.833	0.00E+00	173	173	184
524	21.833	0.00E+00	166	166	188
548	22.833	0.00E+00	161	161	192
572	23.833	0.00E+00	156	156	195
596	24.833	0.00E+00	151	151	199
620	25.833	0.00E+00	146	146	203
644	26.833	0.00E+00	142	142	206
668	27.833	0.00E+00	139	139	209
692	28.833	0.00E+00	135	135	213
716	29.833	0.00E+00	132	132	216
740	30.833	0.00E+00	129	129	219 1 kk
764	31.833	0.00E+00	126	126	222
788	32.833	0.00E+00	124	124	225
812	33.833	0.00E+00	121	121	228
836	34.833	0.00E+00	119	119	231
860	35.833	0.00E+00	117	117	234
884	36.833	0.00E+00	115	115	237
908	37.833	0.00E+00	113	113	239
932	38.833	0.00E+00	112	112	242
956	39.833	0.00E+00	110	110	245
980	40.833	0.00E+00	109	109	247
1004	41.833	0.00E+00	107	107	250
1028	42.833	0.00E+00	106	106	252
1052	43.833	0.00E+00	105	105	255
1076	44.833	0.00E+00	103	103	257
1100	45.833	0.00E+00	102	102	260
1124	46.833	0.00E+00	101	101	262

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1148	47.833	0.00E+00	100	100	265
1172	48.833	0.00E+00	99.2	99.2	267
1196	49.833	0.00E+00	98.3	98.3	270
1220	50.833	0.00E+00	97.4	97.4	272
1244	51.833	0.00E+00	96.6	96.6	274
1268	52.833	0.00E+00	95.8	95.8	277
1292	53.833	0.00E+00	95.1	95.1	279
1316	54.833	0.00E+00	94.3	94.3	281
1340	55.833	0.00E+00	93.7	93.7	283
1364	56.833	0.00E+00	93	93	286
1388	57.833	0.00E+00	92.4	92.4	288
1412	58.833	0.00E+00	91.8	91.8	290
1436	59.833	0.00E+00	91.2	91.2	292
1460	60.833	0.00E+00	90.6	90.6	294 2 kk
1484	61.833	0.00E+00	90.1	90.1	297
1508	62.833	0.00E+00	89.6	89.6	299
1532	63.833	0.00E+00	89.1	89.1	301
1556	64.833	0.00E+00	88.6	88.6	303
1580	65.833	0.00E+00	88.1	88.1	305
1604	66.833	0.00E+00	87.7	87.7	307
1628	67.833	0.00E+00	87.3	87.3	309
1652	68.833	0.00E+00	86.8	86.8	311
1676	69.833	0.00E+00	86.4	86.4	314
1700	70.833	0.00E+00	86	86	316
1724	71.833	0.00E+00	85.6	85.6	318
1748	72.833	0.00E+00	85.3	85.3	320
1772	73.833	0.00E+00	84.9	84.9	322
1796	74.833	0.00E+00	84.6	84.6	324
1820	75.833	0.00E+00	84.2	84.2	326
1844	76.833	0.00E+00	83.9	83.9	328
1868	77.833	0.00E+00	83.5	83.5	330
1892	78.833	0.00E+00	83.2	83.2	332
1916	79.833	0.00E+00	82.9	82.9	334
1940	80.833	0.00E+00	82.6	82.6	336
1964	81.833	0.00E+00	82.3	82.3	338
1988	82.833	0.00E+00	82	82	340
2012	83.833	0.00E+00	81.7	81.7	342
2036	84.833	0.00E+00	81.4	81.4	344
2060	85.833	0.00E+00	81.2	81.2	346

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2084	86.833	0.00E+00	80.9	80.9	348
2108	87.833	0.00E+00	80.6	80.6	350
2132	88.833	0.00E+00	80.4	80.4	351
2156	89.833	0.00E+00	80.1	80.1	353
2180	90.833	0.00E+00	79.9	79.9	355 3 kk
2204	91.833	0.00E+00	79.6	79.6	357

## LIITE V. Sosnovyi Bor ⇒ Kotka

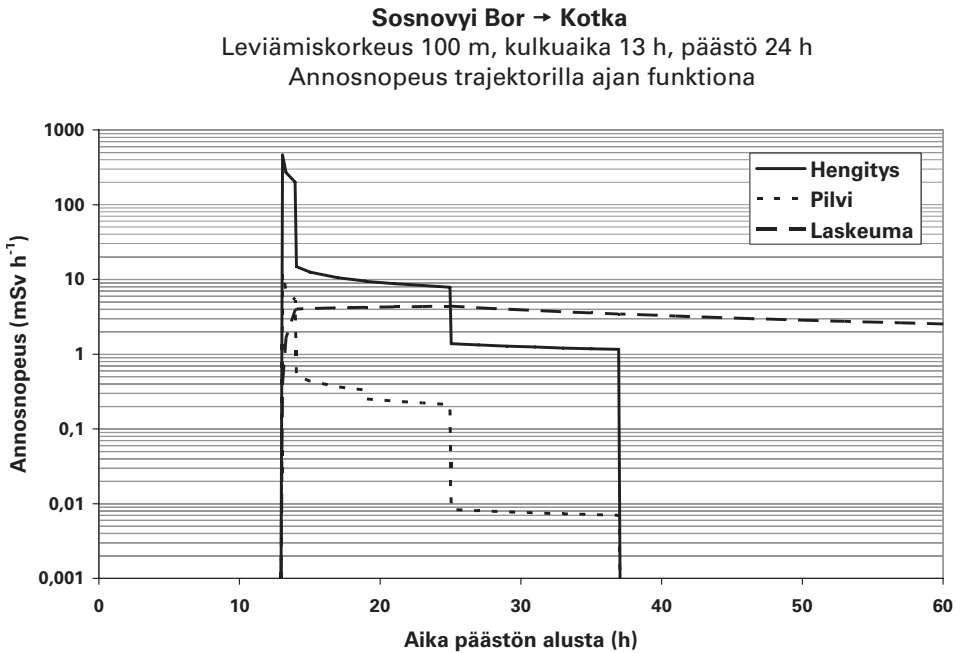
### Säteilyseurausanalyysi: Sosnovyi Bor ⇒ Kotka

Kuvissa V.1–V.6 ja taulukoissa V.1–V.17 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Sosnovyi Borin RBMK-voimala ja kohde Kotka. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on kaksi, 100 m ja 500 m. Kuvat ja taulukot on järjestetty siten, että ensin – oheisen taulukon V.1 jälkeen – ovat 100 metrin leviämiskorkeuteen liittyvät tulokset (kuvat V.1–V.3, taulukot V.2–V.9) ja sen jälkeen vastaavat 500 metrin korkeuden tulokset (kuvat V.4–V.6, taulukot V.10–V.17).

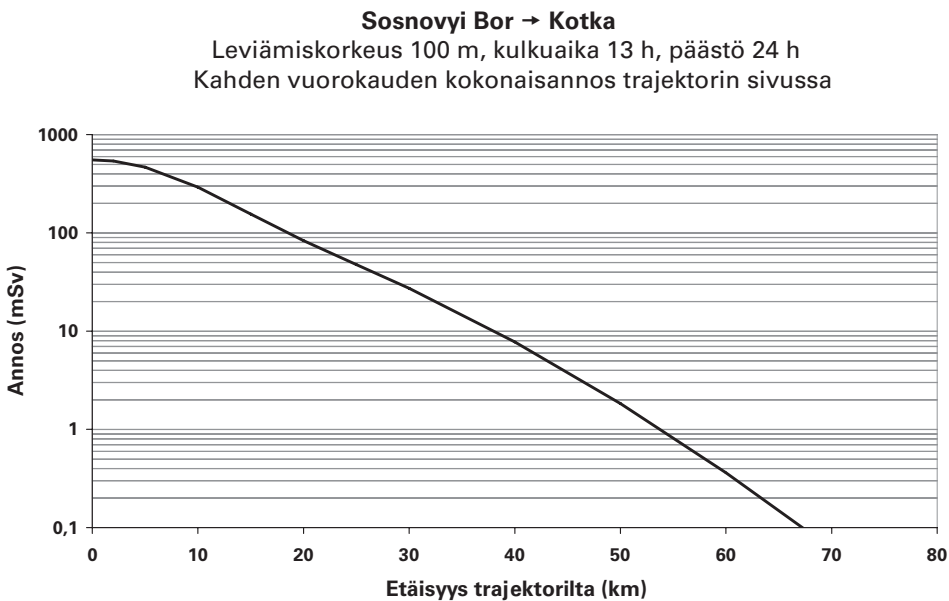
Sosnovyi Borin voimalan etäisyys Kotkasta on noin 140 km. Laskuissa käytetty inventaari on liitteessä I esitetty 1000 MW<sub>e</sub> RBMK-reaktorin perusinventaari. Lähde-termi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

**Taulukko V.1.** Tapaus Sosnovyi Bor ⇒ Kotka. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannot (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
<b>Leviämiskorkeus 100 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	20,9	5,2	28,3	9,9
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	17,4	4,3	23,5	8,2
Kilpirauhasen annos (mGy)	3760	9,4	900	63
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	188	0,47	45	3,1
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	49,5	0,12	11,9	0,83
<b>Leviämiskorkeus 500 m</b>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	9,0	2,3	12,2	4,3
Pitoisuusintegraali (MBq · h m <sup>-3</sup> )	7,5	1,9	10,8	3,5
Kilpirauhasen annos (mGy)	1620	4,1	388	27
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	81	0,20	19,4	1,4
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	49,5	0,12	11,9	0,83

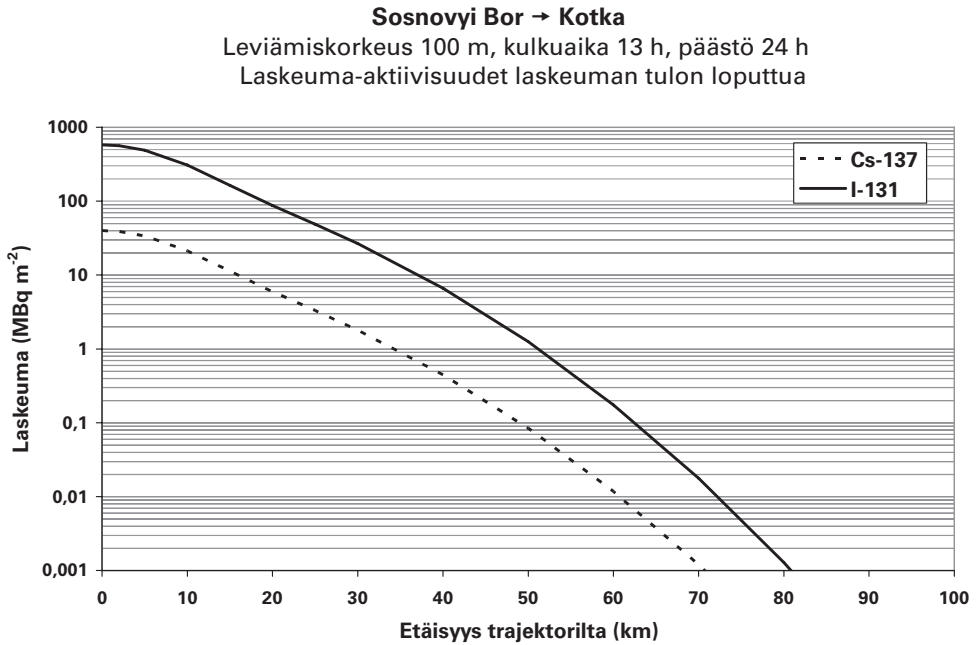


Kuva V.1. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



Kuva V.2. Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengitysansoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva V.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (37 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko V.2.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 13,0 h (piiven tuolo) – 61,0 h.  
Kokonaisannos 554 mSv (hengitys 379, piivi 10,2, laskeuma 165). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysamoksen yhteenlasku on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PIIVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
I-131	.188E+03	49.51	I-133	.228E+01	22.27	I-133	.409E+02	24.83	I-131	.222E+03	40.07
I-133	.450E+02	11.87	I-135	.215E+01	20.97	I-132	.392E+02	23.80	I-133	.882E+02	15.92
CE-144	.240E+02	6.33	I-132	.163E+01	15.90	I-131	.333E+02	20.22	I-132	.413E+02	7.46
RU-106	.198E+02	5.23	I-131	.104E+01	10.20	I-135	.130E+02	7.87	CE-144	.240E+02	4.34
PU-241	.121E+02	3.18	XE-135	.626E+00	6.12	CS-134	.593E+01	3.60	RU-106	.198E+02	3.57
TE-132	.111E+02	2.92	XE-133	.436E+00	4.26	LA-140	.582E+01	3.53	I-135	.183E+02	3.30
PU-238	.982E+01	2.59	KR-88	.420E+00	4.10	TE-132	.398E+01	2.41	TE-132	.152E+02	2.74
CS-137	.787E+01	2.08	LA-140	.209E+00	2.04	CS-136	.372E+01	2.25	CS-134	.134E+02	2.42
CS-134	.731E+01	1.93	CS-134	.184E+00	1.80	NP-239	.349E+01	2.12	PU-241	.121E+02	2.17
CM-242	.690E+01	1.82	RB-88	.155E+00	1.51	BA-137M	.336E+01	2.04	PU-238	.982E+01	1.77
PU-240	.587E+01	1.55	TE-132	.130E+00	1.27	NB-95	.196E+01	1.19	CS-137	.789E+01	1.42
SR-90	.534E+01	1.41	NP-239	.126E+00	1.23	ZR-95	.187E+01	1.13	CM-242	.690E+01	1.25
Y-91	.479E+01	1.26	CS-136	.125E+00	1.23	TE-131M	.154E+01	0.93	NP-239	.658E+01	1.19
PU-239	.416E+01	1.10	BA-137M	.101E+00	0.99	RU-103	.111E+01	0.67	LA-140	.646E+01	1.17
AM-241	.336E+01	0.89	XE-135M	.894E-01	0.87	SB-127	.601E+00	0.36	PU-240	.587E+01	1.06
SR-89	.317E+01	0.84	TE-131M	.798E-01	0.78	BA-140	.543E+00	0.33	SR-90	.534E+01	0.96
I-135	.314E+01	0.83	NB-95	.634E-01	0.62	NB-97	.538E+00	0.33	Y-91	.497E+01	0.90





**Taulukko V.3.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva V.2). Tarkasteluaiakaväli 13.00 – 61.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	379	10.2	165	554
2	369	9.95	160	539
5	320	8.64	138	467
10	201	5.41	85.5	292
15	107	2.86	44.5	155
20	58.4	1.51	23.2	83.1
25	33.9	0.831	12.8	47.5
30	19.6	0.452	7.07	27.2
40	5.8	0.114	1.84	7.75
50	1.42	2.29E-02	0.383	1.83
60	0.294	3.76E-03	6.46E-02	0.362
70	5.13E-02	5.11E-04	9.07E-03	6.09E-02
80	7.56E-03	6.02E-05	1.11E-03	8.73E-03
90	9.26E-04	6.34E-06	1.20E-04	1.05E-03
100	9.21E-05	5.84E-07	1.12E-05	1.04E-04

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.4.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva V.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
12.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
13.05	4.63E+05	1.23E+04	373	4.76E+05
13.3	2.70E+05	7.18E+03	1.64E+03	2.79E+05
13.95	2.01E+05	5.33E+03	3.87E+03	2.10E+05
14.05	1.48E+04	517	4.02E+03	1.94E+04
15	1.25E+04	435	4.08E+03	1.70E+04
17	1.05E+04	365	4.18E+03	1.50E+04
18.95	9.49E+03	331	4.25E+03	1.41E+04
19.05	9.42E+03	252	4.25E+03	1.39E+04
21	8.78E+03	235	4.30E+03	1.33E+04
23	8.31E+03	223	4.35E+03	1.29E+04
24.95	7.85E+03	210	4.39E+03	1.25E+04

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
25.05	1.38E+03	8.34	4.39E+03	5.78E+03
27	1.33E+03	8.03	4.18E+03	5.52E+03
29	1.28E+03	7.76	4.00E+03	5.29E+03
31	1.25E+03	7.53	3.84E+03	5.09E+03
33	1.21E+03	7.32	3.69E+03	4.91E+03
35	1.18E+03	7.15	3.56E+03	4.75E+03
36.95	1.16E+03	6.99	3.45E+03	4.62E+03
37.05	0.00E+00	0.00E+00	3.45E+03	3.45E+03
41	0.00E+00	0.00E+00	3.23E+03	3.23E+03
45	0.00E+00	0.00E+00	3.04E+03	3.04E+03
49	0.00E+00	0.00E+00	2.89E+03	2.89E+03
53	0.00E+00	0.00E+00	2.75E+03	2.75E+03
57	0.00E+00	0.00E+00	2.63E+03	2.63E+03
61	0.00E+00	0.00E+00	2.52E+03	2.52E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.5.** Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aikaisemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	4.63E+05	1.23E+04	373	4.76E+05
2	4.11E+05	1.09E+04	331	4.22E+05
5	2.20E+05	5.85E+03	177	2.26E+05
10	2.36E+04	628	19.1	2.43E+04
15	574	15.3	0.463	590
20	3.15	8.37E-02	2.54E-03	3.24
25	3.91E-03	1.04E-04	3.15E-06	4.02E-03
30	1.10E-06	2.91E-08	8.83E-10	1.13E-06
40	9.94E-16	2.64E-17	8.00E-19	1.02E-15
50	2.35E-27	6.25E-29	1.89E-30	2.42E-27
60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.6.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m.  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva V.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	$^{131}\text{I}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	4.01E+07	5.79E+08
2	3.90E+07	5.64E+08
5	3.38E+07	4.90E+08
10	2.12E+07	3.08E+08
15	1.13E+07	1.64E+08
20	5.96E+06	8.76E+07
25	3.30E+06	4.87E+07
30	1.80E+06	2.67E+07
40	4.47E+05	6.62E+06
50	8.42E+04	1.25E+06
60	1.18E+04	1.75E+05
70	1.20E+03	1.78E+04
80	86.7	1.28E+03
90	4.42	65.5
100	0.159	2.35

**Taulukko V.7.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m.  $^{131}\text{I}$  -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	2.09E+07
2	1.86E+07
5	9.94E+06
10	1.07E+06
15	2.59E+04
20	142
25	0.176
30	4.95E-05
40	4.48E-14
50	1.06E-25
60	0.00E+00

**Taulukko V.8.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	1.74E+07
<sup>132</sup> I	4.34E+06
<sup>133</sup> I	2.35E+07
<sup>135</sup> I	8.21E+06
<sup>106</sup> Ru	1.83E+05
<sup>132</sup> Te	3.81E+06
<sup>144</sup> Ce	2.89E+05
<sup>134</sup> Cs	7.33E+05
<sup>137</sup> Cs	1.11E+06
<sup>238</sup> Pu	194
<sup>241</sup> Pu	1.56E+04

**Taulukko V.9.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 100 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
12.95	0.54	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
13.05	0.544	1.23E+04	373	1.27E+04	0.624
13.3	0.554	7.18E+03	1.64E+03	8.82E+03	2.97
13.95	0.581	5.33E+03	3.87E+03	9.20E+03	8.42
14.05	0.585	517	4.02E+03	4.54E+03	9.08
18.95	0.79	331	4.25E+03	4.58E+03	31.1
19.05	0.794	252	4.25E+03	4.50E+03	31.6
24.95	1.04	210	4.39E+03	4.60E+03	58.4
25.05	1.044	8.34	4.39E+03	4.40E+03	58.8
36.95	1.54	6.99	3.45E+03	3.46E+03	105
37.05	1.544	0.00E+00	3.45E+03	3.45E+03	105
61	2.542	0.00E+00	2.52E+03	2.52E+03	175
85	3.542	0.00E+00	2.04E+03	2.04E+03	229
109	4.542	0.00E+00	1.75E+03	1.75E+03	275
133	5.542	0.00E+00	1.53E+03	1.53E+03	314
157	6.542	0.00E+00	1.37E+03	1.37E+03	349
181	7.542	0.00E+00	1.24E+03	1.24E+03	380
205	8.542	0.00E+00	1.14E+03	1.14E+03	408
229	9.542	0.00E+00	1.05E+03	1.05E+03	435

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
253	10.542	0.00E+00	970	970	459
277	11.542	0.00E+00	904	904	481
301	12.542	0.00E+00	847	847	502
325	13.542	0.00E+00	796	796	522
349	14.542	0.00E+00	751	751	541
373	15.542	0.00E+00	712	712	558
397	16.542	0.00E+00	677	677	575
421	17.542	0.00E+00	645	645	591
445	18.542	0.00E+00	617	617	606
469	19.542	0.00E+00	592	592	620
493	20.542	0.00E+00	569	569	634
517	21.542	0.00E+00	548	548	648
541	22.542	0.00E+00	529	529	660
565	23.542	0.00E+00	511	511	673
589	24.542	0.00E+00	496	496	685
613	25.542	0.00E+00	481	481	697
637	26.542	0.00E+00	468	468	708
661	27.542	0.00E+00	455	455	719
685	28.542	0.00E+00	444	444	730
709	29.542	0.00E+00	433	433	741
733	30.542	0.00E+00	423	423	751 1 kk
757	31.542	0.00E+00	414	414	761
781	32.542	0.00E+00	406	406	771
805	33.542	0.00E+00	398	398	780
829	34.542	0.00E+00	390	390	790
853	35.542	0.00E+00	384	384	799
877	36.542	0.00E+00	377	377	808
901	37.542	0.00E+00	371	371	817
925	38.542	0.00E+00	365	365	826
949	39.542	0.00E+00	360	360	835
973	40.542	0.00E+00	355	355	843
997	41.542	0.00E+00	350	350	852
1021	42.542	0.00E+00	346	346	860
1045	43.542	0.00E+00	342	342	868
1069	44.542	0.00E+00	338	338	877
1093	45.542	0.00E+00	334	334	885
1117	46.542	0.00E+00	331	331	893
1141	47.542	0.00E+00	327	327	900
1165	48.542	0.00E+00	324	324	908

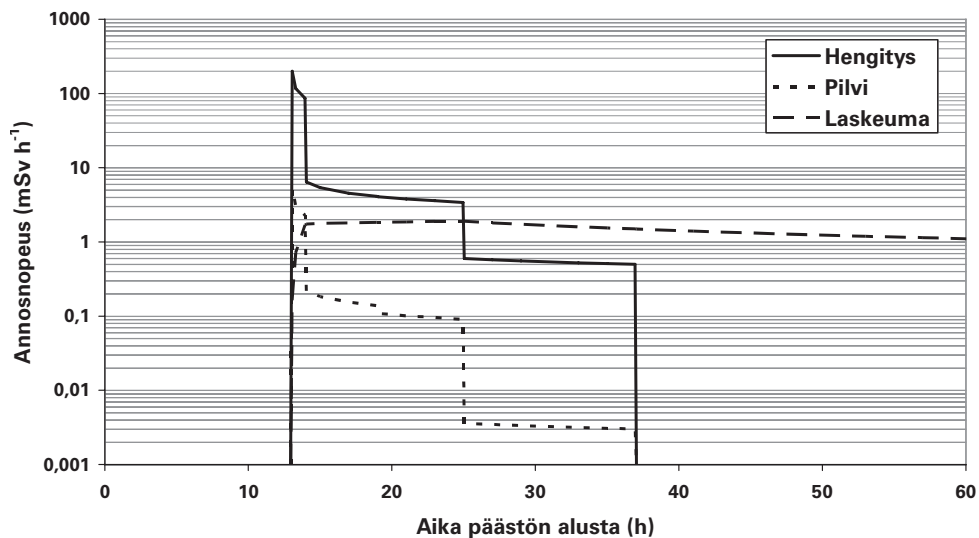
Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1189	49.542	0.00E+00	321	321	916
1213	50.542	0.00E+00	318	318	924
1237	51.542	0.00E+00	315	315	931
1261	52.542	0.00E+00	313	313	939
1285	53.542	0.00E+00	310	310	946
1309	54.542	0.00E+00	308	308	954
1333	55.542	0.00E+00	306	306	961
1357	56.542	0.00E+00	304	304	968
1381	57.542	0.00E+00	301	301	976
1405	58.542	0.00E+00	299	299	983
1429	59.542	0.00E+00	298	298	990
1453	60.542	0.00E+00	296	296	997 2 kk
1477	61.542	0.00E+00	294	294	1.00E+03
1501	62.542	0.00E+00	292	292	1.01E+03
1525	63.542	0.00E+00	291	291	1.02E+03
1549	64.542	0.00E+00	289	289	1.03E+03
1573	65.542	0.00E+00	288	288	1.03E+03
1597	66.542	0.00E+00	286	286	1.04E+03
1621	67.542	0.00E+00	285	285	1.05E+03
1645	68.542	0.00E+00	283	283	1.05E+03
1669	69.542	0.00E+00	282	282	1.06E+03
1693	70.542	0.00E+00	281	281	1.07E+03
1717	71.542	0.00E+00	279	279	1.07E+03
1741	72.542	0.00E+00	278	278	1.08E+03
1765	73.542	0.00E+00	277	277	1.09E+03
1789	74.542	0.00E+00	276	276	1.09E+03
1813	75.542	0.00E+00	275	275	1.10E+03
1837	76.542	0.00E+00	274	274	1.11E+03
1861	77.542	0.00E+00	272	272	1.11E+03
1885	78.542	0.00E+00	271	271	1.12E+03
1909	79.542	0.00E+00	270	270	1.13E+03
1933	80.542	0.00E+00	269	269	1.13E+03
1957	81.542	0.00E+00	268	268	1.14E+03
1981	82.542	0.00E+00	267	267	1.15E+03
2005	83.542	0.00E+00	266	266	1.15E+03
2029	84.542	0.00E+00	266	266	1.16E+03
2053	85.542	0.00E+00	265	265	1.16E+03
2077	86.542	0.00E+00	264	264	1.17E+03
2101	87.542	0.00E+00	263	263	1.18E+03

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2125	88.542	0.00E+00	262	262	1.18E+03
2149	89.542	0.00E+00	261	261	1.19E+03
2173	90.542	0.00E+00	260	260	1.20E+03 3 kk
2197	91.542	0.00E+00	260	260	1.20E+03

### Sosnovyi Bor → Kotka

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 13 h, päästö 24 h

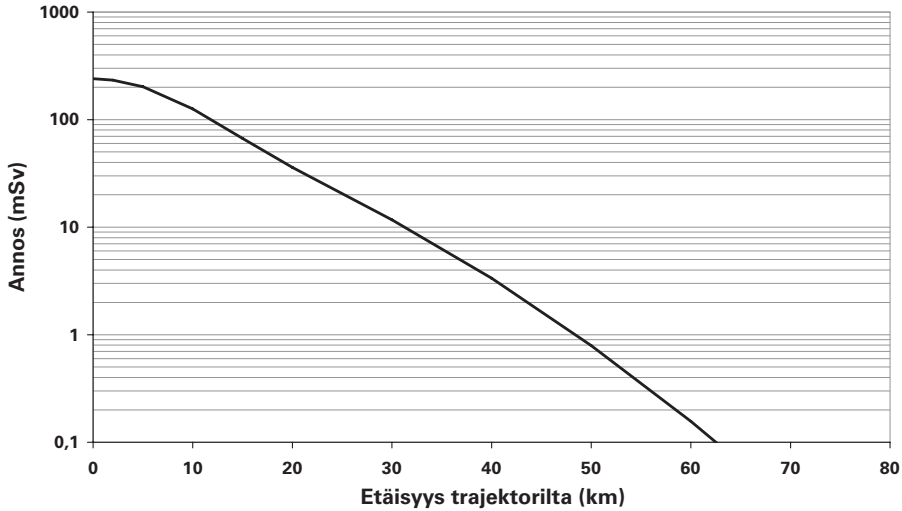
Annosnopeus trajektorilla ajan funktiona



Kuva V.4. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.

**Sosnovyi Bor → Kotka**

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 13 h, päästö 24 h  
Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa

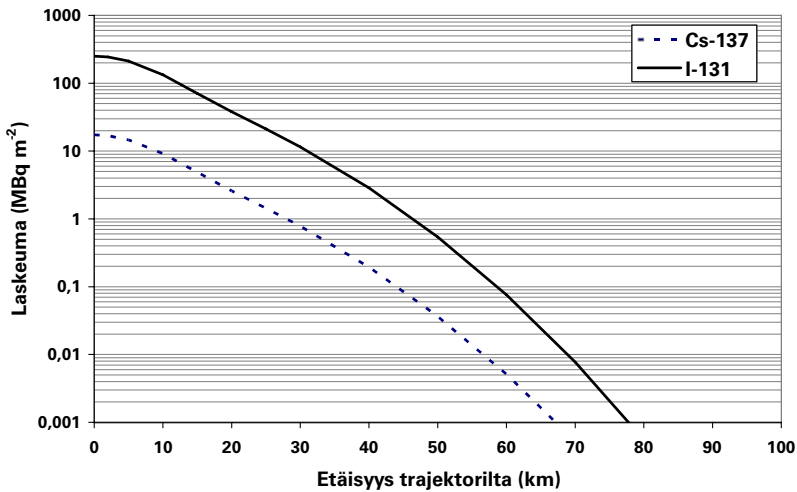


**Kuva V.5.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityksannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.

**Sosnovyi Bor → Kotka**

Leviämiskorkeus 500 m, kulkuaika 13 h, päästö 24 h  
Laskeuma-aktiivisuudet laskeuman tulon lakattua



**Kuva V.6.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (44 h päästön alkamisen jälkeen).



**Taulukko V.10. Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nukliidit.**

Integrointi välillä 13.0 h (pihven tulo) – 61.0 h.  
 Kokonaisannos 239 mSv (hengitys 164, pilvi 4.35, laskeuma 71.4). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.
I-131	.810E+02	49.51	I-133	.984E+00	22.59	I-133	.177E+02	24.83	I-131	.959E+02	40.06
I-133	.194E+02	11.87	I-135	.926E+00	21.28	I-132	.170E+02	23.80	I-133	.381E+02	15.93
CE-144	.104E+02	6.33	I-132	.702E+00	16.13	I-131	.144E+02	20.22	I-132	.179E+02	7.48
RU-106	.855E+01	5.23	I-131	.451E+00	10.35	I-135	.562E+01	7.87	CE-144	.104E+02	4.33
PU-241	.520E+01	3.18	XE-135	.251E+00	5.77	CS-134	.257E+01	3.60	RU-106	.855E+01	3.57
TE-132	.478E+01	2.92	XE-133	.169E+00	3.89	LA-140	.252E+01	3.53	I-135	.791E+01	3.30
PU-238	.424E+01	2.59	KR-88	.163E+00	3.74	TE-132	.172E+01	2.41	TE-132	.656E+01	2.74
CS-137	.340E+01	2.08	LA-140	.900E-01	2.07	CS-136	.161E+01	2.25	CS-134	.580E+01	2.42
CS-134	.316E+01	1.93	CS-134	.795E-01	1.83	NP-239	.151E+01	2.12	PU-241	.520E+01	2.17
GM-242	.298E+01	1.82	RB-88	.604E-01	1.39	BA-137M	.145E+01	2.04	PU-238	.424E+01	1.77
PU-240	.253E+01	1.55	TE-132	.563E-01	1.29	NB-95	.849E+00	1.19	CS-137	.341E+01	1.42
SR-90	.230E+01	1.41	NP-239	.543E-01	1.25	ZR-95	.809E+00	1.13	CM-242	.298E+01	1.24
Y-91	.207E+01	1.26	CS-136	.541E-01	1.24	TE-131M	.666E+00	0.93	NP-239	.284E+01	1.19
PU-239	.180E+01	1.10	BA-137M	.436E-01	1.00	RU-103	.481E+00	0.67	LA-140	.280E+01	1.17
AM-241	.145E+01	0.89	XE-135M	.385E-01	0.88	SB-127	.260E+00	0.36	PU-240	.253E+01	1.06
SR-89	.137E+01	0.84	TE-131M	.344E-01	0.79	BA-140	.235E+00	0.33	SR-90	.230E+01	0.96
I-135	.136E+01	0.83	NB-95	.274E-01	0.63	NB-97	.233E+00	0.33	Y-91	.214E+01	0.90

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
NP-239	.128E+01	0.78	ZR-95	.262E-01	0.60	NB-97M	.213E+00	0.30	ZR-95	.198E+01	0.83
ZR-95	.114E+01	0.70	SB-129	.153E-01	0.35	MO-99	.163E+00	0.23	CS-136	.191E+01	0.80
CM-244	.112E+01	0.68	NB-97	.150E-01	0.34	CE-143	.154E+00	0.22	PU-239	.180E+01	0.75
CE-141	.472E+00	0.29	RU-103	.149E-01	0.34	RH-106	.145E+00	0.20	BA-137M	.150E+01	0.63
RU-103	.408E+00	0.25	NB-97M	.148E-01	0.34	TC-99M	.114E+00	0.16	AM-241	.145E+01	0.61
PR-143	.394E+00	0.24	KR-85M	.134E-01	0.31	PR-144	.109E+00	0.15	SR-89	.142E+01	0.59
TE-129M	.370E+00	0.23	SB-127	.907E-02	0.21	CE-141	.944E-01	0.13	NB-95	.117E+01	0.49
TE-131M	.295E+00	0.18	SR-91	.709E-02	0.16	ZR-97	.784E-01	0.11	CM-244	.112E+01	0.47

**Taulukko V.11.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva V.5). Tarkasteluaiakaväli 13.00 – 61.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	164	4.35	71.4	239
2	159	4.23	69.5	233
5	138	3.67	60.1	202
10	86.7	2.3	37.2	126
15	46.4	1.22	19.3	66.9
20	25.2	0.643	10	35.9
25	14.6	0.355	5.56	20.5
30	8.48	0.193	3.07	11.7
40	2.5	4.88E-02	0.798	3.35
50	0.614	9.87E-03	0.166	0.79
60	0.127	1.62E-03	2.80E-02	0.157
70	2.22E-02	2.20E-04	3.94E-03	2.63E-02
80	3.27E-03	2.60E-05	4.81E-04	3.78E-03
90	4.01E-04	2.74E-06	5.20E-05	4.55E-04
100	3.98E-05	2.52E-07	4.87E-06	4.50E-05

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.12.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva V.4).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
12.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
13.05	2.00E+05	5.23E+03	161	2.05E+05
13.3	1.17E+05	3.06E+03	709	1.21E+05
13.95	8.66E+04	2.27E+03	1.68E+03	9.05E+04
14.05	6.40E+03	217	1.74E+03	8.36E+03
15	5.39E+03	183	1.77E+03	7.34E+03
17	4.53E+03	154	1.81E+03	6.49E+03
18.95	4.10E+03	139	1.84E+03	6.08E+03
19.05	4.07E+03	109	1.84E+03	6.02E+03
21	3.79E+03	101	1.86E+03	5.76E+03
23	3.59E+03	95.8	1.89E+03	5.57E+03
24.95	3.39E+03	90.5	1.90E+03	5.38E+03
25.05	596	3.6	1.90E+03	2.50E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
27	574	3.47	1.81E+03	2.39E+03
29	554	3.35	1.73E+03	2.29E+03
31	538	3.25	1.66E+03	2.20E+03
33	523	3.16	1.60E+03	2.13E+03
35	511	3.08	1.54E+03	2.06E+03
36.95	500	3.02	1.50E+03	2.00E+03
37.05	0.00E+00	0.00E+00	1.49E+03	1.49E+03
41	0.00E+00	0.00E+00	1.40E+03	1.40E+03
45	0.00E+00	0.00E+00	1.32E+03	1.32E+03
49	0.00E+00	0.00E+00	1.25E+03	1.25E+03
53	0.00E+00	0.00E+00	1.19E+03	1.19E+03
57	0.00E+00	0.00E+00	1.14E+03	1.14E+03
61	0.00E+00	0.00E+00	1.09E+03	1.09E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.13.** Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aikaisemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	2.00E+05	5.23E+03	161	2.05E+05
2	1.78E+05	4.64E+03	143	1.82E+05
5	9.51E+04	2.49E+03	76.5	9.76E+04
10	1.02E+04	267	8.22	1.05E+04
15	248	6.49	0.2	255
20	1.36	3.56E-02	1.10E-03	1.4
25	1.69E-03	4.41E-05	1.36E-06	1.73E-03
30	4.73E-07	1.24E-08	3.81E-10	4.86E-07
40	4.29E-16	1.12E-17	3.45E-19	4.41E-16
50	1.02E-27	2.66E-29	8.17E-31	1.04E-27
60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko V.14.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva V.6).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	1.74E+07	2.51E+08
2	1.69E+07	2.44E+08
5	1.46E+07	2.12E+08
10	9.18E+06	1.33E+08
15	4.88E+06	7.11E+07
20	2.58E+06	3.79E+07
25	1.43E+06	2.11E+07
30	7.83E+05	1.15E+07
40	1.94E+05	2.87E+06
50	3.65E+04	5.41E+05
60	5.13E+03	7.60E+04
70	521	7.72E+03
80	37.6	557
90	1.92	28.4
100	6.89E-02	1.02

**Taulukko V.15.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	9.01E+06
2	8.00E+06
5	4.28E+06
10	4.60E+05
15	1.12E+04
20	61.3
25	7.61E-02
30	2.13E-05
40	1.93E-14
50	4.57E-26
60	0.00E+00

**Taulukko V.16.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	7.49E+06
<sup>132</sup> I	1.88E+06
<sup>133</sup> I	1.08E+07
<sup>135</sup> I	3.54E+06
<sup>106</sup> Ru	7.91E+04
<sup>132</sup> Te	1.64E+06
<sup>144</sup> Ce	1.25E+05
<sup>134</sup> Cs	3.16E+05
<sup>137</sup> Cs	4.81E+05
<sup>238</sup> Pu	83.6
<sup>241</sup> Pu	6.73E+03

**Taulukko V.17.** Sosnovyi Bor ⇒ Kotka, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
12.95	0.54	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
13.05	0.544	5.23E+03	161	5.39E+03	0.266
13.3	0.554	3.06E+03	709	3.77E+03	1.27
13.95	0.581	2.27E+03	1.68E+03	3.94E+03	3.6
14.05	0.585	217	1.74E+03	1.96E+03	3.88
18.95	0.79	139	1.84E+03	1.98E+03	13.4
19.05	0.794	109	1.84E+03	1.95E+03	13.6
24.95	1.04	90.5	1.90E+03	1.99E+03	25.2
25.05	1.044	3.6	1.90E+03	1.91E+03	25.4
36.95	1.54	3.02	1.50E+03	1.50E+03	45.4
37.05	1.544	0.00E+00	1.49E+03	1.49E+03	45.5
61	2.542	0.00E+00	1.09E+03	1.09E+03	75.8
85	3.542	0.00E+00	886	886	99.3
109	4.542	0.00E+00	756	756	119
133	5.542	0.00E+00	664	664	136
157	6.542	0.00E+00	595	595	151
181	7.542	0.00E+00	539	539	165
205	8.542	0.00E+00	493	493	177
229	9.542	0.00E+00	454	454	188

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
253	10.542	0.00E+00	421	421	199
277	11.542	0.00E+00	392	392	208
301	12.542	0.00E+00	367	367	218
325	13.542	0.00E+00	345	345	226
349	14.542	0.00E+00	326	326	234
373	15.542	0.00E+00	308	308	242
397	16.542	0.00E+00	293	293	249
421	17.542	0.00E+00	280	280	256
445	18.542	0.00E+00	267	267	262
469	19.542	0.00E+00	256	256	269
493	20.542	0.00E+00	246	246	275
517	21.542	0.00E+00	237	237	281
541	22.542	0.00E+00	229	229	286
565	23.542	0.00E+00	222	222	292
589	24.542	0.00E+00	215	215	297
613	25.542	0.00E+00	208	208	302
637	26.542	0.00E+00	203	203	307
661	27.542	0.00E+00	197	197	312
685	28.542	0.00E+00	192	192	316
709	29.542	0.00E+00	188	188	321
733	30.542	0.00E+00	183	183	325 1 kk
757	31.542	0.00E+00	180	180	330
781	32.542	0.00E+00	176	176	334
805	33.542	0.00E+00	172	172	338
829	34.542	0.00E+00	169	169	342
853	35.542	0.00E+00	166	166	346
877	36.542	0.00E+00	163	163	350
901	37.542	0.00E+00	161	161	354
925	38.542	0.00E+00	158	158	358
949	39.542	0.00E+00	156	156	362
973	40.542	0.00E+00	154	154	365
997	41.542	0.00E+00	152	152	369
1021	42.542	0.00E+00	150	150	373
1045	43.542	0.00E+00	148	148	376
1069	44.542	0.00E+00	146	146	380
1093	45.542	0.00E+00	145	145	383
1117	46.542	0.00E+00	143	143	387
1141	47.542	0.00E+00	142	142	390
1165	48.542	0.00E+00	140	140	394

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1189	49.542	0.00E+00	139	139	397
1213	50.542	0.00E+00	138	138	400
1237	51.542	0.00E+00	137	137	403
1261	52.542	0.00E+00	136	136	407
1285	53.542	0.00E+00	134	134	410
1309	54.542	0.00E+00	133	133	413
1333	55.542	0.00E+00	132	132	416
1357	56.542	0.00E+00	132	132	420
1381	57.542	0.00E+00	131	131	423
1405	58.542	0.00E+00	130	130	426
1429	59.542	0.00E+00	129	129	429
1453	60.542	0.00E+00	128	128	432 2 kk
1477	61.542	0.00E+00	127	127	435
1501	62.542	0.00E+00	127	127	438
1525	63.542	0.00E+00	126	126	441
1549	64.542	0.00E+00	125	125	444
1573	65.542	0.00E+00	125	125	447
1597	66.542	0.00E+00	124	124	450
1621	67.542	0.00E+00	123	123	453
1645	68.542	0.00E+00	123	123	456
1669	69.542	0.00E+00	122	122	459
1693	70.542	0.00E+00	122	122	462
1717	71.542	0.00E+00	121	121	465
1741	72.542	0.00E+00	121	121	468
1765	73.542	0.00E+00	120	120	471
1789	74.542	0.00E+00	119	119	474
1813	75.542	0.00E+00	119	119	476
1837	76.542	0.00E+00	119	119	479
1861	77.542	0.00E+00	118	118	482
1885	78.542	0.00E+00	118	118	485
1909	79.542	0.00E+00	117	117	488
1933	80.542	0.00E+00	117	117	491
1957	81.542	0.00E+00	116	116	493
1981	82.542	0.00E+00	116	116	496
2005	83.542	0.00E+00	115	115	499
2029	84.542	0.00E+00	115	115	502
2053	85.542	0.00E+00	115	115	504
2077	86.542	0.00E+00	114	114	507
2101	87.542	0.00E+00	114	114	510



Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2125	88.542	0.00E+00	114	114	513
2149	89.542	0.00E+00	113	113	515
2173	90.542	0.00E+00	113	113	518 3 kk
2197	91.542	0.00E+00	112	112	521

## LIITE VI. Ignalina ⇒ Helsinki

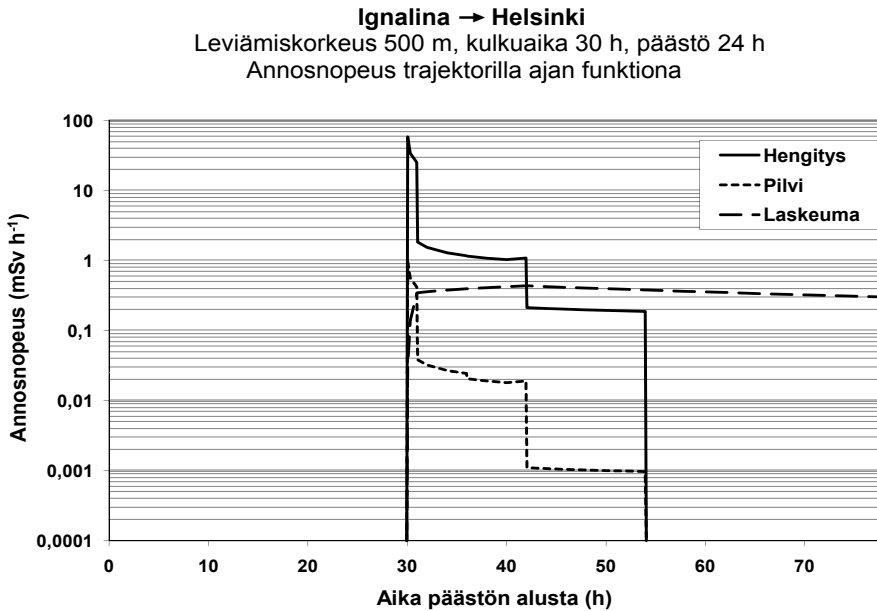
### Säteilyseurausanalyysi: Ignalina ⇒ Helsinki

Kuvissa VI.1 – VI.3 ja taulukoissa VI.1 – VI.9 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Ignalinan (nyt jo suljettu) RBMK-voimala ja kohde Helsinki. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on vain yksi, 500 m. Ignalinan voimalan etäisyys Helsingistä on noin 540 km. Laskuja tehtäessä liitteessä I esitetty RBMK-reaktorin perusinventaari (sähköteho 1000 MW) skaalattiin tekijällä 1,5 vastaamaan Ignalinan reaktorin tehoa 1500 MW. Lähde-termi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

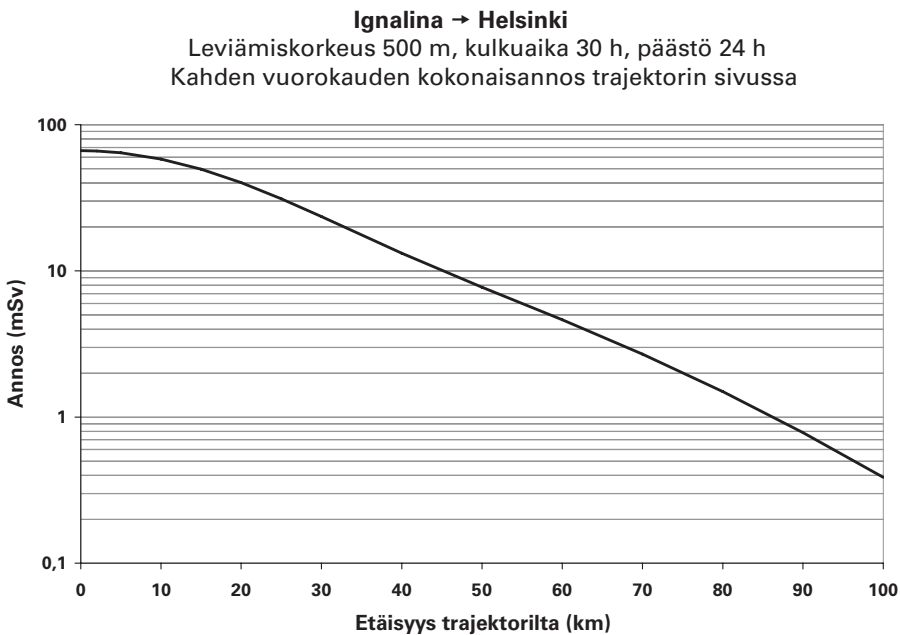
Huom! Kuvassa VI.1 ja parissa taulukossa näkyvä lievä hengitys- ja pilviannosnopeuden nousu noin kahdentoista tunnin kohdalla päästön tulosta ei ole todellista, vaan johtuu eräistä oletuksista ja käytetyn laskenta-algoritmin puutteista ko. tapauksessa.

**Taulukko VI.1.** Tapaus Ignalina ⇒ Helsinki. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannokset (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	2,7	0,56	2,2	0,23
Pitoisuusintegraali (MBq·h m <sup>-3</sup> )	2,3	0,47	1,9	0,19
Kilpirauhasen annos (mGy)	494	1,0	71	1,5
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	25	0,05	3,6	0,073
Osuus efektiivisestä kokonaishengitysannoksesta (%)	51,3	0,10	7,4	0,15

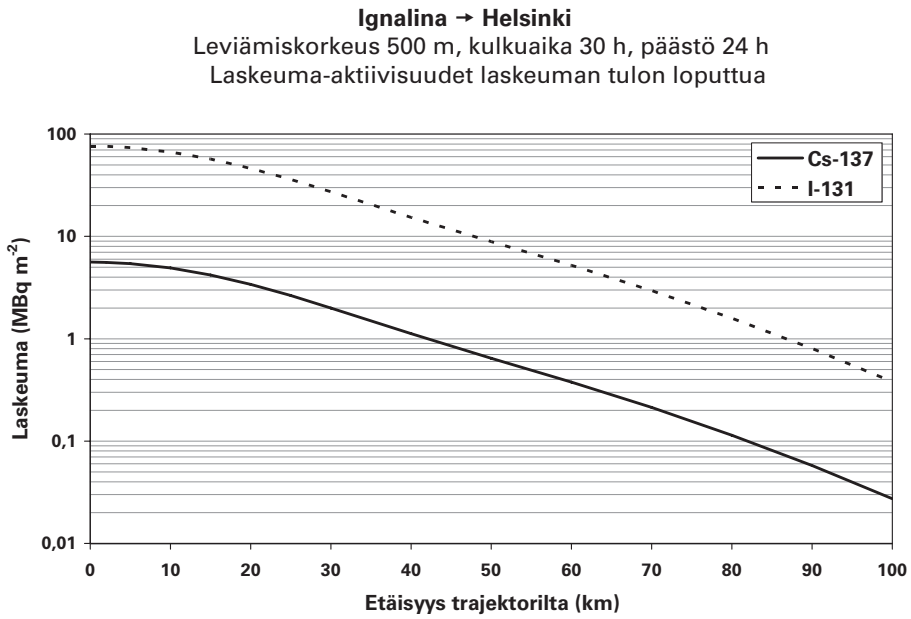


Kuva VI.1. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



Kuva VI.2. Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityksannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva VI.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (54 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko VI.2.** Ignalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi väliillä 30.0 h (pilven tulo) – 78.0 h. Kokonaisannos 66.5 mSv (hengitys 48.2, pivi 8.09, laskeuma 17.5). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysansnoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta. Annosten yksikkö mSv.

HENGYTYS			PIIVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.
I-131	.247E+02	51.29	I-133	.181E+00	22.30	I-132	.467E+01	26.66	I-131	.292E+02	43.96
I-133	.357E+01	7.40	I-132	.176E+00	21.81	I-131	.439E+01	25.05	I-133	.699E+01	10.51
CE-144	.341E+01	7.08	I-131	.137E+00	16.98	I-133	.324E+01	18.53	I-132	.490E+01	7.36
RU-106	.281E+01	5.84	XE-133	.568E-01	7.02	CS-134	.824E+00	4.70	CE-144	.341E+01	5.13
PU-241	.171E+01	3.55	I-135	.505E-01	6.24	LA-140	.804E+00	4.59	RU-106	.281E+01	4.23
PU-238	.140E+01	2.90	XE-135	.377E-01	4.65	CS-136	.501E+00	2.86	CS-134	.187E+01	2.81
TE-132	.133E+01	2.76	LA-140	.292E-01	3.61	TE-132	.478E+00	2.73	TE-132	.182E+01	2.74
CS-137	.110E+01	2.29	CS-134	.256E-01	3.16	BA-137M	.470E+00	2.68	PU-241	.171E+01	2.57
CS-134	.102E+01	2.11	CS-136	.169E-01	2.09	NP-239	.402E+00	2.30	PU-238	.140E+01	2.10
CM-242	.977E+00	2.03	TE-132	.157E-01	1.93	I-135	.305E+00	1.74	CS-137	.110E+01	1.66
PU-240	.832E+00	1.73	NP-239	.145E-01	1.80	NB-95	.277E+00	1.58	CM-242	.977E+00	1.47
SR-90	.759E+00	1.58	BA-137M	.141E-01	1.75	ZR-95	.262E+00	1.50	LA-140	.895E+00	1.35
Y-91	.676E+00	1.40	NB-95	.903E-02	1.12	RU-103	.155E+00	0.88	PU-240	.832E+00	1.25
PU-239	.590E+00	1.22	ZR-95	.857E-02	1.06	TE-131M	.145E+00	0.83	SR-90	.759E+00	1.14

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
AM-241	.478E+00	0.99	TE-131M	.751E-02	0.93	SB-127	.739E-01	0.42	NP-239	.759E+00	1.14
SR-89	.447E+00	0.93	RU-103	.484E-02	0.60	BA-140	.737E-01	0.42	Y-91	.700E+00	1.05
ZR-95	.375E+00	0.78	SB-127	.258E-02	0.32	RH-106	.474E-01	0.27	ZR-95	.646E+00	0.97
CM-244	.370E+00	0.77	NB-97	.246E-02	0.30	MO-99	.444E-01	0.25	CS-136	.594E+00	0.89
NP-239	.342E+00	0.71	NB-97M	.243E-02	0.30	NB-97	.380E-01	0.22	PU-239	.590E+00	0.89
CE-141	.153E+00	0.32	BA-140	.215E-02	0.27	PR-144	.356E-01	0.20	BA-137M	.484E+00	0.73
RU-103	.132E+00	0.27	XE-135M	.210E-02	0.26	CE-143	.351E-01	0.20	AM-241	.478E+00	0.72
PR-143	.128E+00	0.27	MO-99	.145E-02	0.18	NB-97M	.347E-01	0.20	SR-89	.464E+00	0.70
TE-129M	.118E+00	0.24	CE-143	.141E-02	0.17	TC-99M	.313E-01	0.18	I-135	.430E+00	0.65
NB-95	.964E-01	0.20	TC-99M	.111E-02	0.14	CE-141	.304E-01	0.17	NB-95	.383E+00	0.58
CS-136	.757E-01	0.16	RH-106	.947E-03	0.12	Y-91	.240E-01	0.14	CM-244	.370E+00	0.56

**Taulukko VI.3.** Igalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva VI.2). Tarkasteluaikaväli 30.00 – 78.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	48.2	0.809	17.5	66.5
2	47.9	0.805	17.4	66.1
5	46.6	0.783	16.9	64.2
10	42.2	0.709	15.3	58.2
15	36	0.605	13	49.6
20	29.2	0.49	10.4	40.1
25	22.7	0.38	8.02	31.1
30	17.2	0.287	6	23.5
40	9.76	0.161	3.29	13.2
50	5.76	9.27E-02	1.87	7.72
60	3.47	5.42E-02	1.09	4.62
70	2.04	3.08E-02	0.621	2.69
80	1.14	1.66E-02	0.336	1.49
90	0.601	8.42E-03	0.171	0.781
100	0.3	4.04E-03	8.25E-02	0.387

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VI.4.** Igalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva VI.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
29.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
30.05	5.83E+04	969	31.4	5.93E+04
30.3	3.41E+04	566	139	3.48E+04
30.95	2.53E+04	420	332	2.60E+04
31.05	1.83E+03	38.2	346	2.21E+03
32	1.54E+03	32.2	359	1.93E+03
34	1.29E+03	27	379	1.70E+03
35.95	1.17E+03	24.5	396	1.59E+03
36.05	1.16E+03	20.4	396	1.58E+03
38	1.08E+03	19.1	410	1.51E+03
40	1.03E+03	18	423	1.47E+03
41.95	1.09E+03	19.1	436	1.54E+03
42.05	213	1.1	436	650

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
44	207	1.07	425	634
46	202	1.04	415	618
48	198	1.02	406	605
50	194	1	397	592
52	191	0.985	389	581
53.95	188	0.97	381	570
54.05	0.00E+00	0.00E+00	381	381
58	0.00E+00	0.00E+00	364	364
62	0.00E+00	0.00E+00	350	350
66	0.00E+00	0.00E+00	336	336
70	0.00E+00	0.00E+00	324	324
74	0.00E+00	0.00E+00	313	313
78	0.00E+00	0.00E+00	303	303

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VI.5.** Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	5.83E+04	969	31.4	5.93E+04
2	5.70E+04	947	30.7	5.79E+04
5	5.05E+04	839	27.2	5.13E+04
10	3.27E+04	544	17.6	3.33E+04
15	1.59E+04	264	8.55	1.61E+04
20	5.77E+03	96	3.11	5.87E+03
25	1.57E+03	26.1	0.847	1.60E+03
30	321	5.33	0.173	326
40	5.61	9.32E-02	3.02E-03	5.7
50	3.08E-02	5.12E-04	1.66E-05	3.14E-02
60	5.34E-05	8.87E-07	2.87E-08	5.43E-05
70	2.91E-08	4.83E-10	1.57E-11	2.96E-08
80	4.98E-12	8.28E-14	2.68E-15	5.07E-12
90	2.69E-16	4.47E-18	1.45E-19	2.73E-16
100	4.56E-21	7.58E-23	2.46E-24	4.64E-21

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisten terveysvaikutusten kannalta.



**Taulukko VI.6.** Ignalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m.  $^{137}\text{Cs}$  - ja  $^{131}\text{I}$  -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva VI.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	$^{131}\text{I}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	5.61E+06	7.62E+07
2	5.58E+06	7.58E+07
5	5.43E+06	7.37E+07
10	4.92E+06	6.68E+07
15	4.20E+06	5.71E+07
20	3.40E+06	4.62E+07
25	2.64E+06	3.60E+07
30	2.00E+06	2.73E+07
40	1.12E+06	1.53E+07
50	6.45E+05	8.88E+06
60	3.77E+05	5.20E+06
70	2.13E+05	2.95E+06
80	1.14E+05	1.58E+06
90	5.77E+04	8.00E+05
100	2.74E+04	3.80E+05

**Taulukko VI.7.** Ignalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m.  $^{131}\text{I}$  -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	2.74E+06
2	2.68E+06
5	2.37E+06
10	1.54E+06
15	7.46E+05
20	2.71E+05
25	7.39E+04
30	1.51E+04
40	263
50	1.45
60	2.51E-03
70	1.37E-06
80	2.34E-10
90	1.26E-14
100	2.14E-19

**Taulukko VI.8.** Igalina  $\Rightarrow$  Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	2.29E+06
<sup>132</sup> I	4.71E+05
<sup>133</sup> I	1.86E+06
<sup>135</sup> I	1.92E+05
<sup>106</sup> Ru	2.60E+04
<sup>132</sup> Te	4.57E+05
<sup>144</sup> Ce	4.10E+04
<sup>134</sup> Cs	1.02E+05
<sup>137</sup> Cs	1.56E+05
<sup>238</sup> Pu	27.6
<sup>241</sup> Pu	2.21E+03

**Taulukko VI.9.** Igalina ⇒ Helsinki, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
29.95	1.248	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
30.05	1.252	969	31.4	1.00E+03	4.92E-02
30.3	1.262	566	139	705	0.235
30.95	1.29	420	332	752	0.675
31.05	1.294	38.2	346	384	0.73
35.95	1.498	24.5	396	420	2.69
36.05	1.502	20.4	396	417	2.73
41.95	1.748	19.1	436	455	5.3
42.05	1.752	1.1	436	437	5.34
53.95	2.248	0.97	381	382	10.2
54.05	2.252	0.00E+00	381	381	10.2
78	3.25	0.00E+00	303	303	18.3
102	4.25	0.00E+00	255	255	25
126	5.25	0.00E+00	223	223	30.7
150	6.25	0.00E+00	199	199	35.8
174	7.25	0.00E+00	179	179	40.3
198	8.25	0.00E+00	164	164	44.4
222	9.25	0.00E+00	151	151	48.2
246	10.25	0.00E+00	139	139	51.6
270	11.25	0.00E+00	130	130	54.9
294	12.25	0.00E+00	121	121	57.9
318	13.25	0.00E+00	114	114	60.7
342	14.25	0.00E+00	107	107	63.3
366	15.25	0.00E+00	102	102	65.8
390	16.25	0.00E+00	96.5	96.5	68.2
414	17.25	0.00E+00	91.9	91.9	70.5
438	18.25	0.00E+00	87.8	87.8	72.6
462	19.25	0.00E+00	84.2	84.2	74.7
486	20.25	0.00E+00	80.8	80.8	76.7
510	21.25	0.00E+00	77.8	77.8	78.6
534	22.25	0.00E+00	75.1	75.1	80.4
558	23.25	0.00E+00	72.6	72.6	82.2
582	24.25	0.00E+00	70.3	70.3	83.9
606	25.25	0.00E+00	68.2	68.2	85.6
630	26.25	0.00E+00	66.3	66.3	87.2

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
654	27.25	0.00E+00	64.5	64.5	88.7
678	28.25	0.00E+00	62.8	62.8	90.3
702	29.25	0.00E+00	61.3	61.3	91.8
726	30.25	0.00E+00	59.9	59.9	93.2 1 kk
750	31.25	0.00E+00	58.6	58.6	94.6
774	32.25	0.00E+00	57.4	57.4	96
798	33.25	0.00E+00	56.2	56.2	97.4
822	34.25	0.00E+00	55.2	55.2	98.7
846	35.25	0.00E+00	54.2	54.2	100
870	36.25	0.00E+00	53.3	53.3	101
894	37.25	0.00E+00	52.4	52.4	103
918	38.25	0.00E+00	51.6	51.6	104
942	39.25	0.00E+00	50.8	50.8	105
966	40.25	0.00E+00	50.1	50.1	106
990	41.25	0.00E+00	49.4	49.4	107
1014	42.25	0.00E+00	48.8	48.8	109
1038	43.25	0.00E+00	48.2	48.2	110
1062	44.25	0.00E+00	47.6	47.6	111
1086	45.25	0.00E+00	47.1	47.1	112
1110	46.25	0.00E+00	46.6	46.6	113
1134	47.25	0.00E+00	46.1	46.1	114
1158	48.25	0.00E+00	45.7	45.7	115
1182	49.25	0.00E+00	45.2	45.2	117
1206	50.25	0.00E+00	44.8	44.8	118
1230	51.25	0.00E+00	44.4	44.4	119
1254	52.25	0.00E+00	44.1	44.1	120
1278	53.25	0.00E+00	43.7	43.7	121
1302	54.25	0.00E+00	43.4	43.4	122
1326	55.25	0.00E+00	43	43	123
1350	56.25	0.00E+00	42.7	42.7	124
1374	57.25	0.00E+00	42.4	42.4	125
1398	58.25	0.00E+00	42.2	42.2	126
1422	59.25	0.00E+00	41.9	41.9	127
1446	60.25	0.00E+00	41.6	41.6	128
1470	61.25	0.00E+00	41.4	41.4	129 2 kk
1494	62.25	0.00E+00	41.1	41.1	130
1518	63.25	0.00E+00	40.9	40.9	131
1542	64.25	0.00E+00	40.7	40.7	132

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1566	65.25	0.00E+00	40.4	40.4	133
1590	66.25	0.00E+00	40.2	40.2	134
1614	67.25	0.00E+00	40	40	135
1638	68.25	0.00E+00	39.8	39.8	136
1662	69.25	0.00E+00	39.6	39.6	137
1686	70.25	0.00E+00	39.5	39.5	138
1710	71.25	0.00E+00	39.3	39.3	139
1734	72.25	0.00E+00	39.1	39.1	140
1758	73.25	0.00E+00	38.9	38.9	140
1782	74.25	0.00E+00	38.8	38.8	141
1806	75.25	0.00E+00	38.6	38.6	142
1830	76.25	0.00E+00	38.4	38.4	143
1854	77.25	0.00E+00	38.3	38.3	144
1878	78.25	0.00E+00	38.1	38.1	145
1902	79.25	0.00E+00	38	38	146
1926	80.25	0.00E+00	37.8	37.8	147
1950	81.25	0.00E+00	37.7	37.7	148
1974	82.25	0.00E+00	37.6	37.6	149
1998	83.25	0.00E+00	37.4	37.4	150
2022	84.25	0.00E+00	37.3	37.3	151
2046	85.25	0.00E+00	37.2	37.2	151
2070	86.25	0.00E+00	37	37	152
2094	87.25	0.00E+00	36.9	36.9	153
2118	88.25	0.00E+00	36.8	36.8	154
2142	89.25	0.00E+00	36.7	36.7	155
2166	90.25	0.00E+00	36.6	36.6	156
2190	91.25	0.00E+00	36.4	36.4	157 3 kk
2214	92.25	0.00E+00	36.3	36.3	158

## LIITE VII. Kuola ⇒ Oulu

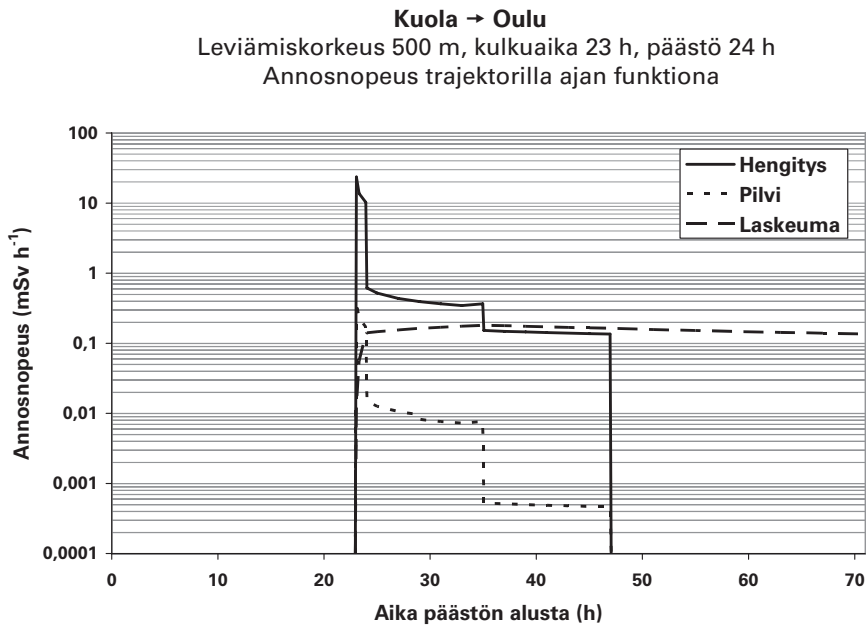
### Säteilyseurausanalyysi: Kuola ⇒ Oulu

Kuvissa VII.1–VII.3 ja taulukoissa VII.1–VII.9 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Kuolan PWR-voimala ja kohde Oulu. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on vain yksi, 500 m. Kuolan voimalan etäisyys Oulusta on noin 410 km. Laskuja tehtäessä inventaarina käytettiin liitteessä I esitettyä PWR-reaktorin perusinventaaria (Loviisan reaktorit ennen tehonkorotusta). Lähde-termi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

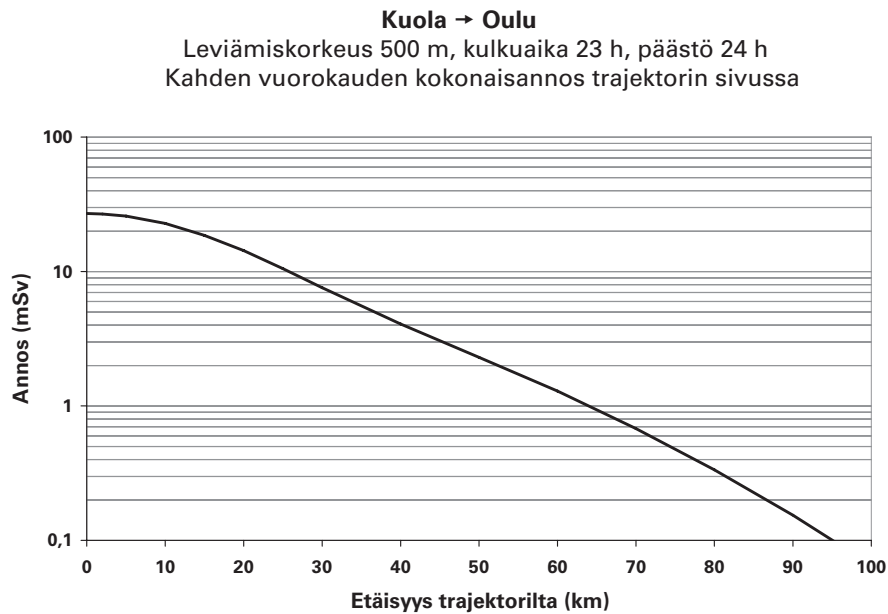
Huom! Kuvassa VII.1 ja parissa taulukossa näkyvä lievä hengitys- ja pilviannosnopeuden nousu noin kahdentoista tunnin kohdalla päästön tulosta ei ole todellista, vaan johtuu eräistä oletuksista ja käytetyn laskenta-algoritmin puutteista ko. tapauksessa.

**Taulukko VII.1.** Tapaus Kuola ⇒ Oulu. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannokset (annoskeritymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	0,51	0,38	0,51	0,093
Pitoisuusintegraali (MBq·h m <sup>-3</sup> )	0,43	0,31	0,43	0,077
Kilpirauhasen annos (mGy)	93	0,68	16,4	0,59
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	4,6	0,034	0,82	0,030
Osuus efektiivisestä kokonaihengitysannoksesta (%)	24	0,18	4,3	0,15

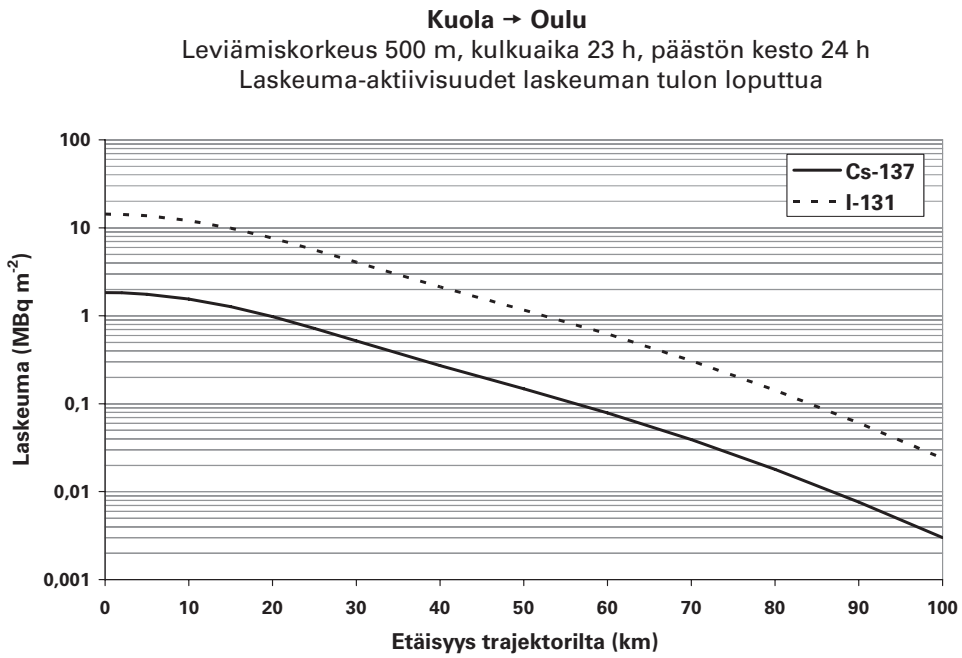


**Kuva VII.1.** Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



**Kuva VII.2.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityksannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva VII.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (47 h päästön alkamisen jälkeen).



**Taulukko VII.2.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi väliä 23.0 h (pilven tulo) – 71.0 h  
 Kokonaisannos 27.1 mSv (hengitys 19.3, pilvi .324, laskeuma 7.47). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.
I-131	.463E+01	24.02	I-132	.118E+00	36.31	I-132	.311E+01	41.62	I-131	.548E+01	20.24
RU-106	.228E+01	11.81	I-133	.415E-01	12.81	I-131	.823E+00	11.02	I-132	.326E+01	12.04
CM-242	.158E+01	8.18	I-131	.258E-01	7.94	I-133	.745E+00	9.98	RU-106	.228E+01	8.41
PU-238	.155E+01	8.02	I-135	.203E-01	6.25	CS-134	.607E+00	8.13	I-133	.161E+01	5.93
CE-144	.130E+01	6.75	CS-134	.189E-01	5.83	LA-140	.475E+00	6.35	CM-242	.158E+01	5.83
PU-241	.124E+01	6.41	XE-133	.155E-01	4.77	TE-132	.318E+00	4.26	PU-238	.155E+01	5.71
SR-90	.895E+00	4.64	LA-140	.140E-01	4.32	CS-136	.232E+00	3.10	CS-134	.138E+01	5.08
TE-132	.887E+00	4.60	XE-135	.125E-01	3.85	BA-137M	.154E+00	2.06	CE-144	.130E+01	4.81
I-133	.820E+00	4.25	TE-132	.104E-01	3.22	NP-239	.147E+00	1.96	PU-241	.124E+01	4.56
CM-244	.774E+00	4.01	CS-136	.783E-02	2.41	RU-103	.146E+00	1.96	TE-132	.122E+01	4.49
CS-134	.750E+00	3.89	NP-239	.531E-02	1.64	I-135	.122E+00	1.64	SR-90	.895E+00	3.31
PU-240	.363E+00	1.88	TE-131M	.529E-02	1.63	TE-131M	.102E+00	1.36	CM-244	.774E+00	2.86
CS-137	.362E+00	1.88	BA-137M	.464E-02	1.43	NB-95	.802E-01	1.07	LA-140	.518E+00	1.91
SR-89	.336E+00	1.74	RU-103	.457E-02	1.41	ZR-95	.757E-01	1.01	PU-240	.363E+00	1.34

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.	Nuklidi	Annos	%-os.
PU-239	.211E+00	1.10	NB-95	.261E-02	0.81	BA-140	.640E-01	0.86	CS-137	.363E+00	1.34
TE-127M	.181E+00	0.94	ZR-95	.248E-02	0.76	MO-99	.427E-01	0.57	SR-89	.348E+00	1.29
Y-91	.173E+00	0.90	BA-140	.187E-02	0.58	RH-106	.383E-01	0.51	NP-239	.277E+00	1.02
RU-103	.125E+00	0.65	MO-99	.140E-02	0.43	TC-99M	.300E-01	0.40	RU-103	.276E+00	1.02
NP-239	.125E+00	0.65	KR-88	.128E-02	0.40	NB-97	.146E-01	0.20	CS-136	.275E+00	1.01
ZR-95	.108E+00	0.56	TC-99M	.107E-02	0.33	PR-144	.136E-01	0.18	PU-239	.211E+00	0.78
AM-241	.797E-01	0.41	NB-97	.944E-03	0.29	NB-97M	.133E-01	0.18	ZR-95	.187E+00	0.69
MO-99	.588E-01	0.30	NB-97M	.933E-03	0.29	SR-89	.127E-01	0.17	TE-127M	.182E+00	0.67
TE-129M	.577E-01	0.30	SR-91	.896E-03	0.28	CE-143	.123E-01	0.17	Y-91	.179E+00	0.66
BA-140	.573E-01	0.30	XE-135M	.843E-03	0.26	CE-141	.885E-02	0.12	I-135	.172E+00	0.64
TE-131M	.453E-01	0.23	RH-106	.766E-03	0.24	SR-91	.873E-02	0.12	BA-137M	.159E+00	0.59

**Taulukko VII.3.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva VII.2). Tarkasteluaikeväli 23.00 – 71.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	19.3	0.324	7.47	27.1
2	19.1	0.322	7.41	26.8
5	18.4	0.311	7.14	25.9
10	16.3	0.274	6.27	22.8
15	13.3	0.224	5.09	18.6
20	10.2	0.172	3.87	14.3
25	7.56	0.126	2.81	10.5
30	5.5	9.11E-02	2	7.59
40	2.99	4.78E-02	1.02	4.06
50	1.72	2.61E-02	0.554	2.3
60	0.978	1.40E-02	0.296	1.29
70	0.524	7.01E-03	0.149	0.68
80	0.262	3.27E-03	6.95E-02	0.335
90	0.122	1.42E-03	3.02E-02	0.154
100	5.29E-02	5.72E-04	1.22E-02	6.56E-02

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VII.4.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva VII.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
22.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
23.05	2.35E+04	389	12.8	2.39E+04
23.3	1.37E+04	227	56.5	1.40E+04
23.95	1.02E+04	168	135	1.05E+04
24.05	618	15	141	774
25	520	12.6	146	679
27	437	10.6	155	603
28.95	395	9.58	163	568
29.05	391	8.21	163	562
31	365	7.65	169	542
33	345	7.24	175	527
34.95	365	7.66	181	554
35.05	152	0.527	181	334
37	148	0.513	178	326

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
39	145	0.501	174	319
41	142	0.49	171	313
43	139	0.481	168	308
45	137	0.473	166	303
46.95	135	0.466	163	298
47.05	0.00E+00	0.00E+00	163	163
51	0.00E+00	0.00E+00	157	157
55	0.00E+00	0.00E+00	152	152
59	0.00E+00	0.00E+00	147	147
63	0.00E+00	0.00E+00	143	143
67	0.00E+00	0.00E+00	139	139
71	0.00E+00	0.00E+00	135	135

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VII.5.** Kuola  $\Rightarrow$  Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aikaisemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	2.35E+04	389	12.8	2.39E+04
2	2.28E+04	378	12.4	2.32E+04
5	1.95E+04	323	10.6	1.98E+04
10	1.12E+04	185	6.09	1.14E+04
15	4.41E+03	73	2.4	4.49E+03
20	1.20E+03	19.9	0.654	1.22E+03
25	225	3.73	0.123	229
30	29.1	0.482	1.59E-02	29.6
40	0.16	2.65E-03	8.71E-05	0.163
50	1.98E-04	3.28E-06	1.08E-07	2.02E-04
60	5.56E-08	9.20E-10	3.03E-11	5.66E-08
70	3.52E-12	5.83E-14	1.92E-15	3.58E-12
80	5.04E-17	8.35E-19	2.75E-20	5.13E-17
90	1.63E-22	2.70E-24	8.89E-26	1.66E-22
100	1.19E-28	1.98E-30	6.50E-32	1.21E-28

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VII.6.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva VII.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	1.84E+06	1.43E+07
2	1.83E+06	1.42E+07
5	1.76E+06	1.37E+07
10	1.55E+06	1.21E+07
15	1.27E+06	9.89E+06
20	9.75E+05	7.61E+06
25	7.17E+05	5.61E+06
30	5.17E+05	4.05E+06
40	2.71E+05	2.13E+06
50	1.48E+05	1.16E+06
60	7.85E+04	6.20E+05
70	3.90E+04	3.08E+05
80	1.79E+04	1.42E+05
90	7.63E+03	6.05E+04
100	3.01E+03	2.39E+04

**Taulukko VII.7.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	5.13E+05
2	4.98E+05
5	4.26E+05
10	2.44E+05
15	9.63E+04
20	2.62E+04
25	4.92E+03
30	636
40	3.49
50	4.33E-03
60	1.21E-06
70	7.69E-11
80	1.10E-15
90	3.56E-21
100	2.60E-27

**Taulukko VII.8.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq·h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	4.28E+05
<sup>132</sup> I	3.14E+05
<sup>133</sup> I	4.29E+05
<sup>135</sup> I	7.71E+04
<sup>106</sup> Ru	2.11E+04
<sup>132</sup> Te	3.05E+05
<sup>144</sup> Ce	1.56E+04
<sup>242</sup> Cm	542
<sup>90</sup> Sr	3.08E+03
<sup>238</sup> Pu	30.5
<sup>241</sup> Pu	1.60E+03

**Taulukko VII.9.** Kuola ⇒ Oulu, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
22.95	0.956	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
23.05	0.96	389	12.8	401	1.98E-02
23.3	0.971	227	56.5	284	9.46E-02
23.95	0.998	168	135	304	0.272
24.05	1.002	15	141	156	0.294
28.95	1.206	9.58	163	172	1.09
29.05	1.21	8.21	163	171	1.11
34.95	1.456	7.66	181	189	2.17
35.05	1.46	0.527	181	182	2.19
46.95	1.956	0.466	163	164	4.24
47.05	1.96	0.00E+00	163	163	4.25
71	2.958	0.00E+00	135	135	7.8
95	3.958	0.00E+00	116	116	10.8
119	4.958	0.00E+00	102	102	13.4
143	5.958	0.00E+00	91.4	91.4	15.7
167	6.958	0.00E+00	82.5	82.5	17.8
191	7.958	0.00E+00	75.2	75.2	19.7
215	8.958	0.00E+00	69.1	69.1	21.4
239	9.958	0.00E+00	63.9	63.9	23
263	10.958	0.00E+00	59.5	59.5	24.5
287	11.958	0.00E+00	55.7	55.7	25.9
311	12.958	0.00E+00	52.5	52.5	27.2
335	13.958	0.00E+00	49.7	49.7	28.4
359	14.958	0.00E+00	47.2	47.2	29.6
383	15.958	0.00E+00	45.1	45.1	30.7
407	16.958	0.00E+00	43.2	43.2	31.7
431	17.958	0.00E+00	41.5	41.5	32.8
455	18.958	0.00E+00	40	40	33.7
479	19.958	0.00E+00	38.7	38.7	34.7
503	20.958	0.00E+00	37.5	37.5	35.6
527	21.958	0.00E+00	36.4	36.4	36.5
551	22.958	0.00E+00	35.4	35.4	37.3
575	23.958	0.00E+00	34.5	34.5	38.2
599	24.958	0.00E+00	33.7	33.7	39

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
623	25.958	0.00E+00	32.9	32.9	39.8
647	26.958	0.00E+00	32.2	32.2	40.6
671	27.958	0.00E+00	31.5	31.5	41.3
695	28.958	0.00E+00	30.9	30.9	42.1
719	29.958	0.00E+00	30.4	30.4	42.8
743	30.958	0.00E+00	29.8	29.8	43.5 1 kk
767	31.958	0.00E+00	29.3	29.3	44.3
791	32.958	0.00E+00	28.9	28.9	45
815	33.958	0.00E+00	28.4	28.4	45.6
839	34.958	0.00E+00	28	28	46.3
863	35.958	0.00E+00	27.6	27.6	47
887	36.958	0.00E+00	27.3	27.3	47.6
911	37.958	0.00E+00	26.9	26.9	48.3
935	38.958	0.00E+00	26.6	26.6	48.9
959	39.958	0.00E+00	26.3	26.3	49.6
983	40.958	0.00E+00	26	26	50.2
1007	41.958	0.00E+00	25.7	25.7	50.8
1031	42.958	0.00E+00	25.4	25.4	51.4
1055	43.958	0.00E+00	25.2	25.2	52
1079	44.958	0.00E+00	24.9	24.9	52.6
1103	45.958	0.00E+00	24.7	24.7	53.2
1127	46.958	0.00E+00	24.5	24.5	53.8
1151	47.958	0.00E+00	24.3	24.3	54.4
1175	48.958	0.00E+00	24.1	24.1	55
1199	49.958	0.00E+00	23.9	23.9	55.6
1223	50.958	0.00E+00	23.7	23.7	56.1
1247	51.958	0.00E+00	23.5	23.5	56.7
1271	52.958	0.00E+00	23.3	23.3	57.3
1295	53.958	0.00E+00	23.2	23.2	57.8
1319	54.958	0.00E+00	23	23	58.4
1343	55.958	0.00E+00	22.9	22.9	58.9
1367	56.958	0.00E+00	22.7	22.7	59.5
1391	57.958	0.00E+00	22.6	22.6	60
1415	58.958	0.00E+00	22.4	22.4	60.6
1439	59.958	0.00E+00	22.3	22.3	61.1
1463	60.958	0.00E+00	22.2	22.2	61.6 2 kk
1487	61.958	0.00E+00	22.1	22.1	62.2
1511	62.958	0.00E+00	22.0	22.0	62.7



Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1535	63.958	0.00E+00	21.8	21.8	63.2
1559	64.958	0.00E+00	21.7	21.7	63.7
1583	65.958	0.00E+00	21.6	21.6	64.3
1607	66.958	0.00E+00	21.5	21.5	64.8
1631	67.958	0.00E+00	21.4	21.4	65.3
1655	68.958	0.00E+00	21.3	21.3	65.8
1679	69.958	0.00E+00	21.2	21.2	66.3
1703	70.958	0.00E+00	21.1	21.1	66.8
1727	71.958	0.00E+00	21.1	21.1	67.3
1751	72.958	0.00E+00	21.0	21.0	67.8
1775	73.958	0.00E+00	20.9	20.9	68.3
1799	74.958	0.00E+00	20.8	20.8	68.8
1823	75.958	0.00E+00	20.7	20.7	69.3
1847	76.958	0.00E+00	20.6	20.6	69.8
1871	77.958	0.00E+00	20.6	20.6	70.3
1895	78.958	0.00E+00	20.5	20.5	70.8
1919	79.958	0.00E+00	20.4	20.4	71.3
1943	80.958	0.00E+00	20.4	20.4	71.8
1967	81.958	0.00E+00	20.3	20.3	72.3
1991	82.958	0.00E+00	20.2	20.2	72.8
2015	83.958	0.00E+00	20.2	20.2	73.3
2039	84.958	0.00E+00	20.1	20.1	73.7
2063	85.958	0.00E+00	20.0	20.0	74.2
2087	86.958	0.00E+00	20.0	20.0	74.7
2111	87.958	0.00E+00	19.9	19.9	75.2
2135	88.958	0.00E+00	19.8	19.8	75.7
2159	89.958	0.00E+00	19.8	19.8	76.1
2183	90.958	0.00E+00	19.7	19.7	76.6 3 kk
2207	91.958	0.00E+00	19.7	19.7	77.1

## LIITE VIII. Forsmark ⇒ Turku

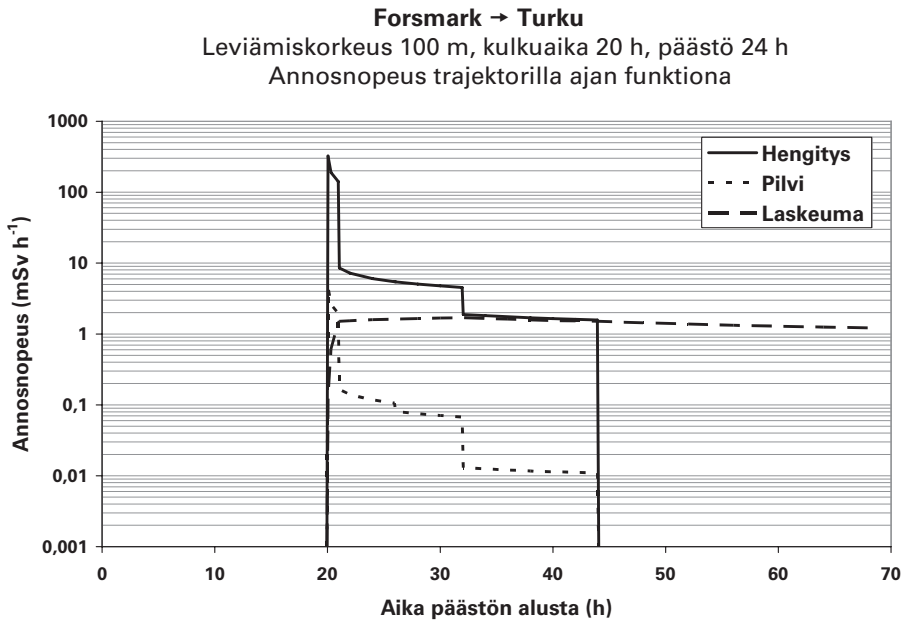
### Säteilyseurausanalyysi: Forsmark ⇒ Turku

Kuvissa VIII.1–VIII.6 ja taulukoissa VIII.1–VIII.17 on esitetty edellä kohdassa 4.5 mainitut tulokset tapaukselle, jossa voimala on Forsmarkin BWR-voimala ja kohde Turku. Tarkasteltavia leviämiskorkeuksia on kaksi, 100 m ja 500 m. Kuvat ja taulukot on järjestetty siten, että ensin – oheisen taulukon VIII.1 jälkeen – ovat 100 metrin leviämiskorkeuteen liittyvät tulokset (kuvat VIII.1–VIII.3, taulukot VIII.2–VIII.9) ja sen jälkeen vastaavat 500 metrin korkeuden tulokset (kuvat VIII.4–VIII.6, taulukot VIII.10–VIII.17).

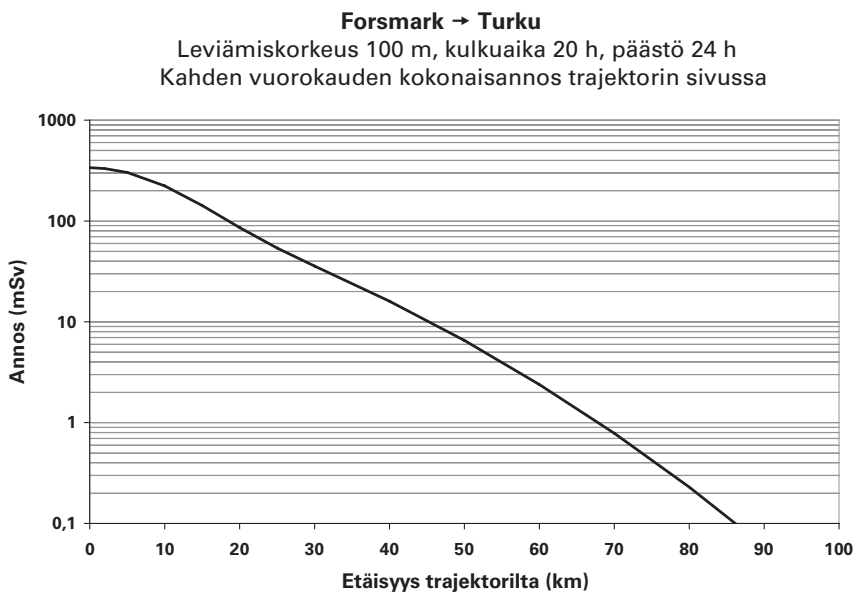
Forsmarkin voimalan etäisyys Turusta on noin 220 km. Laskuja tehtäessä liitteessä I esitetty BWR-reaktorin perusinventaaari (Olkiluodon reaktorit ennen tehonkorotusta) skaalattiin tehosuhteella 1,36 vastaamaan likimain Forsmarkin reaktorien tehoa 1000 MW (tosin suurimman Forsmarkin reaktorin sähköteho on 1200 MW). Lähdetermi ja meteorologiset parametrit ovat taulukoissa 4.1 ja 4.2.

**Taulukko VIII.1.** Tapaus Forsmark ⇒ Turku. Jodi-isotooppien maksimipitoisuudet pintailmassa, pitoisuusintegraalit, kilpirauhasen annokset ja efektiiviset hengitysannokset (annoskertymät) trajektorilla.

	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>135</sup> I
<u>Leviämiskorkeus 100 m</u>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	9,5	1,4	10,8	2,4
Pitoisuusintegraali (MBq·h m <sup>-3</sup> )	7,9	1,1	9,0	2,0
Kilpirauhasen annos (mGy)	1700	2,5	344	15
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	85	0,12	17	0,77
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	32,4	0,047	6,5	0,29
<u>Leviämiskorkeus 500 m</u>				
Maksimipitoisuus (MBq m <sup>-3</sup> )	4,2	0,64	4,8	1,1
Pitoisuusintegraali (MBq·h m <sup>-3</sup> )	3,5	0,51	4,0	0,90
Kilpirauhasen annos (mGy)	758	1,1	15	6,9
Efektiivinen hengitysannos (mSv)	38	0,055	7,6	0,34
Osuus efektiivisestä kokonais-hengitysannoksesta (%)	32,4	0,047	6,5	0,29

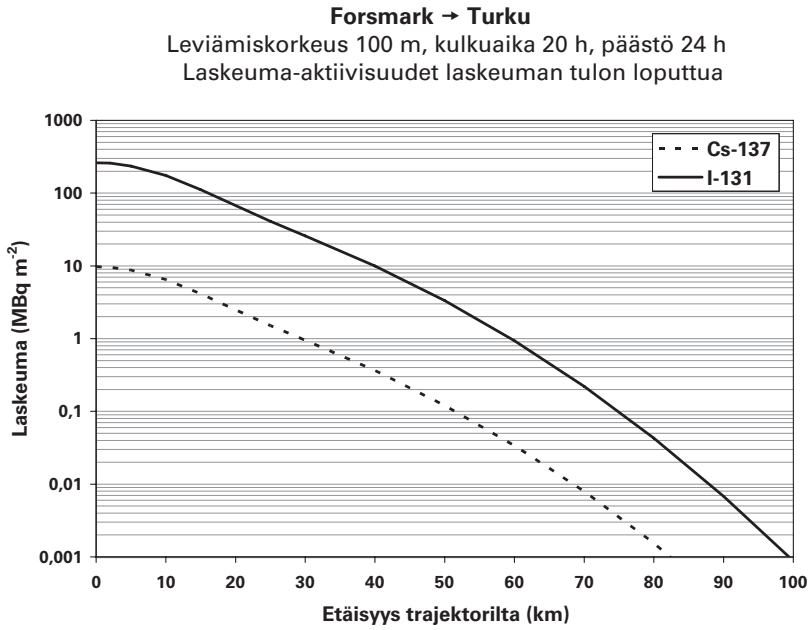


**Kuva VIII.1.** Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



**Kuva VIII.2.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityspanoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva VIII.3.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (44 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko VIII.2.** Forsmark ⇒ Turku, levämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nukliidit.

Integrointi välillä 20.0 h (pilven tulo) – 68.0 h  
 Kokonaisannos 336 mSv (hengitys 263, piivi 3.71, laskeuma 69.9). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.
I-131	.851E+02	32.41	I-133	.869E+00	23.46	I-133	.156E+02	22.37	I-131	.101E+03	29.96
CM-242	.449E+02	17.09	I-135	.526E+00	14.20	I-131	.151E+02	21.65	CM-242	.449E+02	13.35
SR-90	.188E+02	7.15	I-131	.473E+00	12.78	I-132	.107E+02	15.37	I-133	.337E+02	10.01
CE-144	.178E+02	6.79	I-132	.426E+00	11.49	LA-140	.104E+02	14.85	SR-90	.188E+02	5.58
I-133	.172E+02	6.53	XE-135	.292E+00	7.88	I-135	.318E+01	4.56	CE-144	.179E+02	5.32
PU-241	.146E+02	5.57	LA-140	.271E+00	7.31	CS-134	.241E+01	3.44	PU-241	.146E+02	4.35
PU-238	.960E+01	3.66	XE-133	.235E+00	6.33	BA-140	.161E+01	2.30	I-132	.113E+02	3.36
SR-89	.933E+01	3.55	CS-134	.747E-01	2.02	NP-239	.129E+01	1.85	LA-140	.112E+02	3.33
CM-244	.859E+01	3.27	BA-140	.467E-01	1.26	NB-95	.123E+01	1.75	SR-89	.969E+01	2.88
RU-106	.855E+01	3.25	NP-239	.464E-01	1.25	ZR-95	.116E+01	1.67	PU-238	.960E+01	2.86
PU-240	.366E+01	1.39	KR-88	.455E-01	1.23	CS-136	.111E+01	1.60	CM-244	.859E+01	2.55
TE-132	.314E+01	1.19	NB-95	.396E-01	1.07	TE-132	.110E+01	1.57	RU-106	.855E+01	2.54
CS-134	.297E+01	1.13	ZR-95	.378E-01	1.02	BA-137M	.816E+00	1.17	CS-134	.545E+01	1.62

HENGITYS			PILVI			LASKEUMA			YHTEENSÄ		
Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.	Nukliidi	Annos	%-os.
Y-91	.285E+01	1.08	CS-136	.376E-01	1.01	RU-103	.644E+00	0.92	I-135	.448E+01	1.33
PU-239	.239E+01	0.91	TE-132	.369E-01	1.00	SR-89	.357E+00	0.51	TE-132	.427E+01	1.27
CS-137	.191E+01	0.73	SR-91	.305E-01	0.82	TE-131M	.356E+00	0.51	PU-240	.366E+01	1.09
ZR-95	.165E+01	0.63	BA-137M	.245E-01	0.66	SR-91	.298E+00	0.43	BA-140	.308E+01	0.92
AM-241	.161E+01	0.61	XE-135M	.219E-01	0.59	NB-97	.246E+00	0.35	Y-91	.295E+01	0.88
BA-140	.143E+01	0.54	RU-103	.200E-01	0.54	SB-127	.241E+00	0.35	ZR-95	.285E+01	0.85
NP-239	.109E+01	0.42	TE-131M	.189E-01	0.51	NB-97M	.225E+00	0.32	NP-239	.243E+01	0.72
I-135	.770E+00	0.29	RB-88	.168E-01	0.45	MO-99	.216E+00	0.31	PU-239	.239E+01	0.71
CE-141	.662E+00	0.25	NB-97	.158E-01	0.43	CE-143	.204E+00	0.29	CS-137	.192E+01	0.57
PR-143	.611E+00	0.23	NB-97M	.156E-01	0.42	PR-144	.188E+00	0.27	NB-95	.169E+01	0.50
LA-140	.567E+00	0.22	Y-91M	.141E-01	0.38	TC-99M	.152E+00	0.22	AM-241	.161E+01	0.48
RU-103	.547E+00	0.21	SB-127	.867E-02	0.23	RH-106	.145E+00	0.21	CS-136	.132E+01	0.39

**Taulukko VIII.3.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva VIII.2). Tarkasteluaikaväli 20.00 – 68.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	263	3.71	69.9	336
2	259	3.64	68.6	331
5	236	3.33	62.6	302
10	175	2.46	45.6	223
15	112	1.57	28.5	142
20	68.2	0.946	16.7	85.9
25	43.1	0.581	10.1	53.8
30	28.8	0.372	6.46	35.6
40	13.1	0.154	2.74	16
50	5.42	5.74E-02	1.05	6.53
60	2.01	1.93E-02	0.364	2.39
70	0.665	5.84E-03	0.113	0.784
80	0.196	1.60E-03	3.14E-02	0.229
90	5.11E-02	3.92E-04	7.82E-03	5.93E-02
100	1.17E-02	8.64E-05	1.74E-03	1.36E-02

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VIII.4.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva VIII.1).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
19.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	3.25E+05	4.50E+03	138	3.30E+05
20.3	1.90E+05	2.63E+03	609	1.93E+05
20.95	1.41E+05	1.95E+03	1.45E+03	1.44E+05
21.05	8.54E+03	166	1.51E+03	1.02E+04
22	7.20E+03	140	1.54E+03	8.88E+03
24	6.04E+03	118	1.59E+03	7.75E+03
25.95	5.47E+03	106	1.62E+03	7.20E+03
26.05	5.42E+03	80.5	1.62E+03	7.12E+03
28	5.05E+03	75.1	1.65E+03	6.78E+03
30	4.78E+03	71	1.68E+03	6.53E+03
31.95	4.51E+03	67.1	1.70E+03	6.28E+03
32.05	1.88E+03	13	1.70E+03	3.59E+03
34	1.81E+03	12.5	1.66E+03	3.48E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
36	1.75E+03	12.1	1.62E+03	3.38E+03
38	1.69E+03	11.7	1.58E+03	3.29E+03
40	1.65E+03	11.4	1.55E+03	3.21E+03
42	1.61E+03	11.2	1.53E+03	3.15E+03
43.95	1.57E+03	10.9	1.51E+03	3.09E+03
44.05	0.00E+00	0.00E+00	1.51E+03	1.51E+03
48	0.00E+00	0.00E+00	1.44E+03	1.44E+03
52	0.00E+00	0.00E+00	1.38E+03	1.38E+03
56	0.00E+00	0.00E+00	1.33E+03	1.33E+03
60	0.00E+00	0.00E+00	1.29E+03	1.29E+03
64	0.00E+00	0.00E+00	1.25E+03	1.25E+03
68	0.00E+00	0.00E+00	1.22E+03	1.22E+03

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VIII.5.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	3.25E+05	4.50E+03	138	3.30E+05
2	3.02E+05	4.18E+03	128	3.06E+05
5	2.05E+05	2.83E+03	86.9	2.08E+05
10	5.11E+04	708	21.7	5.19E+04
15	5.07E+03	70.2	2.15	5.14E+03
20	199	2.76	8.47E-02	202
25	3.11	4.31E-02	1.32E-03	3.15
30	1.92E-02	2.66E-04	8.17E-06	1.95E-02
40	4.60E-08	6.37E-10	1.95E-11	4.67E-08
50	2.73E-15	3.77E-17	1.16E-18	2.76E-15
60	4.00E-24	5.53E-26	1.70E-27	4.05E-24
70	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.



**Taulukko VIII.6.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m.  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{131}\text{I}$ -laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva VIII.3).

Etäisyys trajektorilta (km)	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	$^{131}\text{I}$ -laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	9.74E+06	2.62E+08
2	9.57E+06	2.58E+08
5	8.76E+06	2.36E+08
10	6.47E+06	1.75E+08
15	4.13E+06	1.12E+08
20	2.48E+06	6.74E+07
25	1.51E+06	4.11E+07
30	9.46E+05	2.59E+07
40	3.64E+05	1.00E+07
50	1.21E+05	3.33E+06
60	3.38E+04	9.34E+05
70	7.94E+03	2.20E+05
80	1.54E+03	4.28E+04
90	243	6.82E+03
100	31.1	884

**Taulukko VIII.7.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m.  $^{131}\text{I}$  -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	9.48E+06
2	8.80E+06
5	5.97E+06
10	1.49E+06
15	1.48E+05
20	5.82E+03
25	90.7
30	0.561
40	1.34E-06
50	7.95E-14
60	1.17E-22
70	0.00E+00

**Taulukko VIII.8.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq·h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	7.88E+06
<sup>132</sup> I	1.14E+06
<sup>133</sup> I	8.97E+06
<sup>135</sup> I	2.01E+06
<sup>242</sup> Cm	1.54E+04
<sup>244</sup> Cm	258
<sup>89</sup> Sr	9.35E+05
<sup>90</sup> Sr	6.45E+04
<sup>144</sup> Ce	2.15E+05
<sup>238</sup> Pu	189
<sup>241</sup> Pu	1.89E+04

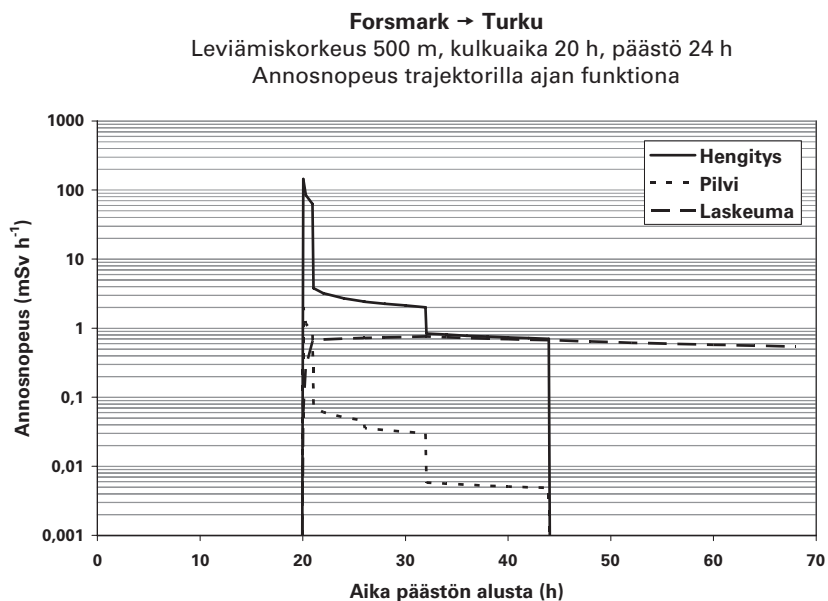
**Taulukko VIII.9.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 100 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
19.95	0.831	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	0.835	4.50E+03	138	4.64E+03	0.229
20.3	0.846	2.63E+03	609	3.24E+03	1.09
20.95	0.873	1.95E+03	1.45E+03	3.40E+03	3.1
21.05	0.877	166	1.51E+03	1.68E+03	3.34
25.95	1.081	106	1.62E+03	1.73E+03	11.6
26.05	1.085	80.5	1.62E+03	1.71E+03	11.8
31.95	1.331	67.1	1.70E+03	1.77E+03	22
32.05	1.335	13	1.70E+03	1.71E+03	22.2
43.95	1.831	10.9	1.51E+03	1.52E+03	41.2
44.05	1.835	0.00E+00	1.51E+03	1.51E+03	41.4
68	2.833	0.00E+00	1.22E+03	1.22E+03	73.6
92	3.833	0.00E+00	1.07E+03	1.07E+03	101
116	4.833	0.00E+00	973	973	125
140	5.833	0.00E+00	898	898	148
164	6.833	0.00E+00	836	836	169
188	7.833	0.00E+00	781	781	188
212	8.833	0.00E+00	733	733	206

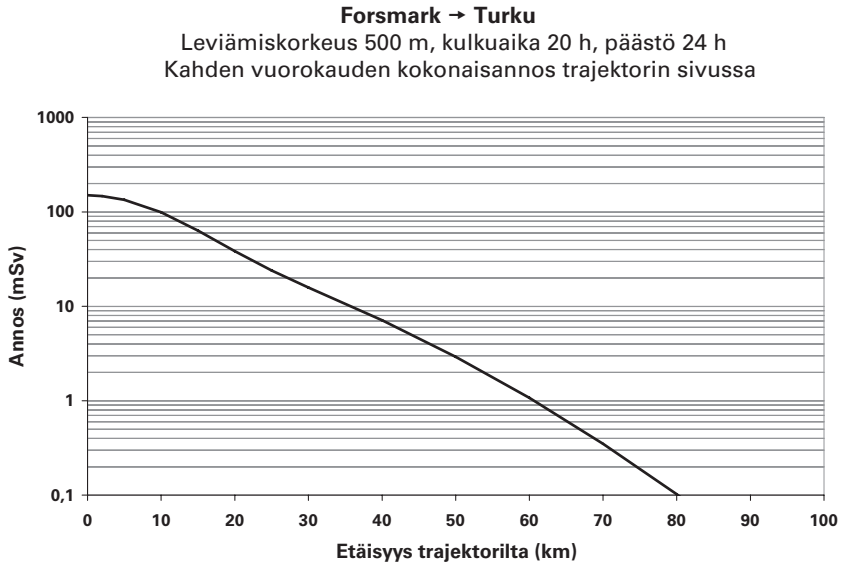
Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
236	9.833	0.00E+00	689	689	223
260	10.833	0.00E+00	649	649	239
284	11.833	0.00E+00	612	612	254
308	12.833	0.00E+00	579	579	269
332	13.833	0.00E+00	549	549	282
356	14.833	0.00E+00	521	521	295
380	15.833	0.00E+00	495	495	307
404	16.833	0.00E+00	471	471	319
428	17.833	0.00E+00	449	449	330
452	18.833	0.00E+00	429	429	340
476	19.833	0.00E+00	410	410	350
500	20.833	0.00E+00	393	393	360
524	21.833	0.00E+00	376	376	369
548	22.833	0.00E+00	361	361	378
572	23.833	0.00E+00	347	347	387
596	24.833	0.00E+00	334	334	395
620	25.833	0.00E+00	322	322	403
644	26.833	0.00E+00	310	310	410
668	27.833	0.00E+00	299	299	418
692	28.833	0.00E+00	289	289	425
716	29.833	0.00E+00	280	280	431
740	30.833	0.00E+00	271	271	438 1 kk
764	31.833	0.00E+00	262	262	444
788	32.833	0.00E+00	254	254	451
812	33.833	0.00E+00	247	247	457
836	34.833	0.00E+00	240	240	462
860	35.833	0.00E+00	233	233	468
884	36.833	0.00E+00	227	227	474
908	37.833	0.00E+00	221	221	479
932	38.833	0.00E+00	215	215	484
956	39.833	0.00E+00	210	210	489
980	40.833	0.00E+00	205	205	494
1004	41.833	0.00E+00	201	201	499
1028	42.833	0.00E+00	196	196	504
1052	43.833	0.00E+00	192	192	509
1076	44.833	0.00E+00	188	188	513
1100	45.833	0.00E+00	184	184	518
1124	46.833	0.00E+00	180	180	522

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1148	47.833	0.00E+00	177	177	526
1172	48.833	0.00E+00	174	174	531
1196	49.833	0.00E+00	171	171	535
1220	50.833	0.00E+00	168	168	539
1244	51.833	0.00E+00	165	165	543
1268	52.833	0.00E+00	162	162	547
1292	53.833	0.00E+00	160	160	551
1316	54.833	0.00E+00	157	157	554
1340	55.833	0.00E+00	155	155	558
1364	56.833	0.00E+00	153	153	562
1388	57.833	0.00E+00	151	151	565
1412	58.833	0.00E+00	149	149	569
1436	59.833	0.00E+00	147	147	573
1460	60.833	0.00E+00	145	145	576 2 kk
1484	61.833	0.00E+00	143	143	579
1508	62.833	0.00E+00	141	141	583
1532	63.833	0.00E+00	140	140	586
1556	64.833	0.00E+00	138	138	590
1580	65.833	0.00E+00	137	137	593
1604	66.833	0.00E+00	135	135	596
1628	67.833	0.00E+00	134	134	599
1652	68.833	0.00E+00	133	133	603
1676	69.833	0.00E+00	131	131	606
1700	70.833	0.00E+00	130	130	609
1724	71.833	0.00E+00	129	129	612
1748	72.833	0.00E+00	128	128	615
1772	73.833	0.00E+00	127	127	618
1796	74.833	0.00E+00	126	126	621
1820	75.833	0.00E+00	125	125	624
1844	76.833	0.00E+00	124	124	627
1868	77.833	0.00E+00	123	123	630
1892	78.833	0.00E+00	122	122	633
1916	79.833	0.00E+00	121	121	636
1940	80.833	0.00E+00	120	120	639
1964	81.833	0.00E+00	119	119	642
1988	82.833	0.00E+00	118	118	645
2012	83.833	0.00E+00	118	118	647
2036	84.833	0.00E+00	117	117	650
2060	85.833	0.00E+00	116	116	653

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2084	86.833	0.00E+00	115	115	656
2108	87.833	0.00E+00	115	115	659
2132	88.833	0.00E+00	114	114	661
2156	89.833	0.00E+00	113	113	664
2180	90.833	0.00E+00	113	113	667 3 kk
2204	91.833	0.00E+00	112	112	669

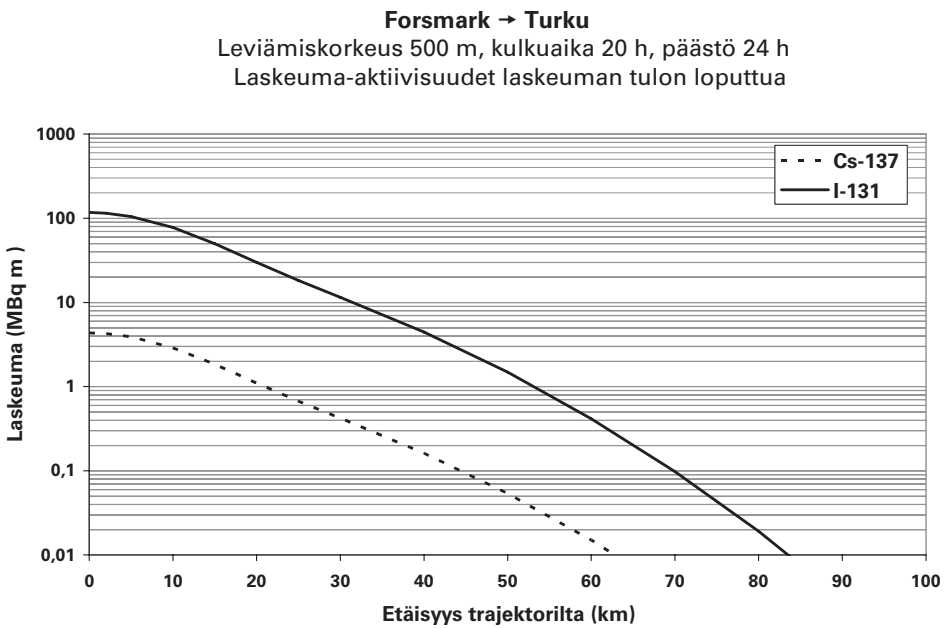


Kuva VIII.4. Annosnopeudet trajektorilla ajan funktiona.



**Kuva VIII.5.** Kahden vuorokauden kokonaisannos trajektorin sivussa.

Huom! Annos sisältää kaikki annosreitit (hengitys, pilvi, laskeuma), mutta hengityksannoksen ja ulkoisten annoksien yhteenlaskeminen on mielekäästä vain stokastisia terveysvaikutuksia tarkasteltaessa.



**Kuva VIII.6.** <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeuma-aktiivisuudet, kun laskeuman tulo on loppunut (44 h päästön alkamisen jälkeen).

**Taulukko VIII.10.** Forsmark ⇒ Turku, levämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorilla ja tärkeimmät annoksiin vaikuttavat nuklidit.

Integrointi välillä 20.0 h (pihven tulo) – 68.0 h  
 Kokonaisannos 150 mSv (hengitys 117, piivi 1.63, laskeuma 31.1). Huom! Ulkoisten annosten ja hengitysannoksen yhteenlasku on mielekkäästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.  
 Annosten yksikkö mSv.

HENGITYS			PIIVI			LASKEUMA			YHTENSÄ		
Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.	Nuklidit	Annos	%-os.
I-131	.379E+02	32.41	I-133	.387E+00	23.79	I-133	.695E+01	22.37	I-131	.448E+02	29.96
CM-242	.200E+02	17.09	I-135	.234E+00	14.41	I-131	.673E+01	21.65	CM-242	.200E+02	13.35
SR-90	.836E+01	7.15	I-131	.211E+00	12.96	I-132	.478E+01	15.37	I-133	.150E+02	10.01
CE-144	.795E+01	6.79	I-132	.190E+00	11.66	LA-140	.462E+01	14.85	SR-90	.836E+01	5.59
I-133	.764E+01	6.53	LA-140	.121E+00	7.41	I-135	.142E+01	4.56	CE-144	.796E+01	5.32
PU-241	.651E+01	5.57	XE-135	.120E+00	7.40	CS-134	.107E+01	3.44	PU-241	.651E+01	4.35
PU-238	.428E+01	3.66	XE-133	.941E-01	5.79	BA-140	.716E+00	2.30	I-132	.502E+01	3.36
SR-89	.416E+01	3.55	CS-134	.332E-01	2.04	NP-239	.574E+00	1.85	LA-140	.499E+01	3.33
CM-244	.382E+01	3.27	BA-140	.208E-01	1.28	NB-95	.545E+00	1.75	SR-89	.432E+01	2.88
RU-106	.381E+01	3.25	NP-239	.207E-01	1.27	ZR-95	.518E+00	1.67	PU-238	.428E+01	2.86
PU-240	.163E+01	1.39	KR-88	.182E-01	1.12	CS-136	.496E+00	1.60	CM-244	.382E+01	2.55
TE-132	.140E+01	1.19	NB-95	.176E-01	1.09	TE-132	.488E+00	1.57	RU-106	.381E+01	2.54
CS-134	.132E+01	1.13	ZR-95	.168E-01	1.04	BA-137M	.363E+00	1.17	CS-134	.242E+01	1.62
Y-91	.127E+01	1.08	CS-136	.167E-01	1.03	RU-103	.286E+00	0.92	I-135	.199E+01	1.33
PU-239	.106E+01	0.91	TE-132	.164E-01	1.01	SR-89	.159E+00	0.51	TE-132	.190E+01	1.27
CS-137	.852E+00	0.73	SR-91	.136E-01	0.84	TE-131M	.158E+00	0.51	PU-240	.163E+01	1.09
ZR-95	.736E+00	0.63	BA-137M	.109E-01	0.67	SR-91	.133E+00	0.43	BA-140	.137E+01	0.92





**Taulukko VIII.11.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Kahden vuorokauden annokset trajektorin sivussa (ks. kuva VIII.5). Tarkasteluaikaväli 20.00 - 68.00 h.

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys (mSv)	Pilvi (mSv)	Laskeuma (mSv)	Yhteensä <sup>a</sup> (mSv)
0	117	1.63	31.1	150
2	115	1.6	30.5	147
5	105	1.46	27.8	134
10	77.6	1.08	20.3	98.9
15	49.7	0.69	12.7	63.1
20	30.3	0.415	7.44	38.2
25	19.2	0.255	4.5	23.9
30	12.8	0.164	2.88	15.8
40	5.82	6.78E-02	1.22	7.11
50	2.41	2.54E-02	0.469	2.91
60	0.895	8.54E-03	0.162	1.07
70	0.297	2.59E-03	5.02E-02	0.349
80	8.74E-02	7.09E-04	1.40E-02	0.102
90	2.28E-02	1.74E-04	3.48E-03	2.64E-02
100	5.24E-03	3.84E-05	7.74E-04	6.05E-03

<sup>a</sup> Hengitysannoksen ja ulkoisten annosten yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VIII.12.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorilla kahden vuorokauden aikana (ks. kuva VIII.4).

Aika (h)	Hengitys (μSv h <sup>-1</sup> )	Pilvi (μSv h <sup>-1</sup> )	Laskeuma (μSv h <sup>-1</sup> )	Yhteensä <sup>a</sup> (μSv h <sup>-1</sup> )
19.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	1.45E+05	1.98E+03	61.4	1.47E+05
20.3	8.47E+04	1.16E+03	271	8.61E+04
20.95	6.28E+04	857	645	6.43E+04
21.05	3.80E+03	72	671	4.55E+03
22	3.20E+03	60.7	685	3.95E+03
24	2.69E+03	50.9	706	3.45E+03
25.95	2.43E+03	46.1	722	3.20E+03
26.05	2.41E+03	35.7	723	3.17E+03
28	2.25E+03	33.3	735	3.02E+03
30	2.13E+03	31.5	747	2.91E+03
31.95	2.01E+03	29.8	757	2.80E+03
32.05	836	5.8	757	1.60E+03

Aika (h)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
34	805	5.58	737	1.55E+03
36	777	5.39	720	1.50E+03
38	754	5.23	705	1.46E+03
40	734	5.09	692	1.43E+03
42	716	4.97	680	1.40E+03
43.95	701	4.86	671	1.38E+03
44.05	0.00E+00	0.00E+00	670	670
48	0.00E+00	0.00E+00	641	641
52	0.00E+00	0.00E+00	615	615
56	0.00E+00	0.00E+00	594	594
60	0.00E+00	0.00E+00	575	575
64	0.00E+00	0.00E+00	558	558
68	0.00E+00	0.00E+00	543	543

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VIII.13.** Forsmark  $\Rightarrow$  Turku, leviämiskorkeus 500 m. Annosnopeudet trajektorin sivussa silloin kun kokonaisannosnopeus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hieman aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Hengitys ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Pilvi ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Laskeuma ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Yhteensä <sup>a</sup> ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
0	1.45E+05	1.98E+03	61.4	1.47E+05
2	1.35E+05	1.84E+03	57	1.37E+05
5	9.13E+04	1.25E+03	38.7	9.26E+04
10	2.28E+04	312	9.66	2.31E+04
15	2.26E+03	30.9	0.958	2.29E+03
20	88.9	1.21	3.77E-02	90.2
25	1.39	1.89E-02	5.88E-04	1.41
30	8.59E-03	1.17E-04	3.64E-06	8.71E-03
40	2.05E-08	2.80E-10	8.69E-12	2.08E-08
50	1.22E-15	1.66E-17	5.15E-19	1.23E-15
60	1.78E-24	2.44E-26	7.55E-28	1.81E-24
70	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

<sup>a</sup> Hengitysannosnopeuden ja ulkoisten annosnopeuksien yhteenlaskeminen on mielekästä ainoastaan stokastisten terveysvaikutusten kannalta.

**Taulukko VIII.14.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. <sup>137</sup>Cs- ja <sup>131</sup>I-laskeumat trajektorin sivussa päästön loputtua (ks. kuva VIII.6).

Etäisyys trajektorilta (km)	<sup>137</sup> Cs-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )	<sup>131</sup> I-laskeuma (Bq m <sup>-2</sup> )
0	4.34E+06	1.17E+08
2	4.26E+06	1.15E+08
5	3.90E+06	1.05E+08
10	2.88E+06	7.77E+07
15	1.84E+06	4.98E+07
20	1.10E+06	3.00E+07
25	6.70E+05	1.83E+07
30	4.21E+05	1.15E+07
40	1.62E+05	4.45E+06
50	5.37E+04	1.48E+06
60	1.50E+04	4.16E+05
70	3.53E+03	9.79E+04
80	685	1.91E+04
90	108	3.03E+03
100	13.8	393

**Taulukko VIII.15.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. <sup>131</sup>I -pitoisuus ilmassa trajektorin sivussa silloin kun pitoisuus trajektorilla on suurimmillaan (päästöpilvi on hetkeä aiemmin tullut kohdalle).

Etäisyys trajektorilta (km)	Pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )
0	4.22E+06
2	3.92E+06
5	2.66E+06
10	6.64E+05
15	6.58E+04
20	2.59E+03
25	40.4
30	0.25
40	5.98E-07
50	3.54E-14
60	5.19E-23
70	0.00E+00

**Taulukko VIII.16.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Nuklidien pitoisuusintegraaleja (trajektorilla).

Nuklidi	Pitoisuusintegraali (Bq·h m <sup>-3</sup> )
<sup>131</sup> I	3.51E+06
<sup>132</sup> I	5.06E+05
<sup>133</sup> I	4.00E+06
<sup>135</sup> I	8.96E+05
<sup>242</sup> Cm	6.87E+03
<sup>244</sup> Cm	115
<sup>89</sup> Sr	4.16E+05
<sup>90</sup> Sr	2.87E+04
<sup>144</sup> Ce	9.56E+04
<sup>238</sup> Pu	84.3
<sup>241</sup> Pu	8.42E+03

**Taulukko VIII.17.** Forsmark ⇒ Turku, leviämiskorkeus 500 m. Ulkoinen annosnopeus ja kertynyt annos trajektorilla ajan funktiona.

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta (μSv h <sup>-1</sup> )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä (μSv h <sup>-1</sup> )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
19.95	0.831	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20.05	0.835	1.98E+03	61.4	2.04E+03	0.1
20.3	0.846	1.16E+03	271	1.43E+03	0.479
20.95	0.873	857	645	1.50E+03	1.36
21.05	0.877	72	671	743	1.47
25.95	1.081	46.1	722	768	5.14
26.05	1.085	35.7	723	759	5.22
31.95	1.331	29.8	757	787	9.77
32.05	1.335	5.8	757	763	9.85
43.95	1.831	4.86	671	676	18.3
44.05	1.835	0.00E+00	670	670	18.4
68	2.833	0.00E+00	543	543	32.7
92	3.833	0.00E+00	477	477	44.9
116	4.833	0.00E+00	433	433	55.8
140	5.833	0.00E+00	400	400	65.7
164	6.833	0.00E+00	372	372	75
188	7.833	0.00E+00	348	348	83.6
212	8.833	0.00E+00	326	326	91.7

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
236	9.833	0.00E+00	307	307	99.3
260	10.833	0.00E+00	289	289	106
284	11.833	0.00E+00	273	273	113
308	12.833	0.00E+00	258	258	120
332	13.833	0.00E+00	244	244	126
356	14.833	0.00E+00	232	232	131
380	15.833	0.00E+00	220	220	137
404	16.833	0.00E+00	210	210	142
428	17.833	0.00E+00	200	200	147
452	18.833	0.00E+00	191	191	151
476	19.833	0.00E+00	182	182	156
500	20.833	0.00E+00	175	175	160
524	21.833	0.00E+00	167	167	164
548	22.833	0.00E+00	161	161	168
572	23.833	0.00E+00	154	154	172
596	24.833	0.00E+00	149	149	176
620	25.833	0.00E+00	143	143	179
644	26.833	0.00E+00	138	138	183
668	27.833	0.00E+00	133	133	186
692	28.833	0.00E+00	129	129	189
716	29.833	0.00E+00	124	124	192
740	30.833	0.00E+00	120	120	195 1 kk
764	31.833	0.00E+00	117	117	198
788	32.833	0.00E+00	113	113	200
812	33.833	0.00E+00	110	110	203
836	34.833	0.00E+00	107	107	206
860	35.833	0.00E+00	104	104	208
884	36.833	0.00E+00	101	101	211
908	37.833	0.00E+00	98.3	98.3	213
932	38.833	0.00E+00	95.9	95.9	215
956	39.833	0.00E+00	93.5	93.5	218
980	40.833	0.00E+00	91.3	91.3	220
1004	41.833	0.00E+00	89.2	89.2	222
1028	42.833	0.00E+00	87.2	87.2	224
1052	43.833	0.00E+00	85.3	85.3	226
1076	44.833	0.00E+00	83.6	83.6	228
1100	45.833	0.00E+00	81.9	81.9	230
1124	46.833	0.00E+00	80.3	80.3	232

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoisen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoisen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
1148	47.833	0.00E+00	78.7	78.7	234
1172	48.833	0.00E+00	77.3	77.3	236
1196	49.833	0.00E+00	75.9	75.9	238
1220	50.833	0.00E+00	74.6	74.6	240
1244	51.833	0.00E+00	73.4	73.4	241
1268	52.833	0.00E+00	72.2	72.2	243
1292	53.833	0.00E+00	71.1	71.1	245
1316	54.833	0.00E+00	70	70	247
1340	55.833	0.00E+00	69	69	248
1364	56.833	0.00E+00	68	68	250
1388	57.833	0.00E+00	67	67	252
1412	58.833	0.00E+00	66.1	66.1	253
1436	59.833	0.00E+00	65.3	65.3	255
1460	60.833	0.00E+00	64.5	64.5	256 2 kk
1484	61.833	0.00E+00	63.7	63.7	258
1508	62.833	0.00E+00	62.9	62.9	259
1532	63.833	0.00E+00	62.2	62.2	261
1556	64.833	0.00E+00	61.5	61.5	262
1580	65.833	0.00E+00	60.9	60.9	264
1604	66.833	0.00E+00	60.2	60.2	265
1628	67.833	0.00E+00	59.6	59.6	267
1652	68.833	0.00E+00	59	59	268
1676	69.833	0.00E+00	58.5	58.5	270
1700	70.833	0.00E+00	57.9	57.9	271
1724	71.833	0.00E+00	57.4	57.4	272
1748	72.833	0.00E+00	56.9	56.9	274
1772	73.833	0.00E+00	56.4	56.4	275
1796	74.833	0.00E+00	55.9	55.9	276
1820	75.833	0.00E+00	55.5	55.5	278
1844	76.833	0.00E+00	55	55	279
1868	77.833	0.00E+00	54.6	54.6	280
1892	78.833	0.00E+00	54.2	54.2	282
1916	79.833	0.00E+00	53.8	53.8	283
1940	80.833	0.00E+00	53.4	53.4	284
1964	81.833	0.00E+00	53.1	53.1	286
1988	82.833	0.00E+00	52.7	52.7	287
2012	83.833	0.00E+00	52.3	52.3	288
2036	84.833	0.00E+00	52	52	289

Aika päästön alusta (h)	Aika päästön alusta (d)	Ulkoinen annosnopeus pilvestä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus laskeumasta ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Ulkoinen annosnopeus yhteensä ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	Kertynyt kokonaisannos (mSv)
2060	85.833	0.00E+00	51.7	51.7	291
2084	86.833	0.00E+00	51.3	51.3	292
2108	87.833	0.00E+00	51	51	293
2132	88.833	0.00E+00	50.7	50.7	294
2156	89.833	0.00E+00	50.4	50.4	295
2180	90.833	0.00E+00	50.1	50.1	297 3 kk
2204	91.833	0.00E+00	49.9	49.9	298





## 5 Laskeuman pitkäaikaissairaukset

J. Lahtinen, H. Arvela, W. Paile, A. Rantavaara, R. Saxén, H. Toivonen

## 5 Laskeuman pitkäaikais seuraukset

### 5.1 Annosnopeus pitkällä aikavälillä

#### 5.1.1 Laskeuman käyttäytyminen maaperässä

Radioaktiivisen hajoamisen lisäksi monet eri tekijät vaikuttavat laskeuman aiheuttamaan annosnopeuteen. Näitä tekijöitä ovat:

1. Säteilyn vaimeneminen maaperän epätasaisuuden takia. Kuopissa ja maaperän rakeiden takana olevien säteilylähteiden aiheuttama annosnopeus on pienempi kuin aivan tasaisella maalla olevan säteilylähteen.
2. Laskeuman painuminen syvemmälle maaperään. Sateen mukana tulevat hiukkaset painuvat välittömästi syvemmälle maahan kuin kuivalaskeuman hiukkaset, jotka jäävät maan pinnalle.
3. Sade huuhtoo laskeumaa kivilta pinnoilta.
4. Maaperän muokkaus esim. maataloustöiden yhteydessä siirtää laskeumaa syvemmälle, jolloin annosnopeus pienenee.
5. Rakennusten seinät ja katto vaimentavat säteilyä.
6. Fysikaalis-kemiallinen sitoutuminen maaperään vähentää radionuklidien kulkeutumista veden mukana alempiin maakerroksiin.

#### 5.1.2 Annosnopeuden laskenta

Pitkällä aikavälillä kertyneen annoksen laskennassa on käytetty erilaisia menetelmiä. Ydinasekoideiden  $^{137}\text{Cs}$ -laskeuman annoslaskennassa on oletettu cesiumin pitoisuuden maaperässä pienenevän syvyysuunnassa eksponentiaalisesti siten, että relaksaatioisyvyys (eli syvyys jossa pitoisuus on pienentynyt ennteen osaan) on 3 cm.<sup>1</sup>Tshernobyl-turman annoksia laskettaessa on oletettu<sup>2</sup>, että ensimmäisen kuukauden aikana relaksaatioisyvyys on 0,1 cm, sen jälkeen ensimmäisen vuoden loppuun 1 cm ja siitä eteenpäin 3 cm.

Suomessa Tshernobylin ydinvoimalaturman aiheuttamaa pientä ulkoisen säteilyn annosnopeuden lisäystä on seurattu monilla säteilymittausasemilla. Pienen lisäyksen erottaminen maaperän luonnollisesta taustasäteilystä on kuitenkin erittäin vaikeaa, varsinkin jos samalla laitteistolla mitattuja tuloksia ei ole ennen vuotta 1986 tai jos laitteisto tai mittausanturin sijainti on vaihtunut vuoden 1986 jälkeen.

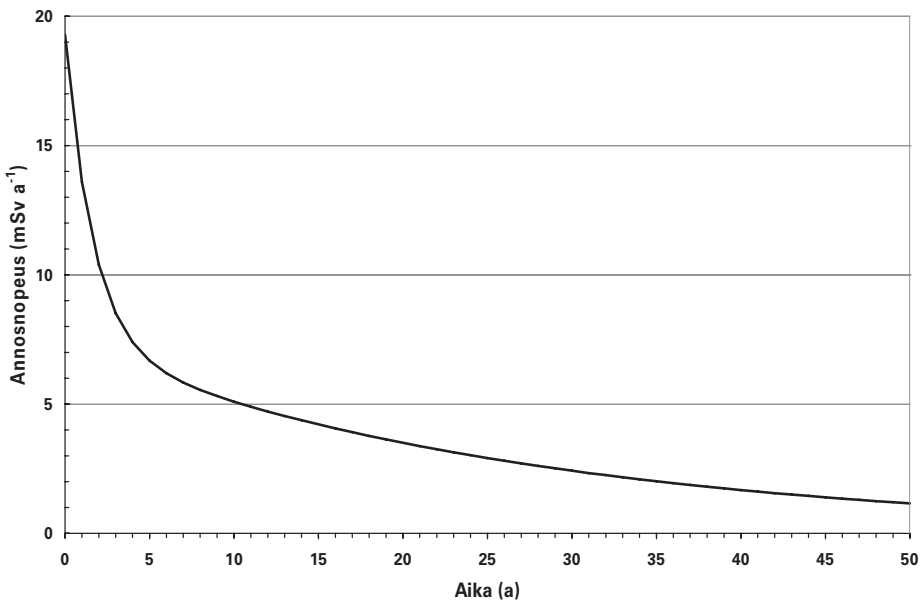
Säteilyturvakeskus on tutkinut annosnopeuden käyttäytymistä ydinvoimaloiden ympäristössä. Dosimetriasemien tuloksia tarkasteltaessa oletettiin, että annosnopeus lähenee viiden vuoden aikana vakiotasoa ja vähenee sen jälkeen vain hyvin hitaasti. Maaseutuympäristössä cesiumin maahan painumisen annosnopeusvaikutukselle saatiin seuraava yhtälö<sup>3</sup>:

$$D(t) = D_0 (0,62 e^{-0,693/T1^*t} + 0,38) \quad (5.1)$$

Tässä  $D_0$  on ulkoisen säteilyn annosnopeus hetkellä  $t = 0$  (vuosia).  $T1$ :lle saatiin arvo 1,22 vuotta. Laskeumasta 38 % jää vaikuttamaan pitkäaikaisesti. Kun yhtälöön lisätään radioaktiivisen hajoamisen vaikutus –  $^{137}\text{Cs}$ :n puoliintumisaika  $T_{1/2}$  on 30,2 vuotta – ja oletetaan, että viiden vuoden jälkeen annosnopeuden puoliintumisaika ympäristössä on 50 vuotta, saadaan annosnopeudelle seuraava arvio:

$$D(t) = D_0 (0,62 e^{-0,693/1,15^*t} + 0,38 e^{-0,693/18,8^*t}) \quad (5.2)$$

Kuvassa 5.1 on esitetty annosnopeuden muuttuminen ajan kuluessa, kun laskeuman suuruus alussa on  $1 \text{ MBq m}^{-2}$  ja  $^{137}\text{Cs}$ :n annosmuuntokertoimenä on käytetty arvoa  $2,2 \cdot 10^{-12} \text{ (Gy h}^{-1})/(\text{Bq m}^{-2})$ , joka vastaa 1 mm relaksaatiosyvyyttä<sup>a</sup>.



**Kuva 5.1.** Yhtälön 5.2 mukaan laskettu  $^{137}\text{Cs}$ :n aiheuttaman annosnopeuden käyttäytyminen maaseutu-ympäristössä ajan funktiona, kun laskeuman suuruus alussa on  $1 \text{ MBq m}^{-2}$ .

<sup>a</sup> Tässä käytetty muuntokertoimen arvo on hiukan suurempi kuin luvun 4 liitteen II taulukon perusteella on laskettavissa  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ :lle.

Kaupunkiympäristössä laskeuman huuhtoutuminen on tehokasta ja annosnopeus pienenee nopeammin kuin maaseudulla. On arvioitu<sup>4,5</sup>, että asfalttikatu- ja kivitaleympäristössä annosnopeus laskee viiden vuoden aikana tasolle, joka on noin yksi kolmasosa vastaavasta annosnopeudesta maaseutuympeäristössä.

### 5.1.3 Annos 50 vuoden aikana

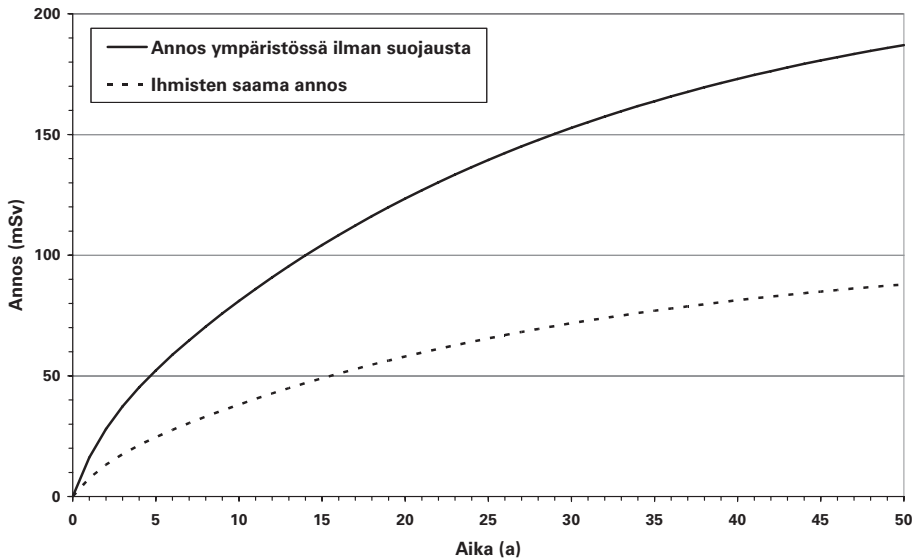
Asuinrakennusten suojavaikutus pienentää todellisia pitkän aikavälin annosarvoja merkittävästi. Ruotsissa on arvioitu<sup>6</sup> pientalojen ja kerrostalojen keskimääräisiä suojaustekijöitä. Nämä arvot sisältävät oletuksen, että 15 % ajasta oleskellaan ulkona, jolloin rakennuksen suojaavaa vaikutusta ei ole (ks. taulukko 5.1 ja kuva 5.2).

Taulukossa 5.2 on esitetty <sup>137</sup>Cs-kokonaislaskeumat trajektorilla tässä tutkimuksessa tarkastelluissa tapauksissa sekä vastaavat pitkäaikaisannokset ilman suojausta ja suojauksen kanssa maaseutuympeäristössä.

**Taulukko 5.1.** <sup>137</sup>Cs:sta aiheutuva (efektiivinen) ulkoisen säteilyn annos 50 vuoden aikana, kun alkulaskeuma on 1 MBq m<sup>-2</sup>.

Huuhtoutumisen vuoksi annos kaupunkiympäristössä on vain noin kolmasosa maaseutuympeäristössä saatavasta annoksesta. Suojaustekijä on maaseutuympeäristössä 0,47 ja kaupungissa 0,18.

Annoksen laji	Annos (mSv)	
	Maaseutu	Kaupunki
Annos ympäristössä (ilman suojausta)	190	60
Ihmisten annos, kun suojaustekijä otetaan huomioon	90	11



**Kuva 5.2.**  $^{137}\text{Cs}$ :ista aiheutuvan ulkoisen annoksen kertyminen 50 vuoden aikana maaseutuympäristössä, kun laskeuman suuruus alussa on  $1 \text{ MBq m}^{-2}$ .

Ihmisten saama annos sisältää suojaustekijän 0,47.

**Taulukko 5.2.**  $^{137}\text{Cs}$ -laskeuma trajektorilla päästön loputtua ja siitä aiheutuvat ulkoisen säteilyn annokset 50 vuoden aikana maaseutuympäristössä.

Suojaustekijä maaseudulla on 0,47.

Laitos ⇒ kohde	$^{137}\text{Cs}$ -laskeuma ( $\text{MBq m}^{-2}$ )	50 vuoden annos (Sv)	
		Ilman suojausta	Suojaus mukana
Loviisa ⇒ Helsinki			
100	32	5,8	2,7
500	13	2,4	1,1
Olkiluoto ⇒ Turku			
100	15	2,8	1,3
500	6,3	1,1	0,53
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka			
100	40	7,2	3,4
500	17	3,1	1,5
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki			
100	28	5,0	2,3
500	12	2,2	1,0
Ignalina ⇒ Helsinki			
500	5,6	1,0	0,47
Kuola ⇒ Oulu			
500	1,8	0,32	0,15

Laitos ⇒ kohde	<sup>137</sup> Cs-laskeuma	50 vuoden annos (Sv)	
Nousukorkeus (m)	(MBq m <sup>-2</sup> )	Ilman suojausta	Suojaus mukana
Forsmark ⇒ Turku			
100	9,7	1,7	0,82
500	4,3	0,77	0,36

## 5.2 Juomavesi

Suomessa käytetään talousvetenä sekä pinta- että pohjavettä. Pohjaveden osuus vuosituhatosen vaihteessa oli noin 60 %. Sen käyttöä lisätään koko ajan ja vuoteen 2010 mennessä sen osuuden arvioidaan olevan 70–75 %. Noin 4,7 miljoonaa ihmistä käyttää vakituisesti vesilaitosten jakamaa talousvettä ja runsas 500 000 ihmistä yksityisten vedenottamoiden vettä, kaivo-, lähde- tai järvivettä. Päijänteestä saadaan talousvesi noin miljoonalle eteläsuomalaiselle.

Lähes yksinomaan pintavedet saastuvat radioaktiivisen laskeuman seurauksena. Kasvillisuus ja paksut sorakerrokset suojaavat pohjavesiä ilman saasteilta. Jos vesistöt ovat laskeuman ajankohtana jäässä, lyhytikäiset nuklidit ennättävät hävitä ennen kuin ne joutuvat veteen. Vesihuolto on turvattu, jos pohjavettä on riittävästi saatavissa laskeumatilanteessa. Pohjaveden laatu on yleensä parempi kuin pintaveden eikä se vaadi monimutkaista käsittelyä.

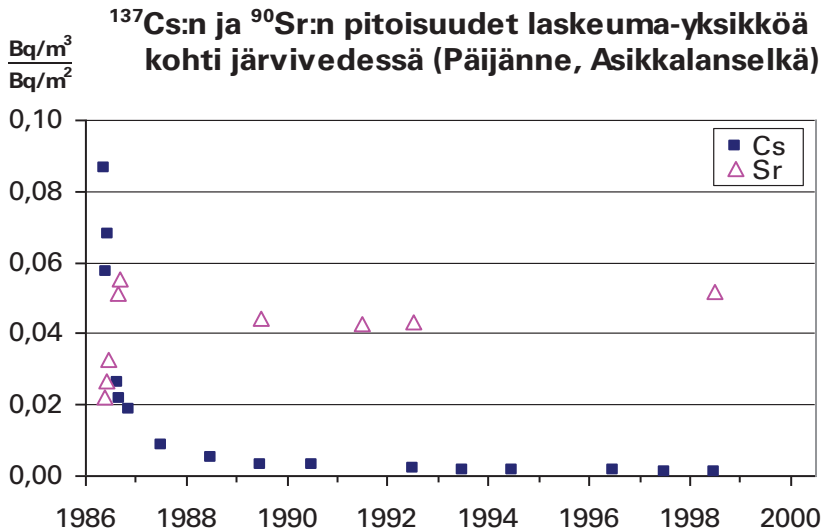
Jos cesium- tai strontiumlaskeuma on 1 MBq m<sup>-2</sup>, niin pian laskeuman jälkeen siitä aiheutuu 100–1000 Bq kg<sup>-1</sup> pitoisuus järviveteen. Radionuklidien aktiivisuuspitoisuus on korkeimmillaan matalissa järvissä ja pienin syvissä järvissä (taulukko 5.3).

Järviveden nuklidisuhteet ovat heti laskeuman jälkeen samat kuin alueen laskeumassa. Myöhemmin nuklidisuhteet alkavat muuttua, koska eri aineet käyttäytyvät vedessä, vesiympäristössä ja maaympäristössä eri tavoin.

Laskeumatilanteen jälkeen pintaveden cesiumpitoisuus pienenee nopeasti, koska cesium sitoutuu vedessä olevaan hiukkasainekseen ja sedimentoituu vesistöjen pohjalle. Esimerkiksi Tshernobylin onnettomuuden jälkeen Kymijoen vesistöalueella veden <sup>137</sup>Cs-pitoisuus laski kolmasosaan maksimiarvosta kolmessa kuukaudessa (vrt. kuva 5.3). <sup>90</sup>Sr-pitoisuus sen sijaan voi valuman vaikutuksesta jopa nousta, eikä myöhemminkään vähene vedestä yhtä tehokkaasti kuin <sup>137</sup>Cs. <sup>7-10</sup>

**Taulukko 5.3.** Vesien kannalta tärkeiden radionuklidien laskeuma trajektorilla päästön loputtua sekä laskeuman aiheuttama välitön aktiivisuuspitoisuus suurten järvien vedessä. Pienissä järvissä pitoisuus voi olla kymmenkertainen.

Laitos ⇒ kohde	Laskeuma ja sen aiheuttama välitön aktiivisuuspitoisuus radionuklideittain							
	<sup>134</sup> Cs		<sup>137</sup> Cs		<sup>89</sup> Sr		<sup>90</sup> Sr	
Nousukorkeus (m)	(MBq m <sup>-2</sup> )	(Bq/kg)	(MBq m <sup>-2</sup> )	(Bq/kg)	(MBq m <sup>-2</sup> )	(Bq/kg)	(MBq m <sup>-2</sup> )	(Bq/kg)
Loviisa ⇒ Helsinki								
100	47	4700	32	3200	21	2100	1,9	190
500	19	1900	13	1300	8,6	860	0,79	79
Oikiluoto ⇒ Turku								
100	16	1600	15	1500	52	5200	3,6	360
500	6,9	690	6,3	630	22	2200	1,5	150
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka								
100	26	2600	40	4000	11	1100	0,66	66
500	11	1100	17	1700	4,9	490	0,29	29
Sosnovyi Bor ⇒ H:ki								
100	18	1800	28	2800	7,8	780	0,45	45
500	8,1	810	12	1200	3,5	350	0,2	20
Ignalina ⇒ Helsinki								
500	3,7	370	5,6	560	1,6	160	0,094	9,4
Kuola ⇒ Oulu								
500	2,7	270	1,8	180	1,2	120	0,11	11
Forsmark ⇒ Turku								
100	11	1100	9,7	970	33	3300	2,3	230
500	4,8	480	4,3	430	15	1500	1,0	100



**Kuva 5.3.**  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{90}\text{Sr}$ -pitoisuudet laskeuma-aktiivisuusyksikköä kohti Tshernobylin onnettomuuden jälkeen Päijänteen Asikkalanselän vedessä.

Laskeuman radioaktiivisista aineista vain tritium vesimolekyylin osana kulkeutuu pohjaveteen. Cesium pidättyy tehokkaasti pohjavesiä suojaaviin maakerrokseen. Pidättyminen on sitä tehokkaampaa mitä hienommasta maalaajista on kysymys. Savipitoisessa maassa cesium kulkeutuu savihuukkasten kidehilaan eikä irtoa sieltä juuri millään. Suuri osa strontiumista pidättyy maakerrokseen. Radioaktiivisen jodin isotoopit häviävät ennen kuin ne saavuttavat pohjaveden.

Tavanomaiseen pintaveden käsittelyprosessiin kuuluu orgaanisen aineen poisto, selkeytys, suodatus, desinfiointi ja kalkin lisääminen. Osa radioaktiivisesta cesiumista poistuu vesilaitosten tavanomaisessa pintaveden käsittelyprosessissa. Poistuma riippuu raakaveden laadusta ja voi olla jopa 50 %.  $^{90}\text{Sr}$  on vesihuollon kannalta hankala nuklidi, sillä se ei sanottavasti häviä pintaveden käsittelyprosessissa<sup>11</sup>. Hiukkasmuodossa olevat radioaktiiviset aineet poistuvat raakavedestä vesilaitoksella suodatusvaiheessa.

Radioaktiivisen jodin käyttäytyminen vedenkäsittelyprosessissa riippuu jodin olomuodosta. Enimmilläänkin radioaktiivisesta jodista poistuu alle puolet. Jodin aiheuttama ongelma on kuitenkin lyhytaikainen, mikäli kyseessä on kertalaskeuma.

Laskeumatilanteessa juomaveden kautta saatava sisäisen säteilyn annos on vähäinen verrattuna hengityksen ja ravinnonoton kautta saatavaan annokseen.



## 5.3 Elintarvikkeet

### 5.3.1 Mittausten ja ennusteiden alkuperä

Seuraavissa jaksoissa 5.3.4 ja 5.3.5 esitetyt maataloustuotteiden aktiivisuuspitoisuuksien arviot perustuvat Suomessa ja muissa pohjoismaissa tehtyihin ympäristön keinotekoisien radionuklidien mittaustuloksiin usean vuosikymmenen ajalta. Vuoden 1986 kevääseen asti mitattiin ydinasekokeiden laskeuman vaikutusta ravintoketjuihin. Säteilyturvakeskus on raportoinut elintarvikkeiden  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{90}\text{Sr}$ -pitoisuuksia vuodesta 1960 alkaen ja lisäksi  $^{134}\text{Cs}$ -pitoisuuksia Tshernobylin onnettomuuden (1986) jälkeen. Mittaustuloksista on arvioitu väestön yksilön keskimääräinen  $^{134}\text{Cs}$ :n,  $^{137}\text{Cs}$ :n ja  $^{90}\text{Sr}$ :n saanti ruoasta ja juomavedestä sekä sisäisen säteilyn annos vuosina 1960–2005<sup>12</sup>. Radionuklidin laskeumanopeuden ( $\text{Bq m}^{-2} \text{kk}^{-1}$ ) ja elintarvikkeen aktiivisuuspitoisuuden aikasarjoihin on sovitettu regressiomallit  $^{90}\text{Sr}$ :lle ja  $^{137}\text{Cs}$ :lle maidossa ja viljassa. Mallit soveltuvat laskeuman pitkäaikaisten vaikutusten kuvaamiseen ydinkoekaudella ja sen jälkeen<sup>13</sup>. Mallien rakenne on modifioitu UNSCEARin elintarvikemallista<sup>14</sup>.

Tshernobylin ydinvoimalaitosonnettomuuden jälkeen STUKissa on tutkittu laajasti radioaktiivisen jodin, cesiumin ja strontiumin esiintymistä kotimaisissa elintarvikkeissa. Tutkimustulosten avulla on arvioitu ja mallinnettu ydinvoimalaitosten onnettomuuspäästöjen seurauksia. Mittaustuloksia sekä tuotanto- ja säätilastoja käyttäen Suomen olosuhteisiin on sopeutettu yleiseurooppalaiseen RODOS-järjestelmään<sup>15</sup> kuuluva elintarvikkeiden radionuklidipitoisuuksien ja niistä aiheutuvien säteilyannosten laskentamalli<sup>16</sup>. Kyseisen mallin (FDMT) versiolla 4.0 lasketuilla esimerkeillä havainnollistetaan kohdassa 5.3.5 maidon radioaktiivisen cesiumin, jodin ja strontiumin pitoisuuksien alueellista vaihtelua.

Vakavan ydinvoimalaitosonnettomuuden seurauksia elintarvikkeissa on arvioitu myös kompartmenttimallilla DETRA, joka on kehitetty Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa. Taulukossa 5.4 (kohdassa 5.3.4) esitetyt mallilla lasketut ennusteet perustuvat osittain Suomessa havaittuun radionuklidien siirtymiseen laskeumasta elintarvikkeisiin kevään 1986 jälkeen<sup>17,18</sup>.

### 5.3.2 Laskeumanuklidien kertyminen elintarvikkeisiin

Ihmisten ravitseminen perustuu juomaveden ohella pääosin maataloustuotteisiin ja jonkin verran kalaan ja metsäntuotteisiin. Suurin osa ruoasta on lähtöisin kasvikunnasta joko suoraan tai eläinten rehun välityksellä. Kasvien altistuminen radioaktiiviselle laskeumalle vaihtelee merkittävästi päästöpilven

radionuklidikoostumuksen ja laskeuman vuodenajan, kasvien kehitysvaiheen ja kohdealueen säätilan mukaan. Laskeumahiukkasten koostumus ja kokojakauma voivat vaihdella eri etäisyyksillä päästön lähteestä.

Välittömästi laskeuman tulon jälkeen radionuklidien määrät erityyppisten kasvustojen pinnoilla vaihtelevat kasvutiheyden (biomassa maapinta-alaa kohti), kasvilajin ja laskeumaprosessin mukaan. Poutasäällä kasvit pitävät laskeumapölystä suuremman osuuden kuin sateella, mutta sateen mukana alas tullut laskeuma on yleensä aktiivisuudeltaan suurempi. Laskeuman hiukkasten ja alkuaineiden luontainen poistuminen kasvien pinnoilta säätelijöiden vaikutuksesta sekä kasvusta johtuva laimeneminen pienentävät kasvien radionuklidipitoisuuksia. Esimerkiksi radioaktiivisella jodilla ja cesiumilla aktiivisuuden vähentyminen noudattaa likimain 1–2 viikon puoliintumisaikaa.

Laskeuman radionuklidien kemiallis-fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat siihen, missä määrin nuklidit siirtyvät kasvi- ja eläinkunnan ainekiertoihin pintakontaminaation tai juurioton kautta, ja mikä osa aktiivisuudesta päätyy elintarvikkeisiin. Elintarvikkeen aktiivisuussisältö voi muuttua myös mahdollisen jalostusprosessin aikana.

### 5.3.3 Radionuklidipitoisuuksien vaihtelu elintarvikkeissa

Radionuklidien kertyminen elintarvikkeihin voi vaihdella monikymmenkertaisesti sen mukaan, mikä on leviämisen ajankohta kasvukautteen ja sadonkorjuuseen nähden. Kuukausia ennen kasvukautta leviävän laskeuman lyhytikäiset jodin, telluurin tai bariumin isotoopit eivät juuri aiheuta ongelmia; sen sijaan puoliintumisajaltaan vähintään kuukausia olevat ceriumin ja ruteniumin isotoopit sekä muun muassa  $^{54}\text{Mn}$  ja  $^{89}\text{Sr}$  on otettava huomioon. Pitkäikäiset  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  ja  $^{137}\text{Cs}$  aiheuttavat maataloustuotteisiin ja cesiumin isotoopit myös riistan ja keräilytuotteisiin (marjat, sienet) suurimmat pitoisuudet ensimmäisellä kasvukaudella. Metsäntuotteisiin radioaktiivinen cesium siirtyy toisesta vuodesta alkaen likimain samalla lajista riippuvalla tehokkuudella hyvin kauan. Pitoisuuksia pienentää radioaktiivinen hajoaminen. Tshernobyl-laskeuman vaikutus kotimaisiin elintarvikkeisiin on kuvattu Säteilyturvakeskuksen tutkimusjulkaisuissa. Vuosina 1986–1988 maidossa ja muissa maataloustuotteissa, kasviksissa ja riistan lihassa havaittiin jatkuvasti  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , osassa tuotteita  $^{90}\text{Sr}$ , ja jakson alussa myös lyhytikäisiä isotooppeja  $^{131}\text{I}$  ja  $^{89}\text{Sr}$ <sup>19-22</sup>.

Ympäristön plutonium on suurimmaksi osaksi peräisin ilmakehässä suoritetuista ydinasekokeista. Plutonium (pääasiassa  $^{239,240}\text{Pu}$ ) on altistanut väestöä eniten hengityksen kautta laskeuman leviämisvaiheessa<sup>23</sup>. Elintarvikkeiden kautta saadut säteilyannokset ovat olleet erittäin pieniä.

Aikaisempien mittaussarjojen ja niihin perustuvien laskentamallien

avulla saadaan suuntaa-antava käsitys elintarvikkeisiin kertyvistä radionuklideista laskeumatilanteen varhaisvaiheessa. Tilanteen aikaiset mittaukset ovat toimenpiteiden perusta, ja mallien ennusteet palvelevat mittausten ohella varovaisuusperiaatteen mukaisten lyhytkestoisten rajoitusten antamista. Myöhäisvaiheen malleilla voi laskea likimääräisiä ennusteita pitkäikäisten radionuklidien pitoisuuksille, jos mallien oletukset ovat riittävän hyvin voimassa kohdealueen olosuhteissa.

### 5.3.4 Maataloustuotteet

Suuruusluokaltaan 1 MBq m<sup>-2</sup>:n laskeuma avomaan vihanneskasvustoihin aiheuttaa valmiisiin elintarvikkeisiin toimenpidearvot ylittäviä aktiivisuuspitoisuuksia, jos kasvien lehtimassa on pitkälle kehittynyt laskeuman tullessa. Pitoisuuksien hajonta on suuri. Annosta vähentäviä toimenpiteitä suunnataan ruokavalion kannalta tärkeisiin elintarvikkeisiin maitoon, lihaan ja viljaan. Maidon <sup>90</sup>Sr- ja <sup>137</sup>Cs-pitoisuuksien aikaintegraalit (taulukko 5.4) perustuvat sekä ydinkoelaskeumista saatuun tietoon<sup>13</sup> että mallinnukseen, jossa on osittain käytetty hyväksi Tshernobyl-laskeuman nuklidien <sup>131</sup>I ja <sup>137</sup>Cs kertymistä maitoon<sup>17,18</sup>. Viljan <sup>90</sup>Sr ja <sup>137</sup>Cs (taulukko 5.5) on arvioitu ydinkoekauden regressiomallin avulla<sup>13</sup>.

Radioaktiivinen strontium ei kulkeudu lihaan merkittävästi. Radioaktiivisen cesiumin pitoisuudet naudanlihassa ovat maitoon verrattuina 4-5 -kertaisia. Suuren jodilaskeuman jälkeen tuorehuhua syövien eläinten liha sisältää jonkin verran myös radioaktiivista jodia.

**Taulukko 5.4.** Laskeuman 1 MBq m<sup>-2</sup> aiheuttamia radionuklidien pitoisuuksien aikaintegraaleja maidossa (MBq · d l<sup>-1</sup>).

Vaihteluväli sisältää kolmea laskeuma-ajan kohtaa (kevät 1.5., kesäkesä 1.7., alkusyksy 1.9.) vastaavat DETRA-mallilla tuotetut arviot lyhytkestoisen päästön jälkeisestä laskeumasta johtuville aktiivisuuspitoisuuksille<sup>17,18</sup>. Viimeisenä on ilmoitettu ydinkoekauden regressiomallilla<sup>13</sup> saadut pitoisuusintegraalit kaikkina laskeuman jälkeisinä vuosina. Malli edustaa maidontuotantoalueilla tehtyjä mittauksia ja alueiden ominaisuudet poikkeavat osittain DETRA-mallin oletuksista.

Ajanjakso	<sup>90</sup> Sr <sup>17</sup>	<sup>131</sup> I <sup>18</sup>	<sup>137</sup> Cs <sup>17</sup>
1 kk	–	0,06–0,08	0,04–0,17
1 v	0,6–0,7	0,06–0,08	0,3–1,1
4 v	1,0–1,3	–	0,4–1,5
50 v	1,9–2,3	–	0,4–1,6
Kaikki vuodet <sup>13</sup>	2,6	–	4,4–12

**Taulukko 5.5.**  $^{90}\text{Sr}$ - ja  $^{137}\text{Cs}$ -pitoisuuksien aikaintegraalit ( $\text{MBq} \cdot \text{a kg}^{-1}$ ) leipäviljassa kasvukauden aikaisen laskeuman  $1 \text{ MBq m}^{-2}$  jälkeen<sup>13</sup>.

Ajanjakso/viljalaji	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$ <sup>a</sup>
1 v		
Ruis	0,05	0,08–0,2
Vehnä	0,08	0,05–0,1
5 v		
Ruis	0,06	0,08–0,2
Vehnä	0,08	0,05–0,1
50 v		
Ruis	0,06	0,08–0,2
Vehnä	0,09	0,05–0,1

<sup>a</sup> Perustuu muita pohjoismaita kuin Suomea edustaviin havaintoihin.

### 5.3.5 Esimerkki alueellisen laskeuman vaikutuksista maitoon

Kuvitteellinen vakava onnettomuuspäästö Etelä-Suomeen oletetaan tässä tapahtuneeksi heinäkuun alussa. Päästön leviämisaikana säätila kohdealueella vaihteli sateisesta poutasään. RODOS-malleilla arvioitu laskeuma ( $\text{Bq m}^{-2}$ ; kuva 5.4) ja radionuklidien pitoisuudet maidossa ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ; kuva 5.5) vaihtelivat nuklideittain tai nuklidiryhmittäin useita kertaluokkia päästön lähteestä mitatun etäisyyden ja säätilan mukaan. Kun maidontuotantoa suojaavia toimenpiteitä ei ko. kuvitellussa tapauksessa tehty, radioaktiivisen cesiumin ja jodin toimenpidearvot<sup>24</sup> ylittyivät ensimmäisenä vuonna useimmissa alueen kunnissa päivien, viikkojen tai kuukausien ajan<sup>25</sup>.  $^{137}\text{Cs}$  aiheuttaisi toimenpiteitä maidontuotannossa myös myöhempinä vuosina.

Huomattakoon, että kuvassa 5.4 on esitetty  $^{137}\text{Cs}$ :n,  $^{131}\text{I}$ :n ja  $^{90}\text{Sr}$ :n laskeumakartat, kun taas kuvan 5.5 pitoisuuksissa ovat mukana myös kyseisten alkuaineiden lyhytikäiset isotoopit. Radionuklidien aktiivisuus-pitoisuudet maidossa muuttuvat laskeumatilanteen varhaisvaiheessa erittäin nopeasti lyhytikäisten isotooppien hajotessa ja ympäristössä tapahtuvien prosessien vähentäessä radionuklidien kulkeutumista elintarvikkeisiin.

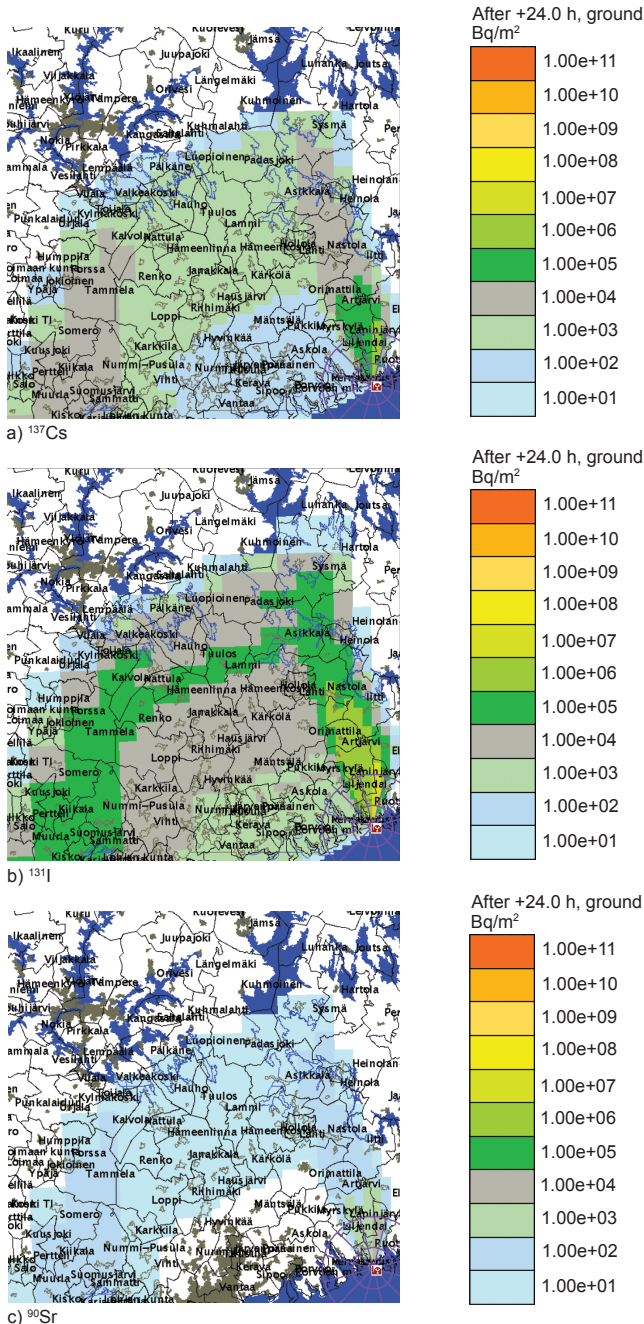
Päästön leviämistä arvioivan mallin epävarmuus on suuri, kun laskenta kohdistuu nopeasti muuttuvaan säätilanteeseen; epävarmuus siirtyy myös laskeuma- ja ravintoketjumalleihin. Lisäksi RODOS-järjestelmän elintarvikemalli perustui osittaisesta Suomen olosuhteisiin sopeuttamisesta huolimatta muualla kuin Suomessa sovellettaviin nautakarjan ruokintakäytäntöihin ja niiden mukaiseen radionuklidien siirtymiseen rehusta kotieläintuotteisiin. Esimerkin numeerisiin arvoihin voi mainituista syistä suhtautua varauksin. Esimerkki osoittaa maidossa esiintyvien radionuklidipitoisuuksien suuren alueellisen hajonnan. Skenaarioon pyrittiin valitsemaan ympäristöön leviävien radionuklidien suhteelliset aktiivisuuserot oikeasuuntaisesti. Esimerkki ilmentää tarpeen mitata tuotettua maitoa vähintäänkin siellä, missä mallilla arvioidut maidon radionuklidien pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin kulutukseen kelpaavassa maidossa tai lähellä toimenpidearvoja. Näin välte-tään pitoisuuksien sekä yli- että aliarvioinnista johtuvat virheet maidon ohjaamisessa päivittäiseen jakeluun.

### 5.3.6 Järvikala

Tärkein kalaan kulkeutuva nukliidi on  $^{137}\text{Cs}$ . Murtovesien kala sisältää karkeasti arvioiden kymmenesosan järvikalan  $^{137}\text{Cs}$ -pitoisuuksista. Järvikalasta on Suomessa jonkin verran mittaustuloksia ydinase-laskeumakaudelta, ja huomattavan laaja aineisto on hankittu vuoden 1986 Tshernobylin onnettomuuden jälkeen<sup>8, 9, 26, 27</sup>. Laskeuman vaikutusten arviointiin soveltuvat suuria vesistöalueita kuvaavat aineistot<sup>28, 29</sup>. Pitoisuuksien aikaintegraaleja on arvi-oitu kokonaiskalansaaliille taulukossa 5.6.

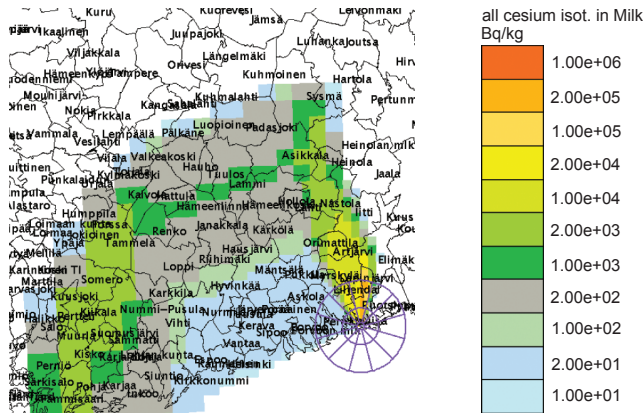
**Taulukko 5.6.** Laskeuman 1 MBq m<sup>-2</sup> aiheuttamia  $^{137}\text{Cs}$ -pitoisuuden aikaintegraaleja järvikalassa (MBq · a kg<sup>-1</sup>).

Ajanjakso	$^{137}\text{Cs}$	Huomautuksia
1 kk	–	Särkikalajien, muiden ja pikku ahventen aktiivisuudet kasvavat, petokalat melko puhtaita
1 v	0,04– 0,09	
5 v	0,3	Kaikkien kalalajien maksimipitoisuudet ohitettu jakson aikana
50 v	0,8	

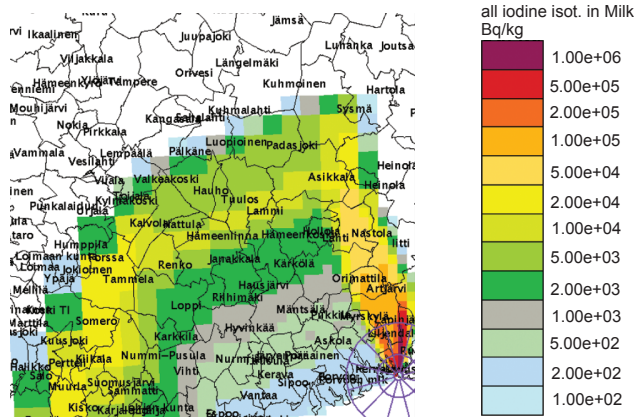


**Kuva 5.4.** Kuvitteellinen esimerkki <sup>137</sup>Cs-, <sup>131</sup>I- ja <sup>90</sup>Sr-laskeumasta Etelä-Suomessa 1. heinäkuuta.

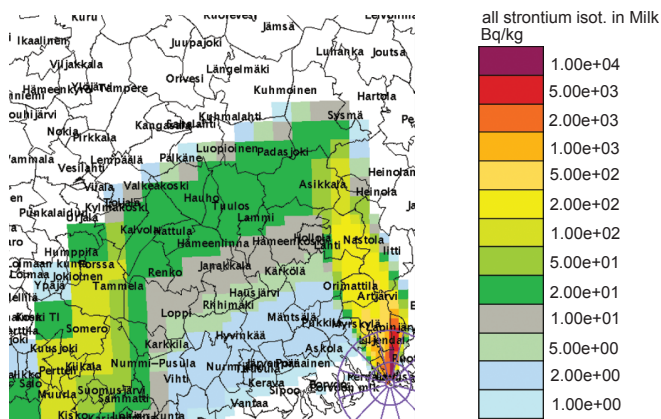
Käytetty lähde-termi: 11,5 tunnin kuluessa Loviisan laitoksen aktiivisuusinventaarista vapautui ympäristöön kaikkiaan 85 % jalokaasuista, 1,3 % jodeista, 1 % alkalimetalleista (ns. cesiumryhmä), 0,01 % telluureista ja antimonia (telluuri-ryhmä) sekä saman verran maa-alkalimetalleista (strontiumryhmä).



a) Radioaktiivinen cesium



b) Radioaktiivinen jodi



c) Radioaktiivinen strontium

Kuva 5.5. Suurimmat maidon radionuklidipitoisuudet kuvan 5.4 kuvitteellisella laskeuma-alueella.

## 5.4 Terveysvaikutukset

Seuraavassa tarkastelussa keskitytään lähinnä kilpirauhasen altistumisesta aiheutuviin terveydellisiin haittavaikutuksiin.

Säteilyaltistuksen aiheuttama syöpäkuoleman riski koko väestössä on arviolta keskimäärin 5 % sievertiä kohden<sup>30</sup>. Lapsilla riski on suurempi ja vanhuk-silla pienempi. Kaavamainen, efektiiviseen annokseen perustuva laskentatapa ei anna oikeata kuvaa kilpirauhassyövän riskistä. Kilpirauhassyöpään kuolleisuus on hyvin pieni, ja siksi ICRP:n (International Commission on Radiological Protection, Kansainvälinen säteilysuojelukomissio) mukainen kilpirauhasen kudospainotuskerroin on myös pieni (0,05) siitä huolimatta, että kilpirauhasen säteilyherkkyys etenkin varhaislapsuudessa on varsin suuri. Kilpirauhassyövän riskiarvioinnissa on sen vuoksi käytettävä kilpirauhaseen absorboitunutta annosta. Ydinvoimalaturman alkuvaiheessa kilpirauhasen säteilyaltistus voi nousta hyvin suureksi päästön sisältämän radioaktiivisen jodin takia (jodin merkitystä ja suojautumista käsitellään myös erikseen luvussa 6 ja osin luvussa 7).

Tshernobylin turman jälkeen tieto radiojodin aiheuttamasta kilpirauhassyöpäriskistä on tarkentunut<sup>31</sup>. Lasten osalta voidaan käyttää aikaisempaa riskiarviota 2,5 /10000 py Gy (henkilö-gray -vuotta)<sup>32</sup>. Ei ole kuitenkaan enää perusteltua käyttää alhaisempaa arviota <sup>131</sup>I-isotoopille kuin ulkoiselle altistukselle ja lyhytikäisille isotoopeille, niin kuin aikaisemmin on ajateltu. Toisaalta aikuisille ei ole olemassa luotettavaa riskikerrointa radiojodille eikä ulkoiselle-kaan altistukselle. Selvää näyttöä säteilyn aiheuttamasta kilpirauhassyöpäriskistä aikuisilla ei ole. Nuorilla aikuisilla on kuitenkin todennäköisesti jonkinasteinen riski. Tämä saattaa koskea esimerkiksi niitä nuoria naisia, joilla on vielä raskauksia edessä, koska raskauden aikana kilpirauhasen toiminta kiihtyy. Radiojodista kliinisessä käytössä ei ole todettu aiheutuvan kilpirauhassyöpää, mutta suurin osa tutkituista on ollut aikuisia<sup>33</sup>.

Enintään 10 % säteilyn aiheuttamista kilpirauhassyöivistä arvioidaan johtavan kuolemaan. Lapsilla ennuste on parempi kuin aikuisilla. Tshernobylin turman jälkeen sairastuneista lapsista tiettävästi alle 1 % on kuollut. Kilpirauhassyövän takia hoidetut henkilöt kuitenkin tarvitsevat ainakin hormonikorvaushoitoa koko loppuelämän ajan, joten sairaus ei ole suinkaan vail-la merkitystä kansanterveyden kannalta. Kuolleisuus saattaa myös olla korkeampi myöhemmällä iällä sairastuvilla.

Hyvänlaatuisia kilpirauhaskasvaimia tai liikakasvukyhyjä, joiden merkitys terveydelle ei ole kovin suuri, arvioidaan esiintyvän kolme kertaa enemmän kuin syöpäkasvaimia. Pahimmat säteilyseuraukset ydinvoimalaturmassa merkitsevät suojaamattomille pikkulapsille niin suuria kilpirauhasannoksia, että niistä voi kehittyä kilpirauhasen vajaatoiminta.



Kliinistä merkitystä omaava vajaatoiminta edellyttää todennäköisesti yli 10 Gy annosta<sup>34</sup>. Biokemiallisesti todettava häiriö on mahdollinen alhaisempien annosten jälkeen.

Kilpirauhasen säteilyaltistus liittyy erityisesti onnettomuuden alkupäiviin, jolloin laskeumassa on <sup>131</sup>I:n lisäksi lyhytikäisempiäkin jodi-isotooppeja ja altistus tapahtuu hengitysteitse. Seuraavien viikkojen aikana merkittävä altistus tapahtuu maidon ja muiden elintarvikkeiden sisältämän <sup>131</sup>I:n kautta, jollei saastuneiden elintarvikkeiden käyttöä pystytä tehokkaasti rajoittamaan.

Seuraavassa tarkastellaan alle 15-vuotiaiden kilpirauhassyöpäriskiä kahden ensimmäisen vuorokauden altistuksen seurauksena. Tällöin annoksesta valtaosa aiheutuu hengitysilman sisältämistä jodi-isotoopeista. Ulkoisen säteilyn osuus on muutama prosentti, ja se on myös laskuissa otettu mukaan. Muista hengitysilmaan sisältyvistä nuklideista ei aiheudu merkittävää kilpirauhasannosta.

Lasten saama sisäisen säteilyn annos hengitysilman radiojodista on korkeampi kuin aikuisten johtuen pääasiassa siitä, että heidän fyysinen aktiiviteettinsa on suurempi. Keskimääräinen hengitystilavuus aikayksikössä on sen vuoksi suurempi suhteessa ruumiinpainoon ja myös kilpirauhasen painoon. ICRP:n mallin mukaan pienen lapsen annos on vähän yli kaksinkertainen aikuisen verrattuna<sup>35</sup>. Yli kymmenvuotiaan lapsen annos on noin puolitoistakertainen. Jäljempänä lapsen saaman sisäisen annoksen on laskettu olevan kaksinkertainen verrattuna aikuisen. Ulkoisen säteilyn aiheuttama annos on aikuisilla ja lapsilla sama.

Arvioitaessa eri kohdepaikkakuntien lapsiväestön kollektiiviannoksia paikkakuntien oletettiin olevan muodoltaan neliöitä, joiden väestötiheys on vakio ja joiden pinta-ala on yhtä suuri kuin ko. paikkakunnan todellinen pinta-ala. Päästövanan (trajektorin) oletettiin kulkevan kunkin paikkakunnan keskeltä. Paikkakuntien keskimääräisiä annoksia laskettaessa annos oletettiin pilven kulkusuunnassa muuttumattomaksi, mutta sen sijaan poikittaissuunnassa otettiin huomioon leviämisen aiheuttama annoksien ja pitoisuuksien pieneneminen trajektorilta sivuun siirryttäessä (taulukko 5.7).

Taulukosta 5.8 käy ilmi koko väestön sekä alle 15-vuotiaiden lasten lukumäärä kohdepaikkakunnilla 1.1.2004.

Taulukossa 5.9 on esitetty laskelma yksilön kilpirauhassyöpäriskin kannalta pahimmasta uhkakuvasta eli tapauksesta Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka leviämiskorkeuden ollessa 100 m. Riskitekijänä on käytetty 2,5 / 10000 py Gy. Latenssiajaksi on arvioitu neljä vuotta ja latenssiajan jälkeen jäljellä olevaksi eliniäksi lapselle keskimäärin 63 vuotta. Samaa riskilukua käytetään jodin eri isotoopeille ja ulkoiselle säteilylle. Taulukossa esitetään kilpirauhasen säteily-

annos erikseen yli 15-vuotiaille ja alle 15-vuotiaille. Kilpirauhassyöpäriski on laskettu vain alle 15-vuotiaille, koska aikuisten osalta epävarmuus on liian suuri.

**Taulukko 5.7.** Väestön keskimääräinen annos maksimiannokseen verrattuna.

Laitos ⇒ kohde	Keskimääräisen annoksen ja maksimiannoksen suhde (%)
Loviisa ⇒ Helsinki	83
Olkiluoto ⇒ Turku	86
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka	93
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki	86
Ignalina ⇒ Helsinki	98
Kuola ⇒ Oulu	95
Forsmark ⇒ Turku	91

**Taulukko 5.8.** Kohdepaikkakuntien väestö 1.1.2004 (pyöristetty).

Kohde	Väestö	Alle 15-vuotiaita
Helsinki	559000	82000
Turku	175000	25000
Kotka	55000	8500
Oulu	126000	22000

Taulukossa esitettyjen tulosten perusteella kahden ensimmäisen vuoro-kauden aikana ilman suojaa säteilylle altistuneella lapsella on 15 %:n riski sairastua tästä syystä elämänsä aikana kilpirauhassyöpään. Hyvä suoja vähentää riskin melkein kahdessadasosaan. On huomioitava, että alkuvuosien osalta riskiarviolla on Tshernobyliin perustuen kohtalainen perusta<sup>31</sup>. Sen sijaan koko elämään sovellettavaa, näyttöön perustuvaa riskimallia ei ole, joten koko elämää koskeva ennuste on hyvin epävarma. Tässä laskelmassa käytetty malli (vakainainen absoluuttinen riski) saattaa aliarvioida riskiä.

Taulukossa 5.10 on esitetty vastaavalla tavalla laskettuina eri kulkeutumistapauksissa lasten yksilölliset kilpirauhassyöpäriskit trajektorilla sekä ilman suojaa että tehokkaalla suojautumisella. Pitoisuus- ja annostiedot on esitetty luvun 4 liitteissä II–VIII.

Taulukossa 5.11 on laskettu kilpirauhassyöpätapausten odotettu lukumäärä kohdepaikkakunnan lapsiväestössä eri kulkeutumistapauksissa ilman suojaa ja tehokkaalla suojautumisella kymmenen vuoden aikana. Aika on valittu sen perusteella, että pidemmältä ajalta hyvin perusteltua riskimallia ei

ole. Lisäksi tämä aika on tärkeä, koska tässä iässä – lapsuudessa altistuneiden ollessa vielä nuoria – kilpirauhassyövän taustainsidenssi on hyvin alhainen. Tarkasteluajanjakso alkaa latenssiajan jälkeen ja koskee täten aikaväliä 4–13 vuotta altistuksesta. Alle 15-vuotiaina altistuneiden ikä on tällöin sairastumishetkellä 4–28 vuotta. Samassa ikäkohortissa tänä aikana odotettavissa olevien kilpirauhassyöpätapausten lukumäärä ilman säteilyä on Helsingissä 16 tapausta, Turussa 5, Kotkassa 2 ja Oulussa 4 tapausta. Kilpirauhassyövän ikävakioitu taustainsidenssi Suomessa on koko väestössä noin  $5 \cdot 10^{-5}$  tapausta vuodessa. Alle 15-vuotiailla taustainsidenssi on vähän alle  $1 \cdot 10^{-6}$  tapausta vuodessa. Kokonaismäärä Suomessa on noin 360 tapausta vuodessa, joista keskimäärin yksi on alle 15-vuotias<sup>36</sup>.

**Taulukko 5.9.** Kilpirauhasen säteilyannos ja alle 15-vuotiaan yksilön kilpirauhassyöpäriski trajektorilla kahden ensimmäisen vuorokauden säteilyaltistuksen seurauksena (esimerkkitapaus Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka, leviämiskorkeus 100 m).

	Ilman suojaa	Suojautuminen sisälle, ulk. suojaustekijä 0,3. Hengityssuojaustekijä 0,3. Ei joditablettia.	Tehokas suojautuminen sisälle, ulk. suojaustekijä 0,025. Hengityssuojaustekijä 0,1. Joditabletti, lisätekiä jodille 0,05.
<b>Yli 15-vuotiaat, annokset</b>	<b>mGy</b>	<b>mGy</b>	<b>mGy</b>
Ulkoinen säteily pilvestä ja laskeumasta	174	52	4,4
Lyhytikäiset jodi-isotoopit	972	292	4,9
I-131	3760	1128	18,8
Kilpirauhasannos	4906	1472	28,1
<b>Alle 15-vuotiaat, annokset. Sisäinen annos on aikuisen annos x 2.</b>	<b>mGy</b>	<b>mGy</b>	<b>mGy</b>
Ulkoinen säteily pilvestä ja laskeumasta	174	52	4,4
Lyhytikäiset jodi-isotoopit	1944	583	9,7
I-131	7520	2256	37,6
Riskiärvion perusteena oleva kilpirauhasannos	9638	2891	51,7
<b>Alle 15-vuotiaat, sairastumisriski</b>			
Vuosittainen riski ( $2,5 \cdot 10^{-4}/\text{Gy}$ )	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Elinikäisriski, jos vuosittainen riski on vakio ja riskivuosien lukumäärä 63	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$

**Taulukko 5.10.** Yksilön kilpirauhassyöpäriski trajektorilla eri kulkeutumistapauksiin liittyen taulukon 5.9 periaatteen mukaisesti laskettuna. Altistus alle 15-vuotiaana.

	Ilman suojaa		Tehokas suojauminen sisälle sekä joditabletti	
	Vuosittainen riski	Elinikäisriski	Vuosittainen riski	Elinikäisriski
Loviisa ⇒ Helsinki				
100 m	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
500 m	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Olkiluoto ⇒ Turku				
100 m	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$
500 m	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki				
100 m	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$
500 m	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka				
100 m	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
500 m	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Ignalina ⇒ Helsinki				
500 m	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$
Kuola ⇒ Oulu				
500 m	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Forsmark ⇒ Turku				
100 m	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
500 m	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$

**Taulukko 5.11.** Kohdepaikkakunnan alle 15-vuoden iässä altistuneiden ihmisten kilpirauhassyöpätapausten kokonaismäärä kymmenessä vuodessa eri kulkeutumistapauksissa kahden ensimmäisen vuorokauden altistuksen seurauksena.

	A) Ilman suojaa, lapset ulkona pilven saapuessa.	B) Lapset suojautuvat tehokkaasti sisätiloihin ja saavat oikeaan aikaan joditabletteja.
Loviisa ⇒ Helsinki		
100 m	800	5
500 m	330	2
Olkiluoto ⇒ Turku		
100 m	400	2
500 m	170	1
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki		
100 m	1100	6
500 m	480	3
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka		
100 m	190	1
500 m	80	< 0,5
Ignalina ⇒ Helsinki		
500 m	230	1
Kuola ⇒ Oulu		
500 m	10	< 0,1
Forsmark ⇒ Turku		
100 m	240	1
500 m	90	< 0,5

## Viiteluettelo

1. UNSCEAR 1982 Report Ionizing radiation: Sources and biological effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 Report to the General Assembly. United Nations; New York 1982.
2. UNSCEAR 1988 Report. Sources, effects and risks of radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly. United Nations; New York 1988.
3. Arvela H. Tutkimus Tsernobylyturman annosnopeuden vähenemisestä Suomessa. Alustavia tuloksia. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1992.
4. Mueck K, Steger F. Wash-off effects in urban areas. Radiation Protection Dosimetry (1991) 37; 189–194.
5. Reponen A, Jantunen M. Removal ratio of Chernobyl fallout radioactivity on urban surfaces. Health Physics (1991) 60; 569–573.
6. Finck R. Shielding factors for gamma radiation. Experiments and calculations for Swedish dwellings. Radonboken. SSI; Stockholm 1991.
7. Saxen R, Aaltonen H. Radioactivity of surface water in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A60. Supplement 5 to Annual Report

- STUK-A55. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1987.
8. Saxen R. Radioactivity of surface water and freshwater fish in Finland in 1987. STUK-A77. Supplement 3 to Annual Report STUK-A74. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1990.
  9. Saxen R, Koskelainen U. Radioactivity of surface water and freshwater fish in Finland in 1988 – 1990. STUK-A94. Supplement 6 to Annual Report STUK-A89. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1992.
  10. Saxén R. Long-term behaviour of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in surface water in Finland. In: STUK-A195: Paile W. (ed.). Radiation Protection in the 2000s - Theory and Practice. Nordic Society for Radiation Protection. Proceedings of the XIII Ordinary Meeting, Turku, Finland, August 25–29, 2002. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 2003.
  11. Pesonen T, Heinonen E, Salo A. Radionuklidien poistuminen vedenkäsittelyssä. Osa II: Strontium-90. SFL-B3. Säteilyfysiikan laitos; Helsinki 1972.
  12. Rantavaara A. Ingestion doses in Finland due to  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  from nuclear weapons testing and the Chernobyl accident. Applied Radiation and Isotopes (2008) 66; 1768–1774.
  13. Nielsen OJ, Lippert J, Aarkrog A. 1981.  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Prediction Models for Various Constituents of Human Diet in the Nordic Countries. Report produced under contract NKA/Ra-R6A, Risø National Laboratory, Denmark.
  14. UNSCEAR, 1977. Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1977 Report, Annex C, p. 115. United Nations, New York.
  15. Ehrhardt J, Weis A. RODOS: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. EUR 19144 EN. European Commission; 2000.
  16. Müller H, Gering F, Pröhl G. Model Description of the Terrestrial Food Chain and Dose Module FDMT in RODOS PV4.0. Report RODOS(WG3)-TN(99)17, Appendix to the Final Report of the RODOS Project; 1999.
  17. Suolanen V. Laskentamalli kesiumin ja strontiumin siirtymiselle kotieläintuotteisiin lyhytkestoisen laskeuman jälkeen. STUK-YTO-TR 65. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1994.
  18. Suolanen V. Radioaktiivisesta jodi- ja cesiumlaskeumasta maidon kautta aiheutuvat annokset. STUK-YTO-TR40. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1992.

19. Rantavaara A, Haukka S. Radioactivity of milk, meat, cereals and other agricultural products in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A58. Supplement 3 to Annual Report STUK-A55. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1987.
20. Rantavaara A. Radioactivity of vegetables and mushrooms in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A59. Supplement 4 to Annual Report STUK-A55. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1987.
21. Rantavaara A, Nygrén T, Nygrén K, Hyvönen T. Radioactivity of game meat in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A62. Supplement 7 to Annual Report STUK-A55. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1987.
22. Rantavaara A. Radioactivity of foodstuffs in Finland in 1987-88. STUK-A78. Supplement 4 to Annual Reports STUK-A74 and STUK-A89. Säteilyturvakeskus; Helsinki 1991.
23. Mussalo H, Jaakkola T, Miettinen JK, Laiho K. Distribution of fallout plutonium in southern Finns. *Health Physics* (1980) 39; 245-255.
24. CEC/Euratom. Council Regulation (Euratom) No 3954/87 of 22 December 1987 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination of foodstuffs and feedingstuffs following a nuclear accident or any other case of radiological emergency. *Off. J. Eur. Commun.*, L 371, 30/12/1987 P. 0011-0013; 1987.
25. Rantavaara A, Karhula T, Puurunen M, Lampinen K, Taulavuori T. Costs and practicability of clean feeding of dairy cattle during radioactive contamination of grasslands. *Journal of Environmental Radioactivity* (2005) 83; 399-414.
26. Saxén R, Rantavaara A. Radioactivity of fresh water fish in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A61. Supplement 6 to Annual Report STUK-A55. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1987.
27. Saxén R, Koskelainen U, Alatalo M. Transfer of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  into fishes in some Finnish lakes. STUK-A170. Radiation and Nuclear Safety Authority; Helsinki 2000.
28. Saxén R. Transport of  $^{137}\text{Cs}$  in large Finnish drainage basins. In: Dahlgard H. (ed.). *Nordic Radioecology. The transfer of radionuclides through Nordic ecosystems to man. Studies in Environmental Science 62.* Elsevier; Netherlands 1994.
29. Saxén R, Koskelainen U. Regional variation of  $^{137}\text{Cs}$  in freshwater fishes in Finland. In: *Proceedings Volume II of the International Congress "The Radioecology-Ecotoxicology of Continental and Estuarine Environments ECORAD 2001"*, Aix-en-Provence, 3–7 September, 2001, France. *Radioprotection - colloques Volume 37, C1, 617–620.*

30. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of the ICRP 21 Nos.1–3. Pergamon Press; Oxford 1991.
31. Jacob P, Kenigsberg Y, Zvonova et al. Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia. *Br J Cancer* (1999) 80; 1461–1469.
32. NCRP. Induction of thyroid cancer by ionizing radiation. NCRP Report No. 80. National Council on Radiation Protection and Measurements; Bethesda, Maryland, 1985.
33. Hall P, Mattsson A, Boice J D. Thyroid cancer after diagnostic administration of iodine-131. *Radiat Res* (1996) 145; 86–92.
34. Conard R A et al. Review of medical findings in a Marshallese population twenty-six years after accidental exposure to radioactive fallout. Report No. BNL 51261. Brookhaven National Laboratory; Upton, NY, 1980.
35. ICRP. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71. Annals of the ICRP 25 Nos. 3–4. Pergamon Press; Oxford 1995.
36. Finnish Cancer Registry - Institute for Statistical and Epidemiological Cancer Research. Cancer Incidence in Finland 1998 and 1999. Publication No. 63. Cancer Society of Finland; Helsinki 2002.



## 6 Jodi ja ydinvoimalaturma

H. Toivonen, W. Paile ja J. Lahtinen

## 6 Jodi ja ydinvoimalaturma

### 6.1 Havaintoja Windscalen ja Tshernobylin onnettomuuksista

Ensimmäisinä päivinä säteilyonnettomuuden jälkeen radioaktiivinen jodi voi aiheuttaa suuren säteilyannoksen hengityksen kautta. Elimistöön päässyt jodi kertyy tehokkaasti kilpirauhaseen (20–30 %, jopa 70 %). Säteilyannos aiheutuu pääosin isotoopista I-131, mutta tuoreessa laskeumassa myös lyhytikäiset isotoopit I-132–135 voivat aiheuttaa suuren vaaran. Myöhemmin jodia voi päästä elimistöön merkittävästi vain elintarvikkeiden, lähinnä maitotuotteiden kautta. Kilpirauhasen annoksia ja niistä aiheutuvia seurauksia tämän raportin laskennallisissa onnettomuustapauksissa on tarkasteltu edellä kohdassa 5.4.

Taulukossa 6.1 on vertailtu jodista aiheutuvaa säteilyaltistusta kolmessa eri onnettomuustapauksessa, joista seurasi ympäristöön varsin erilainen päästö. Havaitaan, että kilpirauhasen annos voi olla suuri onnettomuuspaikan lähialueella. Windscalen onnettomuudessa vuonna 1957 jodialtistus väheni 40 km etäisyydellä kymmenenteen osaan verrattuna altistukseen laitosalueella tai sen välittömässä läheisyydessä.<sup>1</sup>

**Taulukko 6.1.** <sup>131</sup>I-päästöjen säteilyvaikutuksia sekä Suomessa (Sosnovyi Bor v. 1992 ja Tshernobyl v. 1986) että onnettomuuspaikan lähialueella (Windscale v. 1957).

Onnettomuus- ja kohdepaikkakunta sekä etäisyys	Päästö (Bq)	Suurin pitoisuus (Bq m <sup>-3</sup> )	Pitoisuus-integraali (Bq · h m <sup>-3</sup> )	Kilpirauhasen annos (mGy)
Sosnovyi Bor ⇒ Loviisa 160 km	10 <sup>10</sup> –10 <sup>11</sup>	0,005	0,02	5 · 10 <sup>-6</sup>
Tshernobyl ⇒ Nummijärvi 1000 km	10 <sup>18</sup>	223	4500	1,2
Windscale ⇒ Seascale	10 <sup>15</sup>		270 000	73 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Todellinen annos 5 mGy.

Tshernobylin onnettomuudesta seurasi merkittävä jodialtistus miljoonille ihmisille satojen kilometrien etäisyydellä onnettomuuspaikasta. Laajoilla alueilla Ukrainassa, Venäjällä ja Valko-Venäjällä jodialtistus oli paljon suurempi kuin Windscalen päästön yhteydessä onnettomuuspaikan lähialueilla. Ilyinin<sup>2</sup> mukaan jodi aiheutti 1,2 miljoonalle ihmiselle keskimäärin 200 mGy kilpirauhasannoksen. Alle seitsemänvuotiaat lapset saivat suurimmat annokset (121000 lasta, keskimäärin 516 mGy); 300 lapsen arvioitiin saaneen jopa 10–40 Gy annoksen. UNSCEAR 2000 ja IAEA Chernobyl Forum esittävät päivitetetyt tiedot eri ryhmien altistuksesta.<sup>3,4</sup>

Tapahumapaikan välittömässä läheisyydessä sijaitsevan Pripjatin kaupungin 50000 asukasta, jotka evakuoitiin puolentoista vuorokauden kuluttua onnettomuudesta, altistuiivat jodille pääasiassa hengitysteitse. Tässä ryhmässä 0–3 vuotiaiden annos oli noin 1,4 Gy ja kaikkien keskiarvo 200 mGy. Lyhytikäisten jodi-isotooppien osuus annoksesta oli arviolta 20 %<sup>a,5,6</sup> Annokset jäivät alhaisemmiksi kuin muilla evakuoituilla, jotka ehtivät ennen siirtoa altistua paitsi hengityksen kautta myös saastuneista elintarvikkeista. Kauempana onnettomuuspaikasta pääasiallinen altistusreitti oli maito (80–90 %) ja lyhytikäisten isotooppien osuus annoksesta oli yhden prosentin luokkaa.<sup>7</sup>

Valkovenäjällä, Pohjois-Ukrainassa ja Länsi-Venäjällä on todettu lasten ja nuorten kilpirauhassyövän räjähdysmäinen kasvu vuoden 1990 jälkeen.<sup>8,9</sup>

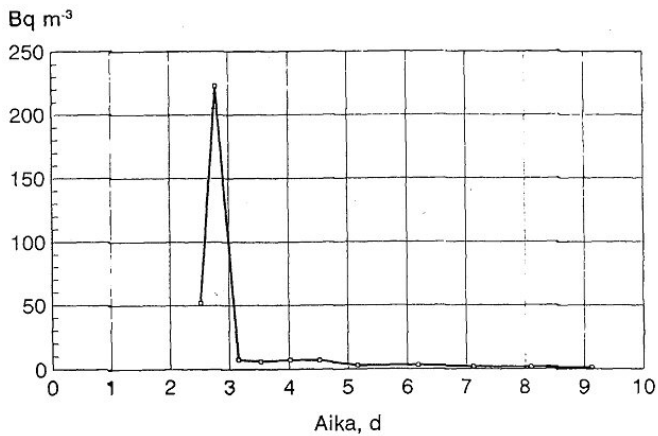
Onnettomuuden alkupäivinä Tshernobylin lähialueilta ei saatu yksityiskohtaisia tietoja pitoisuusmittauksista. Eräitä yksittäisiä tuloksia on raportoitu, mutta yhtään pitoisuusintegraalia ei ollut saatavilla. Niinpä tästä ei ole voitu suoraan päätellä, mikä osuus jodin aiheuttamasta säteilyaltistuksesta olisi tullut hengitysilman kautta. Maidon osuutta on kuitenkin voitu arvioida maidon kulutuksen ja kilpirauhasmittausten korrelaation perusteella.<sup>3</sup>

Windscalen lähialueilla<sup>1</sup> jodilaskeuma oli suuruusluokkaa 300 kBq m<sup>-2</sup>. Tshernobylin laskeuma Nurmijärvellä<sup>10</sup> oli alle 50 kBq m<sup>-2</sup>. Ukrainassa, Venäjällä ja Valko-Venäjällä on suuria alueita, joissa ylitettiin 500 kBq m<sup>-2</sup>, paikoitellen jopa 2 MBq m<sup>-2</sup>. Ilmeisesti tämäkin lukuarvo on vain noin kymmenesosa maksimaalisesta jodilaskeumasta. Tuhansien neliökilometrien alueella cesiumlaskeuma ylitti 1,5 MBq m<sup>-2</sup>, ja jodipäästö oli kaksikymmenkertainen cesiumpäästöön verrattuna.<sup>3</sup>

Suomessa ilman radioaktiivisuusvalvonta on tuottanut tuloksia, joita voidaan suoraan käyttää hyödyksi arvioitaessa pahimman mahdollisen ulkomaisen ydinvoimalaturman vaikutuksia. Kuvasta 6.1 näkyy, että Tshernobylistä tullut radioaktiivinen pilvi oli vain noin vuorokauden Nurmijärven yläpuolella. Tämän jälkeen ilma puhdistui nopeasti, ja muutaman päivän kuluttua jodipitoisuus oli enää sadasosa suurimmasta arvostaan. Kuvassa 6.2 on vertailun vuoksi esitetty <sup>131</sup>I-pitoisuus Kiovan pintailmassa.<sup>11</sup>

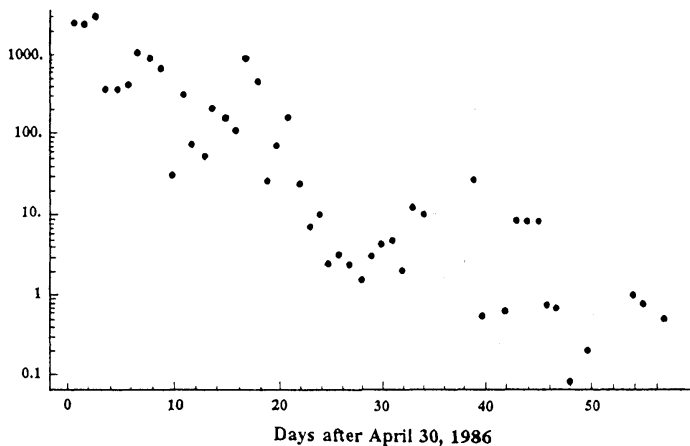
---

<sup>a</sup> Jos henkilö oli saanut joditabletin, osuus oli 50 %, koska tabletin suojavaikutuksen hiipuessa <sup>132</sup>I-altistus jatkuu keuhkoihin jääneen <sup>132</sup>Te:n kautta.



**Kuva 6.1.** Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama  $^{131}\text{I}$ -pitoisuus Nurmijärven pinta-ilmassa.

Aika-akselin nollakohtaksi on valittu 26.4.1986 klo 0.00 Suomen aikaa. Tshernobylin ydinturma tapahtui 26.4.1986 klo 1.23 paikallista aikaa.



**Kuva 6.2.**  $^{131}\text{I}$ -pitoisuus Kiovan pintailmassa Tshernobylin ydinvoimalaturman jälkeen.<sup>11</sup>

Tshernobylin laskeuman vaikutus Suomessa jäi kymmenkertaisesti alle sen tason, jossa laajat suojautumistoimet voivat tulla kyseeseen. Havaittu ulkoisen säteilyn annosnopeus oli suurimmillaan luokkaa  $5 \mu\text{Gy h}^{-1}$  (Uusikaupunki 3–4 ja Ruotsinpyhtää noin 6). Nurmijärvellä mitattiin  $^{131}\text{I}$ -pitoisuuden huippuarvoksi  $220 \text{ Bq m}^{-3}$ .<sup>12</sup>

## 6.2 Ekstrapolointia Sosnovyi Borin tapauksesta

Sosnovyi Borin tapauksen<sup>13</sup> aikana keväällä 1992 ulkoisen säteilyn annosnopeus Suomen etelärannikolla ei poikennut normaalista. Kuitenkin ilmassa oli samoja radionuklideja kuin Tshernobylin päästön yhteydessä. Loviisassa <sup>131</sup>I-pitoisuus oli suurimmillaan 0,005 Bq m<sup>-3</sup>.<sup>13</sup>

Vakavassa ydinvoimalaturmassa päästö voisi olla 10<sup>7</sup> – 10<sup>8</sup> -kertainen verrattuna em. Sosnovyi Borin tapaukseen. Matalalla kulkeva päästöpilvi voisi kuljettaa Suomen etelärannikolle suuren määrän radioaktiivisia aineita. Jos säteilyvaikutus olisi suoraan verrannollinen päästön suuruuteen, niin Sosnovyi Borin päästön aikana vallinneissa sääolosuhteissa <sup>131</sup>I-pitoisuus Suomen etelärannikolla voisi olla pahimmillaan jopa 100000 Bq m<sup>-3</sup>. Tässä tilanteessa suojautumaton ihminen saisi muutamassa tunnissa yli sadan milligrayn kilpirauhasannoksen.

Sosnovyi Borin tapauksen yhteydessä säätilanne ei suinkaan ollut epäsuotuisin säteilyseurausten kannalta. Päästö oli sellainen, että suuri osa radioaktiivisista aineista kulkeutui muualle kuin Suomen etelärannikolle. Lisäksi luoteesta ja pohjoisesta tulleet ilmamassat puhdistivat ilman nopeasti. Pitoisuusintegraali Loviisassa oli vain 70 Bq s m<sup>-3</sup>, mikä vastaa 5 nGy säteilyannosta kilpirauhaselle. Pahimmassa tilanteessa pitoisuusintegraali voisi olla 10<sup>8</sup>-kertainen, ehkä vieläkin suurempi. Tällöin kilpirauhasen annos on suuruusluokaltaan gray-tasoa. Tämän selvityksen hypoteettisessa onnettomuustapauksessa päädyttiin noin 4 Gy maksimiannokseen (ks. luku 4, liite V).

Pahasti kontaminoituneella alueella tuotettu maito olisi käyttökeltovotonta muutaman viikon ajan siitäkin huolimatta, että lehmille voitaisiin antaa rehua, joka laskeuman aikana olisi ollut sisätiloissa.

Suuren päästön yhteydessä vapautuisi myös suuri määrä lämpöä. Niinpä radioaktiiviset aineet nousisivat korkealle ja ne leviäisivät laajalle alueelle. On hyvin epätodennäköistä, että päästöpilvi voisi jäädä alle sadan metrin korkeuteen, kuten kävi ainakin osittain Sosnovyi Borin tapauksen yhteydessä.

## 6.3 Suojautumiskriteerit

Joditabletin avulla voidaan estää radioaktiivisen jodin kertyminen kilpirauhaseseen. Joditabletin käytön kriteerit määritellään erikseen kunkin onnettomuuden yhteydessä. Säteilyturvakeskuksen julkaisemassa ohjeessa<sup>14</sup> VAL 1.1 esitetään valmiussuunnittelussa käytettäväksi joditablettien nauttimisen kriteeriksi lapsille 10 mGy ja aikuisille 100 mGy vältettyä yksilön kilpirauhasen annosta; vastaavat operatiiviset toimenpidetasot (ilmoitettuna ulkoisen säteilyn annosnopeutena) ovat 10 μSv h<sup>-1</sup> ja 100 μSv h<sup>-1</sup>.

Säteilyvaaran uhatessa on tiedettävä etukäteen, millaisen annoksen tietty määrä radioaktiivista jodia hengitysilmassa voi aiheuttaa. Seuraavat sekundaariset ohjearvot perustuvat  $^{131}\text{I}$ :n aiheuttamaan 20 mGy:n säteilyannokseen aikuisen kilpirauhaselle (yksivuotias lapsi saisi samasta altistuksesta kolminkertaisen annoksen):

1. Pitoisuusintegraali  $> 3000 \text{ Bq} \cdot \text{d m}^{-3}$ . Pitoisuusintegraalia on vaikea arvioida etukäteen.
2. Pitoisuus  $\gg 1000 \text{ Bq m}^{-3}$ , mikäli se näyttää vallitsevan pitkään. Hetkellinen pitoisuus saisi olla enintään  $4000 \text{ Bq m}^{-3}$ , jos tilanne kehittyisi ajallisesti samalla tavalla kuin Tshernobylin laskeuman aikaan Nurmijärvellä.

Uhkaavassa tilanteessa suojaustoimiin ryhdytään viranomaisten arvion perusteella, vaikka yksityiskohtaisia mittaustuloksia tai matemaattisten mallien tuottamia ennusteita ei olisikaan saatavilla. Joditableteilla on keskeinen merkitys kilpirauhasen säteilyannoksen vähentämiseksi. Tablettien saatavuus ja jakelu on organisoitava siten, että jodiprofylaksiaan voidaan ryhtyä ennen radioaktiivisen pilven saapumista.

## Viiteluettelo

1. Goodwin VR. Radiological and medical consequences of the Windscale fire of October 1957. In: Nuclear accidents and the future of energy. Proceedings of the International Conference, April 15–17, Paris, 1991. p. 244–252
2. Ilyin L. Public dose burdens and health effects due to the Chernobyl accident. Proceedings of the International Conference, April 15–17, Paris, 1991. (Erillinen moniste).
3. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Exposures and effects of the Chernobyl accident. Vol II: Effects. Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident. New York: United Nations; 2000.
4. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Radiological Assessment Reports Series. Vienna: IAEA; 2006.
5. Goulko GM et al. Estimation of  $^{131}\text{I}$  thyroid doses for the evacuees from Pripjat. Rad Envir Biophys (1996); 35: 81–87.

6. Balonov M et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. *Rad Prot Dosim* (2003) 105; 593–599.
7. Gavrilin Y et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus - Part I:  $^{131}\text{I}$ , short-lived radioiodines ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) and radiotelluriums ( $^{131\text{m}}\text{Te}$  and  $^{132}\text{Te}$ ). *Health Physics* (2004) 86; 565–585.
8. Kazakov V et al. Thyroid cancer after Chernobyl. *Nature* (1992); 359: 21.
9. Jacob P et al. Thyroid cancer risk in areas of Ukraine and Belarus affected by the Chernobyl accident. *Rad Res* (2006); 165: 1–8.
10. Saxen R, Taipale T, Aaltonen H. Radioactivity of wet and dry deposition and soil in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A57. Helsinki: Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; 1987.
11. Buzulukov Yu P, Dobrynin Yu L. Release of radionuclides during the Chernobyl accident. *The Chernobyl Papers. Vol 1. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies* (ed. Mervin S. and Balonov M.). Research Enterprises; Washington 1993.
12. Sinkko K et al. Airborne radioactivity in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A56. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1987.
13. Toivonen H et al. Radioactive release from Sosnovyy Bor, St. Petersburg, in March 1992. STUK-A104. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1992.
14. Säteilysuojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa. Ohje VAL 1.1. Säteilyturvakeskus; Helsinki 2001. Ohjetta ollaan uusimassa.





## **7 Suojautuminen laskeumatilanteessa**

H. Toivonen, J. Lahtinen, R. Pöllänen

## 7 Suojautuminen laskeumatilanteessa

### 7.1 Suojautumiseen käytettävissä oleva varoaika

Onnettomuuden tapahtumaketju vaikuttaa ratkaisevasti reaktorista ulospääsevien radionuklidien määrään ja vapautumisajankohtaan. Suuria määriä radioaktiivisia aineita saattaa vapautua onnettomuuden varhaisessa vaiheessa, jos reaktorisydän vaurioituu räjähdysmäisesti tai sydämen jäähdytettävyyden kannalta olennaiset tekniset järjestelmät tuhoutuvat. Suojarakennuksen olisi myös rikkouduttava nopeasti. Rikkoutumisen voivat aiheuttaa mm. vetytalo tai -räjähdys, höyryräjähdys, voimakas reaktiivisuustransientti (tehon nopea nousu) tai laitoksen ulkopuoliset syyt. Näiden tapahtumistodennäköisyys on hyvin pieni. Suojarakennus voi rikkoutua myös hitaan ylipaineistuksen takia.

Tutkimalla kuviteltuja onnettomuusketjuja on tultu siihen tulokseen, että Loviisan, Olkiluodon ja Forsmarkin voimaloissa suuren päästön vaara voidaan todennäköisesti ennakoida useita tunteja ennen päästön alkamista. Valmiustoiminta ja väestön hälyttäminen voidaan käynnistää laitoksen sisäisten tapahtumien takia. Tilanne ei kuitenkaan välttämättä etene vakavaksi päästöksi.

Loviisan ydinvoimalaitoksella mm. suojarakennuksen suuri koko, jäälauhduttimen suuri jäämassa sekä sisä- ja ulkopuoliset ruiskutusjärjestelmät hidastavat olennaisesti ylipaineen kehittymistä. Olkiluodon ydinvoimalaitoksessa ylipaineistuminen estetään lauhdutusaltaan ja siihen liittyvän suodatetun paineenalennusjärjestelmän avulla.

Sosnovyi Borin ja Poljarnyi Zorin (Kuola) ydinvoimaloissa ei ole suurta painetta kestäväää kaasutiivistä suojarakennusta. Näissä laitoksissa tapahtuvaa vakavaa turmaa seuraisi lähes väistämättä suuri päästö. Päästövaara voitaisiin todennäköisesti ennakoida useita tunteja etukäteen. Sosnovyi Borin ja Kuolan laitoksilla on käytössä onnettomuusilmoitusten tekemistä ja tiedonvälitystä muille maille nopeuttavia järjestelmiä (mm. satelliittipuhelinyhteydet). Tämän raportin analyyseissä mukana oleva Ignalinan laitos on nyt jo suljettu.

Suojautumisen valmisteluun käytettävissä olevaan aikaan vaikuttaa tapahtumaketjun lisäksi radioaktiivisen pilven kulkuaika päästöpaikalta kohdealueelle (taulukko 7.1). Ilmatieteen laitoksen arvion mukaan (ks. luku 3) vakavimmat säteilyvaikutukset kaukana päästökohdasta voisivat sattua lähes neutraalissa säätyypissä (Pasquill-luokkien D ja E väli) heikon tuulen vallitessa ( $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ ). Todellisen onnettomuuden sattuessa tuulen nopeus olisi todennäköisesti suurempi ja näin myös paikalliset säteilyvaikutukset

jäisivät vähäisemmiksi radionuklidipitoisuuden voimakkaan laimenemisen takia<sup>a</sup>. Toisaalta vaikutusalue olisi laajempi ja suojautumiseen käytettävissä oleva aika lyhyempi. Esimerkiksi kulkeutumistapauksessa Sosnovyi Bor  $\Rightarrow$  Kotka varoaika lyhenisi 13 tunnista noin neljään tuntiin (kun todennäköinen tuulennopeus esim. 500 metrin leviämiskorkeudella on luokkaa  $9 \text{ m s}^{-1}$ ).

## 7.2 Suojautuminen ja ulkoisen säteilyn annosnopeus

Suomessa on aiemmin ollut käytössä kolme ulkoisen säteilyn valvontaan liittyvää toimenpiderajaa: viranomaisten keskinäinen ilmoitusraja  $0,4 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  (manuaalisissa mittauksissa  $0,7 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ ), säteilyvaroitusraja  $100 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  ja säteilyhälytysraja  $1 \text{ mSv h}^{-1}$ . Nykyisin säteilyvaroitus- ja säteilyhälytysrajatermejä ei juuri käytetä, vaan hälytysrajat perustuvat ns. operatiivisiin toimenpidetasoihin. Nämä sisäasiainministeriön asettamat STUKin asiantuntemukseen perustuvat ulkoisen säteilyn annosnopeusrajat<sup>1</sup> on esitetty taulukossa 7.2. Sisälle on esimerkiksi suojauduttava ja joditabletti nautittava silloin, kun annosnopeus ylittää  $100 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ ; lapsille joditabletin nauttimisen raja on kuitenkin  $10 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  (jodia ja sen merkitystä ydinvoimalaturmassa on käsitelty edellä luvussa 6 ja osin myös kohdassa 5.4). On huomattava, että taulukon toimenpidetasot on tarkoitettu noudatettaviksi tapauksissa, joissa päästön koostumusta ei tunneta. Arvoista voidaan poiketa, mikäli tilanne sitä edellyttää.

Vakavan ydinvoimalaturman alkuvaiheessa saadaan hengityksen kautta todennäköisesti suurempi säteilyannos kuin ulkoisesta säteilystä. Päästön koostumuksesta voi olla aluksi riittämättömät tiedot. Tosin kotimaisen onnettomuuden tapauksessa päästötietoja saadaan laitoksen sisältä varsin nopeasti.

---

<sup>a</sup> Toisaalta yksinkertaisissa säätilanteissa tuulen nopeuden kasvaminen pienentää kulkeutumisen aikana tapahtuvaa laskeumaa ja siten kasvattaa pilveenjäämiskerrointa kohde-etäisyydellä. Lyhyemmän kulkeutumisaikana pilven radionuklidit eivät myöskään ehdi puoliintua yhtä paljon kuin pienemmällä tuulen nopeuksilla. Nämä kumpikin tekijä kompensoivat suuremman tuulen nopeuden aiheuttamaa voimakkaampaa laimentumista jonkin verran.

**Taulukko 7.1.** Päästöpilven kulku-aika päästöpaikkakunnalta kohdepaikkakunnalle tuulen eri nopeuksilla.

Laitos ja kohdepaikkakunta	Etäisyys	Päästöpilven kulku-aika (h) eri tuulen nopeuksilla			
	(km)	3 m s <sup>-1</sup>	5 m s <sup>-1</sup>	7 m s <sup>-1</sup>	10 m s
<b>Olkiluoto</b>					
Rauma	15	1,4	0,8	0,6	0,4
Uusikaupunki	50	4,6	2,8	2,0	1,4
Turku	90	8,3	5,0	3,6	2,5
<b>Loviisa</b>					
Kotka	30	2,8	1,7	1,2	0,8
Kouvola	60	5,6	3,3	2,4	1,7
Helsinki	70	6,5	3,9	2,8	1,9
<b>Sosnovyi Bor</b>					
Kotka	140	13	7,8	5,6	3,9
Lappeenranta	130	12	7,2	5,2	3,6
Mikkeli	220	20	12	8,7	6,1
Lahti	230	21	13	9,1	6,4
Helsinki	220	20	12	8,7	6,1
<b>Forsmark</b>					
Maarianhamina	100	9,3	5,6	4,0	2,8
Rauma	200	19	11	7,9	5,6
Turku	220	20	12	8,7	6,1
Pori	230	21	13	9,1	6,4
Tampere	320	30	18	13	8,9
Helsinki	370	34	21	15	10
<b>Kuola</b>					
Salla	180	17	10	7,1	5,0
Kuusamo	220	20	12	8,7	6,1
Kemijärvi	230	21	13	9,1	6,4
Ivalo	250	23	14	9,9	6,9
Rovaniemi	310	29	17	12	8,6
Kuhmo	390	36	22	15	11
Kajaani	410	38	23	16	11
Oulu	410	38	23	16	11
<b>Ignalina</b>					
Helsinki	540	50	30	21	15

**Taulukko 7.2.** Ohjeelliset operatiiviset toimenpidetasot suojelutoimenpiteille säteilyvaaratilanteessa, jossa säteilyä aiheuttavan radioaktiivisen saasteen koostumusta ei tunneta<sup>1</sup>. [Huom! Suojelutoimenpiteitä käsittelevää ohjeistusta ollaan uusimassa.]

Todellisessa säteilytilanteessa toimenpidetasoja voi olla tarkoituksenmukaista muuttaa sitten kun tilanteen laadusta ja vakavuudesta on saatu riittävästi lisätietoa.

Suojelutoimenpide	Operatiivinen toimenpidetaso ulkoisena annosnopeutena	
Joditablettien nauttiminen	100	$\mu\text{Sv h}^{-1}$ aikuiset, $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ lapset
Evakuointi	100	$\mu\text{Sv h}^{-1}$
Kulkurajoitukset	100	$\mu\text{Sv h}^{-1}$
Suojaväistö	1000	$\mu\text{Sv h}^{-1}$ (laskeuman aiheuttama)
Kotieläintuotannon suojaaminen	1	$\mu\text{Sv h}^{-1}$

Uhattuna olevan alueen sijainti, laajuus ja tilanteen vakavuus voidaan ennustaa laskennallisten mallien avulla, kun tunnetaan vallitseva säätö ja radioaktiivisten aineiden päästö (suuruus, koostumus, kesto, päästökorkeus ja pilven leviämiskorkeus). Uhkatilanteen muuttuessa todelliseksi säteilytilanteeksi saadaan luotettavaa tietoa päästön vakavuudesta ulkoista säteilyä havainnoivilta asemilta.

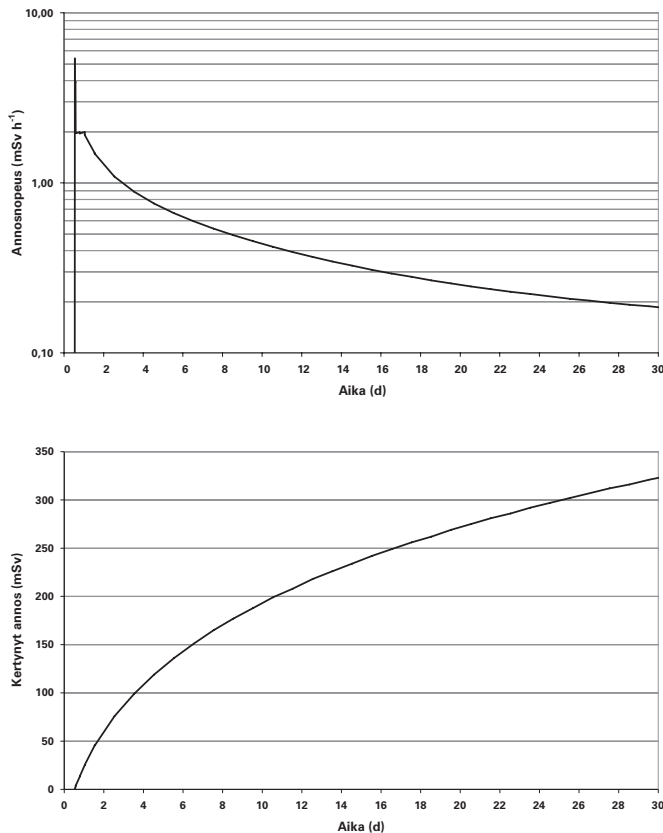
Onnettomuuden alkuvaiheessa ei todennäköisesti tiedetä ympäristössä vallitsevaa jodipitoisuutta eikä aerosolipitoisuutta. Ulkoisen säteilyn mittarit eivät ilmaise hengityksen kautta tapahtuvan sisäisen säteilyn altistuksen suuruutta. Niiden avulla saadaan kuitenkin varoitussignaali ilman sisältämistä radioaktiivisista aineista. Päästön nuklidikoostumuksen havainnointi edellyttää gammaspektrometreja. Ellei näitä ole käytettävissä, ydinvoimalaturman alkuvaiheessa on aina syytä varautua siihen, että ulkoinen säteily on suureksi osaksi peräisin jodin isotoopeista.

Tshernobylin ydinvoimalaturman jälkeen ulkoisen säteilyn annosnopeus oli Suomessa monilla paikkakunnilla yli  $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Suurimmat annosnopeudet mitattiin Uudessakaupungissa ( $3 - 4 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ) ja Ruotsinpyhtäällä (noin  $6 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ) sateiden jälkeen.<sup>2</sup> Radionuklidien aktiivisuuspitoisuus ilmassa mitattiin vain muutamilla paikkakunnilla (mittauskaluston asettamia rajoitusten takia). Nurmijärvellä <sup>131</sup>I-pitoisuus oli suurimmillaan  $220 \text{ Bq m}^{-3}$ . Samaan aikaan Keravalla annosnopeus nousi vain vähän taustatason yläpuolelle (ylitys  $0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ).

Sosnovyi Borissa sattuva Tshernobyl-tyyppinen ydinvoimalaturma voisi pahimmassa mahdollisessa säässä aiheuttaa Suomen etelärannikolla erittäin vakavan säteilytilanteen. Annosnopeus voisi olla yli  $1 \text{ mSv h}^{-1}$  (kuva 7.1).

Jos onnettomuuden seurauksena ilman jodipitoisuus on tai voi olla suuri ( $\gg 1000 \text{ Bq m}^{-3}$ ) ja tilanne näyttää kestävän pitkään, on syytä varautua

ottamaan joditabletti viranomaisten kehotuksesta. Kaikkien radionuklidien yhteensä aiheuttama ulkoisen säteilyn annosnopeus voisi tällöin olla vain  $1 - 10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Annosnopeus voi siis olla pieni laskeuman alkuvaiheessa, vaikka hengitysilman jodipitoisuus on suuri. Kun radioaktiivisia aineita alkaa kertyä maahan, tilanne muuttuu ja annosnopeus suurenee huomattavasti. Aikuisen kilpirauhaselle jodialtistus  $4000 \text{ Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$  aiheuttaa 1 mGy annoksen. Lapsen annos on kolminkertainen.



**Kuva 7.1.** Ulkoisen säteilyn annosnopeus ja ulkona oleskelevälle suojaamattomalle henkilölle kertynyt efektiivinen annos Kotkassa ensimmäisenä kuukautena Sosnovyi Borissa sattuvan hypoteettisen ydinvoimalaturman jälkeen (Tshernobyl-luokan päästö). Päästön alkukorkeus 500 m, kulkeutumisaika 13 h ja kesto 24 h (ks. luku 4, liite V).

Annosnopeus pienenee likimain kymmenenteen osaan ( $1/10$ ) kuukaudessa siitä tasosta, joka vallitsee 1–2 päivää onnettomuuden jälkeen.

Kuten aiemmin todettiin, väestönsuojeluohjeissa hälytysrajat perustuvat edelleenkin vain ulkoisen säteilyn annosnopeuteen. Sisäisen säteilyn aiheuttaman altistuksen huomioon ottavat toimenpiderajat aiheuttaisivat suuria mittausteknisiä ongelmia. Suomessa ei ole valtakunnallisesti kattavaa reaaliaikaista, gammaspektrometriaan perustuvaa nuklidipitoisuuden valvontajärjestelmää. Säteilyturvakeskus on kuitenkin vuonna 2007 kehittänyt  $\text{LaBr}_3$ -ilmaisimeen perustuvan mittausturvakeskuksen, joka on toistaiseksi kustannussyistä käytössä vain tarkoin valituissa kohteissa, kuten Loviisan ja Olkiluodon lähiympäristössä.

### 7.3 Suojautuminen sisälle

Ulkomainen ydinvoimalaturma ei säteilyn takia aiheuta Suomessa välittömiä kuolemantapauksia eikä muitakaan akuutteja terveysvaikutuksia. Suojamaton ihminen voi kuitenkin saada epäsuotuisissa olosuhteissa useiden satojen millisievertien efektiivisen annoksen parin päivän aikana (luku 4). Jos päästöpilven tulon aikana ei sada, suurin osa tästä annoksesta tulee hengityksen kautta elimistöön kulkeutuvista radioaktiivisista aineista.

Sisälle siirtyminen on hyvä ja yksinkertainen tapa suojautua radioaktiiviselta pilveltä. Rakennusmateriaalit vähentävät merkittävästi ulkoisen säteilyn annosnopeutta. Suojaustekijä<sup>b</sup> on 1/3 tyypillisessä omakotitalossa ja 1/40 kerrostalossa (kuva 7.2). Sisätiloissa oleskelusta huolimatta radioaktiivisia aineita saattaa silti kulkeutua elimistöön hengityksen kautta. Tiivis rakennus voi kuitenkin tarjota hyvän suojan sisäistä altistusta vastaan (kuva 7.3).

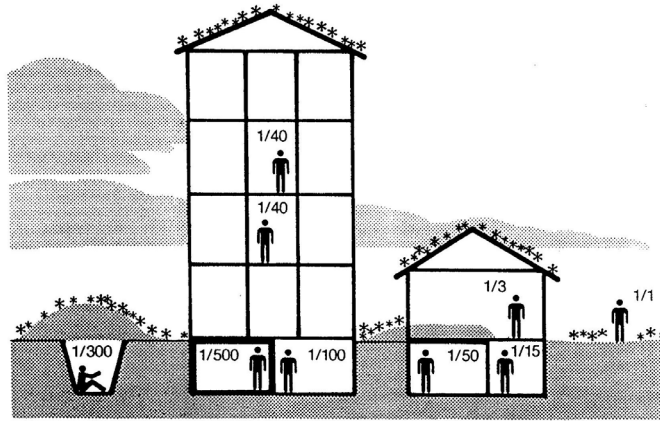
Sade tuo radioaktiivisia aineita alas ylemmistä ilmakerroksista, jolloin maan pinnalle tulevan laskeuman määrä kasvaa. Sateisilla alueilla ulkoisen säteilyn annosnopeus voi olla suuri ja paikallisesti maaperä voi saastua paljon enemmän kuin sateettomilla alueilla. Toisaalta sateen vaikutuksesta ilma puhdistuu nopeasti, ja hengityksen kautta saatava annos voi jäädä vähäiseksi. Sateella ihminen myös useimmiten hakeutuu suojaan sisätiloihin.

#### Radioaktiiviset aineet sisäilmassa

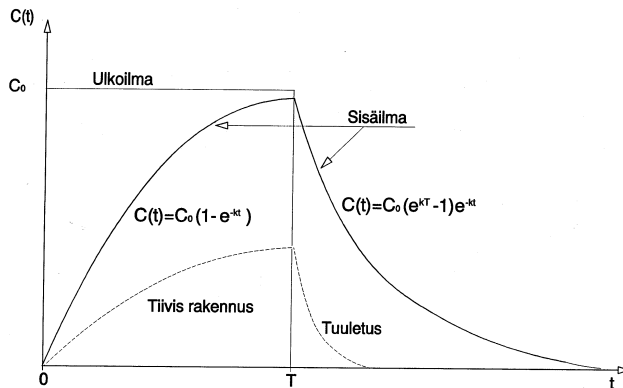
Kaasumaiset radioaktiiviset aineet tunkeutuvat ulkoilmasta rakennukseen muutamia tunteja viivästyneenä. Tiiviissä rakennuksessa ( $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ ) sisäilman aktiivisuuspitoisuus on viidessä tunnissa puolet ulkoilman pitoisuudesta.<sup>3</sup>

<sup>b</sup> Tässä suojauksitekijä tarkoittaa säteilyannosten suhdetta sisällä ja ulkona tai vastaavaa pitoisuus-integraalien suhdetta. Väestönsuojelussa termi ”suojauskerroin” määritellään usein päinvastaisena suhteena.

Hatarammassa rakennuksessa ( $n_{50} = 7 \text{ h}^{-1}$ ) sisäilman pitoisuus on nopeasti sama kuin ulkona (kuva 7.4).



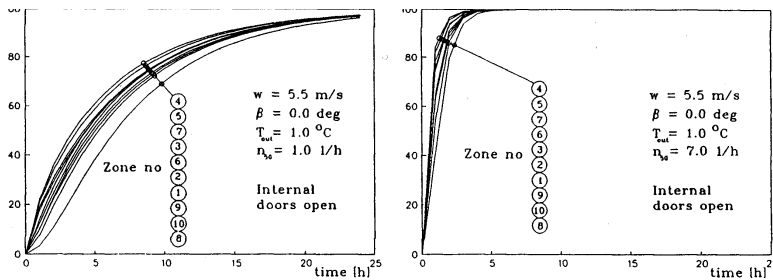
Kuva 7.2. Rakennusten ja rakenteiden suojaustekijöitä ulkoisen säteilyn suhteen.



Kuva 7.3. Pitoisuus sisäilmassa, kun ulkoilmaan tulee hetkellä 0 äkillinen, vakiona pysyvä saastepitoisuus, joka vallitsee hetkeen T saakka.

Sisäilman ja ulkoilman pitoisuusintegraalit ovat periaatteessa samat ( $C_0, T$ ), jos rakennuksen ilmanvaihtoa ei muuteta eikä saastuttavaa materiaa olennaisesti kiinnity erillisille pinnoille (eikä radioaktiivisen aineen puoliintumista sisätiloissa oteta huomioon). Käytännössä yli puolet hiukkasista suodattuu rakennusvaipan vuotokohtien ympärille. Oikea-aikainen tuuletus vähentäisi hengitysansosta merkittävästi.





**Kuva 74.** Esimerkki suhteellisesta pitoisuudesta (%) kaksikerroksisen pientalon sisäilmassa, kun ulkoilmaan tulee hetkellä 0 äkillinen, vakiona pysyvä saastepitoisuus.<sup>3</sup>

Muuttuja  $n_{90}$  on ilmanvaihtokerroin. Kun sisäovet ovat auki, ilman epäpuhtauspitoisuus on lähes samanlainen kaikkialla asunnossa (numerot 1 – 10 viittaavat talon eri osiin).

Ydinvoimalaturman seurauksena radioaktiivisten aineiden määrä ulkoilmassa voi nousta äkillisesti (vrt. kuva 6.1). Jalokaasut ksenon ja krypton sekä jodin kaasumaiset yhdisteet tunkeutuvat sisäilmaan hiukan viivästyneinä. Myös hiukkasiin kiinnittyneitä radioaktiivisia aineita pääsee sisätiloihin rakennusvaipan läpi. Vuotokohtia ovat mm. ovien ja ikkunoiden saumat sekä lattian ja katon putkiläpiviennit.

Radioaktiivisten hiukkasten tunkeutumisesta sisätiloihin ja käyttäytymisestä sisäilmassa on olemassa vain vähän yleispätevää kvantitatiivista tietoa säteilysuojelua varten. Osa pienistä hiukkasista ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ) – ehkä noin puolet<sup>4</sup> – suodattuu rakennemateriaaleihin tai tarttuu erilaisille pinnoille. Suuria hiukkasia ( $> 5 \mu\text{m}$ ) tarttuu rakennusvaipan vuotokohtien seinämille. Lisäksi sedimentaatio poistaa näitä hiukkasia hengitysilmaasta.

Räjähdysmäisessä ydinvoimalaturmassa saattaa muodostua akuuttia säteilyvaaraa aiheuttavia ydinpolttoainehiukkasia, joiden fysikaalinen halkaisija on yli  $40 \mu\text{m}$  ja beeta-aktiivisuus yli  $100 \text{ kBq}$ . Näitä hiukkasia ei kulkeudu ydinvoimalaitoksesta yli  $100 \text{ kilometrin}$  etäisyydelle, vaikka päästöpilvi nousisi useiden kilometrien korkeuteen.

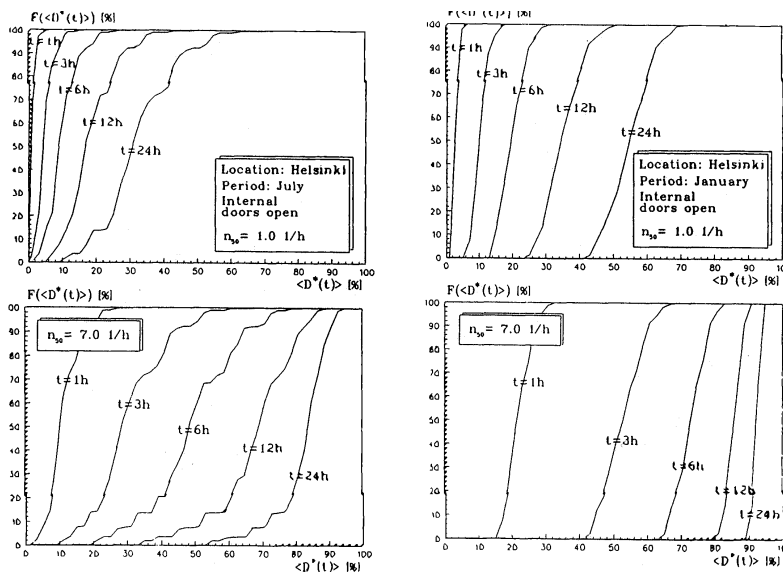
Myöhäislaskeumassa suurimpien hiukkasten aerodynaaminen halkaisija voi olla muutamia kymmeniä mikrometrejä. Ydinpolttoainehiukkasten beeta-aktiivisuus olisi yli  $1000 \text{ Bq}$  (ks. taulukot 4.6 ja 4.7). Niinpä annosnopeus iholla tai hengitysteiden limakalvoilla voisi olla yli  $1 \text{ mGy h}^{-1}$  (kohteena  $1 \text{ cm}^2$  ala). Suuri osa tämän kokoluokan hiukkasista ei kuitenkaan pääse ulkoilmasta tiiviiseen rakennukseen. Yleispätevää kvantitatiivista arviota suodattumisen tehokkuudesta ei ole käytettävissä.

Suojautuminen tiiviiseen rakennukseen vähentää olennaisesti hengityksen

kautta tapahtuvaa altistusta, etenkin jos radioaktiivisia aineita on pintailmassa vain lyhyen aikaa. Näin oli Suomessa sekä Tshernobylin laskeuman aikana (1986) että Sosnovyi Borin päästön aikana (1992). Kummassakin tapauksessa jodipitoisuus laski nopeasti huippuarvostaan kymmenenteen tai peräti sadanteen osaan.

Sisätiloihin suojautumisesta saadaan paras hyöty, kun tiedetään hetki, jolloin ulkoilma on ratkaisevasti puhdistunut. Asuinrakennus on syytä tuulettaa heti päästöpilven ylikulun jälkeen (ks. kuva 7.3). Hyöty on suurimmillaan tiiviissä rakennuksessa. Jos tuuletusta ei tehdä lainkaan tai se myöhästyy useita tunteja, menetetään osa sisälle suojautumisen tuomasta edusta.

Hyvin tiivistetyssä talossa hengityssuojaustekijä kaasumaisille aineille voi olla alle 1/10. Näin hyvään suojaukseen päästään vain lyhytaikaisessa altistuksessa ( $< 12$  h, kuva 7.5). Myös ulkoilman lämpötila, tuulen voimakkuus ja suunta sekä rakennusvaipan vuotokohtat vaikuttavat altistukseen sisällä.



**Kuva 7.5.** Suojaustekijä eli pitoisuusintegraalien suhde sisällä ja ulkona.<sup>3</sup>

Altistusaika on merkitty käyräparametrina. Todennäköisyysjakauman kertymäfunktioon on sisällytetty sään tilastollinen vaihtelu heinäkuussa (kuvat vasemmalla) ja tammikuussa (kuvat oikealla). Käyttöesimerkki: jos tammikuussa Helsinkiin tulisi radioaktiivisia kaasuja sisältävä pilvi 12 tunniksi, niin tiiviissä pientalossa ( $n_{50} = 1,0$  l/h) hengityssuojaustekijä olisi 100 prosenttisella varmuudella parempi kuin 50 %.

## 7.4 Suojautumisen annosvaikutukset

Seuraavat yksinkertaiset väestönsuojelutoimet voisivat vähentää olennaisesti altistumista säteilylle:

1. Ota joditabletti saatuasi siihen kehotuksen viranomaisilta.
2. Suojaudu sisätiloihin. Katkaise koneellinen ilmastointi. Noudata ohjeita, joita viranomaiset antavat radion kautta.
3. Tiivistä rakennusvaipan vuotokohdat, jos siihen on aikaa ja välineitä.
4. Vältä oleskelua huoneessa, joka on vasten tuulta eli päästöpilven tulo-suunnassa. Sulje sisäövet.
5. Asetu kaksikerroksisessa talossa yläkertaan, jos ulkona on kylmempää kuin sisällä (rakennus imee ulkoilmaa alhaalta).
6. Tuuleta ja puhdista huoneet radioaktiivisen pilven ylikulun jälkeen viranomaisilta saatavien ohjeiden mukaan.

Kohdat 4 ja 5 voivat olla sekundaarisia ohjeita, mutta säteilysuojelun ALARA-periaatteen mukaisesti näitäkään suojelutoimia ei tulisi väheksyä. Sisäövien sulkeminen pienentää pitoisuutta osassa taloa, mutta samalla altistus suurenee toisaalla. Sijoittumalla optimaalisesti voidaan ehkä vähentää hengityksen kautta tulevaa altistusta puoleen siitä tasosta, joka vallitsee talossa keskimäärin.<sup>3</sup> Käytännössä lienee mahdotonta valita asunnosta tila, jossa altistus olisi vähäisin, mutta joka tapauksessa lienee mahdollista välttää oleskelua huoneessa, jossa altistus olisi suurin.

Lämpötilan laskeminen sisällä ei olennaisesti vähennä kokonaisaltistusta. Ainoastaan kovien pakkasien aikana lämmityksen katkaisemisella voisi olla vähäinen suojaava merkitys.

Kilpirauhasen annosta voidaan pienentää kahdessadasosaan (1/200) ottamalla joditabletti ja suojautumalla hyvin tiivistettyyn rakennukseen. Efektiivinen annos vähenisi parhaimmillaan enemmän kuin kertoimella 1/20. Suojautumisen annosvaikutukset on koottu taulukoihin 7.3 ja 7.4.

**Taulukko 7.3.** Kilpirauhasannokset trajektorilla ilman suojausta ja erilaisilla suojausoletuksilla. Luvut on pyöristetty kahteen merkitsevään numeroon.

Onnettomuusskenaariot on selitetty luvuissa 2–4.

Laitos ⇒ kohde Nousukorkeus (m)	Ilman suojausta	Suojautuminen sisälle	
		Suojaustekijä 0,3 Ei joditablettia	Suojaustekijä 0,1 Joditabletti, lisä- suojaustekijä 0,05
	Annos (mGy)	Annos (mGy)	Annos (mGy)
Loviisa ⇒ Helsinki			
100	2300	690	11
500	950	280	4,8
Olkiluoto ⇒ Turku			
100	3600	1100	18
500	1500	450	7,5
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki			
100	3000	910	15
500	1400	410	6,8
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka			
100	4700	1400	24
500	2000	610	10
Ignalina ⇒ Helsinki			
500	570	170	2,9
Kuola ⇒ Oulu			
500	110	33	0,55
Forsmark ⇒ Turku			
100	2100	620	10
500	920	280	4,6

**Taulukko 7.4.** Kahden vuorokauden efektiiviset kokonaisannokset<sup>a</sup> trajektorilla ilman suojausta ja erilaisilla suojausoletuksilla. Luvut on pyöristetty kahteen merkitsevään numeroon.

Onnettomuusskenaariot on selitetty luvuissa 2 – 4.

Laitos ⇒ kohde Nousukorkeus (m)	Ilman suojausta	Suojautuminen			
		Ulkoisen suojaustekijä 0,3 Hengityssuojaustekijä 0,3 Ei joditablettia		Ulkoisen suojaustekijä 0,025 Hengityssuojaustekijä 0,1 Joditabletti (lisäsuojaus jodille 0,05)	
		Annos ( $D$ ) (mSv)	Annos ( $D_a$ ) (mSv)	Suhde $D_a/D$ (%)	Annos ( $D_a$ ) (mSv)
Loviisa ⇒ Helsinki					
100	530	160	30	29	5,5
500	220	66	30	12	5,5
Olkiluoto ⇒ Turku					
100	580	170	30	30	5,1
500	240	72	30	13	5,1
Sosnovyi Bor ⇒ Helsinki					
100	350	110	30	13	3,7
500	160	47	30	5,8	3,7
Sosnovyi Bor ⇒ Kotka					
100	550	170	30	20	3,6
500	240	72	30	8,6	3,6
Ignalina ⇒ Helsinki					
500	66	20	30	2,5	3,8
Kuola ⇒ Oulu					
500	27	8,1	30	1,6	5,9
Forsmark ⇒ Turku					
100	340	100	30	18	5,4
500	150	45	30	8,2	5,4

<sup>a</sup> Ulkoisen säteilyn annosten ja hengitysansoksen yhteenlasku on mielekäs ainoastaan säteilyn stokastisten vaikutusten kannalta.

## 7.5 Pitkäaikaisvaikutukset

### Saastuneen alueen laajuus

Tässä tutkimuksessa ei ollut mahdollista suoraan arvioida saastuneen alueen laajuutta. Tuloksista ilmenee kuitenkin (ks. taulukko 4.5), että ulkomaisen onnettomuuden aiheuttama päästöpilvi leviää useita kymmeniä kilometrejä trajektoria vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Tshernobylin onnettomuuden yhteydessä eräänä uudelleenasuttamiskriteerinä pidettiin  $^{137}\text{Cs}$ -laskeumaa  $1,5 \text{ MBq m}^{-2}$ . Tällainen laskeuma aiheuttaa maaseudulla asuvalle ihmiselle 130 mSv ulkoisen säteilyn annoksen 50 vuodessa. Kaupungissa annos on alle 20 mSv.

Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama  $^{137}\text{Cs}$ -laskeuma oli yli  $1,5 \text{ MBq m}^{-2}$  alueella, jonka pinta-ala on  $2000 \text{ km}^2$ . Kuvassa 7.6 on hahmoteltu tällä tavoin saastuneen alueen laajuus epäsuotuisissa sääolosuhteissa, jos Sosnovyi Borissa sattuisi Tshernobyl-onnettomuutta vastaava päästö. Tässä valitussa onnettomuusskenaariossa oletettiin, että päästöpilvi nousisi vain 500 metrin korkeuteen, kun taas Tshernobylin ydinvoimalaturmassa osa radioaktiivisista aineista nousi kahden kilometrin korkeudelle ja kulkeutui sitten laajalle alueelle, jopa tuhansien kilometrien päähän. Havaitaan, että päästökorkeutta ja leviämistä koskevien olettamusten vuoksi laskettu alue on laajuudeltaan kymmenkertainen verrattuna todelliseen laskeumaan Ukrainassa, Valkovenäjällä ja Venäjällä.

### Juomavesi ja elintarvikkeet

Ydinvoimalaturman seurauksena juomavesi ei saastu käyttökelvottomaksi, lukuun ottamatta pintavettä käyttäviä pieniä alueita lähellä päästöpaikkaa. Ulkoinen säteily, hengityksen kautta elimistöön kulkeutuvat radioaktiiviset aineet ja saastuneet elintarvikkeet ovat suurin riski tai haitta terveydelle.

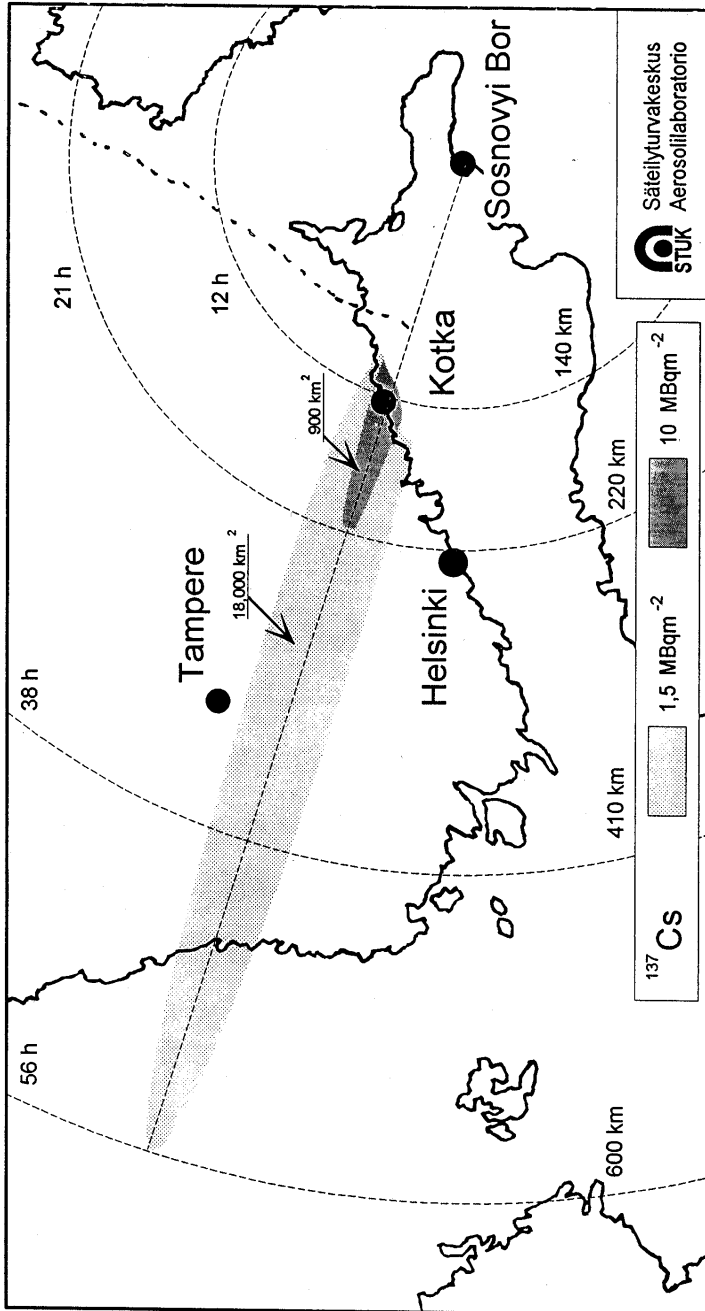
Elintarvikkeiden säilyttäminen jääkaapissa tai tiiviissä pakkauksessa on riittävä varotoimi tilanteen alkuvaiheessa. Myöhemmin elintarvikkeet voivat sisältää sellaisia määriä radioaktiivisia aineita, että niiden käytölle joudutaan asettamaan rajoituksia. Ensimmäisten vuorokausien aikana elintarvikkeiden kautta saatava säteilyannos on vähäinen, kunhan huolehditaan siitä, että jodin saastuttamaa maitoa ei pääse kulutukseen.

### Terveysvaikutukset

Ydinvoimalaturman seurauksena välittömiä terveyshaittoja voi esiintyä vain voimalaitoksen lähiympäristössä. Ulkomailla sattuva onnettomuus ei aiheuta Suomessa kuoleman vaaraa missään olosuhteissa.

Laskeuman alkuvaiheessa altistuminen radioaktiiviselle jodille on merkit-

tävin uhka terveydelle. Erityisesti pienten lasten tapauksessa kilpirauhasen saama annos voi olla hyvin suuri, jopa 1–10 Gy. Ottamalla oikeaan aikaan joditabletti ja suojautumalla sisätiloihin voidaan vähentää odotettavien syöpätapausten määrää sadanteen osaan siitä määrästä, joka muutoin kehittyisi ilman vastatoimia.



**Kuva 7.6.** Esimerkki laskeumasta, jos Sosnovyi Borissa sattuu hyvin vakava onnettomuus ja säätä on Suomen kannalta epäsuotuisa.

<sup>137</sup>Cs-laskeuma voisi olla yli 1,5 MBq m<sup>-2</sup> alueella, jonka pinta-ala on 18000 km<sup>2</sup>. Erittäin pahoin voisi saastua 900 km<sup>2</sup> (> 10 MBq m<sup>-2</sup>). Oletukset: leviämiskorkeus 500 m, tuulen nopeus 3 m s<sup>-1</sup>, depositionsnopeus 1 cm s<sup>-1</sup>, ei poistumaa pilvestä ennen Kotkaa. Onnettomuuskenaario on selitetty luvuissa 2–4



## Viiteluettelo

1. Säteilysuojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa. Ohje VAL 1.1. Säteilyturvakeskus; Helsinki 2001. Ohjetta ollaan uusimassa.
2. Arvela H, Blomqvist L, Lemmelä H, Savolainen AL, Sarkkula S. Environmental gamma radiation measurements in Finland and the influence of meteorological conditions after the Chernobyl accident in 1986. Supplement 10 to Annual Report STUK-A65. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety; Helsinki 1987.
3. Siren K. A computational approach to the penetration of gaseous pollutants into buildings, Part I: Single family house. Helsingin Teknillinen Korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Energiatekniikan laitoksen julkaisu 45; Helsinki 1992.
4. Roed J, Goddard A J H. Ingress of radioactive material into dwellings. Proceedings of the Seminar on the Methods and Codes for Assessing the Off-site Consequences of Nuclear Accidents. EUR 13013/1 EN, Vol. 1, s 433–450. Commission of the European Communities; 1990.



## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

H. Toivonen, J. Lahtinen, R. Pöllänen

## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä raportissa on esitetty STUKin laatima Suomen ja lähialueen ydinvoimalaitoksien vakavien onnettomuuksien seurauksia (Suomen) eräissä kaupungeissa käsittelevä selvitys ja sen tulokset. Todennäköisyyspohjaisia tarkasteluja ei tehty, vaan onnettomuuspäästöt on analyseissa oletettu hyvin suuriksi (Tshernobyl-turman suuruusluokkaa oleviksi) ja säätötila epäsuotuisaksi. Näin ollen saatujen tulosten voidaan käytännössä katsoa edustavan lähes pahimpia kuviteltavissa olevia seurauksia.

Selvityksen perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset ja suositukset:

1. Radioaktiivinen jodi aiheuttaa kaikissa tarkastelluissa tapauksissa suurimman säteilyvaaran onnettomuuden alkuvaiheessa kahden vuorokauden aikana.
2. Kahden vuorokauden efektiiviset kokonaisannokset suojaamattomalle ihmiselle ovat satoja millisievertejä lukuun ottamatta Ignalina  $\Rightarrow$  Helsinki ja Kuola  $\Rightarrow$  Oulu -kulkeutumistapauksia. Hengityksen kautta saatava sisäisen säteilyn annos on huomattavasti suurempi kuin ulkoisen säteilyn aiheuttama annos.
3. Sisälle suojautuminen ja joditabletin ottaminen ovat keskeisiä vastatoimia äkillisen säteilyvaaran uhatessa. Hälytys ja suojaustoimet on hoidettava siten, että radioaktiivinen pilvi ei tavoita ihmisiä ulkosalla. Joditablettien saatavuudesta on huolehdittava etukäteen.
4. Ulkomainen ydinvoimalaturma ei aiheuta Suomessa missään olosuhteissa akuuttia säteilytautiä. Kaukolaskeumassa ei liioin ole sellaisia ydinpolttoainehiukkasia, jotka voisivat aiheuttaa iholla tai hengitysteissä palovammaa muistuttavia vaurioita. Suojautumalla ajoissa oikein voidaan kuitenkin välttää merkittävä osa säteilyn myöhäisvaikutuksista terveydelle (yli 90 %).
5. Suomessa ei toistaiseksi ole laajaa valtakunnallista ilman sisältämien radioaktiivisten aineiden pitoisuuden valvontaverkkoa, jonka avulla saataisiin selville jodipitoisuus pintailmassa reaaliaikaisesti (ydinvoimaloiden ympäristössä tällainen verkko kuitenkin on). Niinpä äkillisen laskeumatilanteen alkuvaiheessa tilanteen vakavuus selvitetään lähinnä ulkoisen säteilyn valvontaverkon ja leviämisenustejien avulla. Suojautumistoimiin ryhdytään, jos on ilmeistä, että päästöpilvessä on jodia ja mitattu annosnopeus on yli  $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ .
6. Ulkomaisessa onnettomuustapauksessa mahdolliset väestönsiirrot tehdään radioaktiivisen pilven ylikulun jälkeen. Tarvittaessa viranomaiset määrittelevät evakuointikriteerit tapauskohtaisesti; kriteerinä

voi olla tietty annosnopeus (esim. 10 mSv/24 h tai 0,5 mSv h<sup>-1</sup>), tietty annos kuukaudessa (esim. 30 mSv), tietty elinikäisannos (esim. 350 mSv tai 1 Sv) tai tietty laskeuma (esim. 1,5 MBq m<sup>-2</sup> tai 10 MBq m<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs).

7. Tehokas lyhytaikainen suojaus (joditabletin ottaminen, siirtyminen hyvään väestönsuojaan tai evakuointi ennen radioaktiivisen pilven tuloa) voi olla tarpeen kotimaisen ydinvoimalaturman varalta niillä alueilla, jotka sijaitsevat alle 20 kilometrin päässä voimalasta.
8. Sisälle suojaus ja joditabletin ottaminen ovat riittäviä suojaus-toimia ulkomaisessa ydinvoimalaturmassa ja kotimaisessa ydinvoimalaturmassa niillä alueilla, jotka ovat yli 20 kilometrin etäisyydellä ydinvoimalasta. Hyvää väestönsuojaa kannattaa kuitenkin käyttää, edellyttäen että suoja saadaan toimintavalmiuteen riittävän nopeasti. Pilven ylikulku kestäisi todennäköisesti enintään yhden vuorokauden. Niinpä suuria juoma- tai elintarvikevarastoja ei tarvita.
9. Ulkomailla sattuva ydinvoimalaturma ei vaaranna Suomen vesihuoltoa. Sen sijaan elintarviketuotanto voi vaarantua tuhansien neliökilometriä alueella.
10. Etukäteen on syytä valmistaa ydinvoimalaturmaa koskevaa erilaista tiedotusmateriaalia, joka on nopeasti käytettävissä tilanteen aikana.

---

## STUK-A-sarjan julkaisuja

**STUK-A249** Salomaa S, Sulonen N (Eds.). Research activities of STUK 2005–2010. Helsinki 2011.

**STUK-A248** Salomaa S, Sulonen N (Eds.). Research projects of STUK 2009–2011. Helsinki 2011.

**STUK-A247** Larjavaara S. Occurrence studies of intracranial tumours. Helsinki 2011.

**STUK-A246** Lahkola A. Mobile phone use and risk of brain tumours. Helsinki 2010.

**STUK-A245** Valmari T, Mäkeläinen I, Reisbacka H, Arvela H. Suomen radonkartasto 2010 – Radonatlas över Finland 2010 – Radon Atlas of Finland 2010. Helsinki 2010.

**STUK-A244** Arvela H, Mäkeläinen I, Holmgren O, Reisbacka H. Radon uudisrakentamisessa - Otantatutkimus 2009. Helsinki 2010.

**STUK-A243** Toivonen T. Microwave dosimetry in biological exposure studies and in practical safety evaluations. Helsinki 2010.

**STUK-A242** Mäkeläinen I, Kinnunen T, Reisbacka H, Valmari T, Arvela H. Radon suomalaisissa asunnoissa – Otantatutkimus 2006. Helsinki 2009.

**STUK-A241** Saxén R, Outola I. Vesistöjen ja juomaveden <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr ja <sup>3</sup>H sekä pitoisuuksien arviointi valmiustilanteessa. Helsinki 2009.

**STUK-A240** Kostianen E, Ylipietä J, Radioaktiivinen cesium Suomen ruokasienissä. Helsinki 2009.

**STUK-A239** Toroi P, Patient exposure monitoring and radiation qualities in two-dimensional digital x-ray imaging. Helsinki 2009.

**STUK-A238** Ilus E, Environmental effects of thermal and radioactive discharges from nuclear power plants in the boreal brackish-water conditions of the northern Baltic Sea. Doctoral thesis. Helsinki 2009.

**STUK-A237** Arvela H, Reisbacka H. Radonsanering av bostäder. Helsinki 2009.

**STUK-A236** Saxén R, Rask M, Ruuhijärvi J, Vuorinen P, Rantavaara A, Koskelainen U. <sup>137</sup>Cs in small forest lakes of Finland after the Chernobyl accident. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2009.

---

**STUK-A-raportit STUKin verkkosivuilla:**

*[http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/fi\\_FI/listaus/?sarja=STUK-A](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/fi_FI/listaus/?sarja=STUK-A)*





Laippatie 4, 00880 Helsinki  
Puh. (09) 759 881, fax (09) 759 88 500  
[www.stuk.fi](http://www.stuk.fi)

ISBN 978-952-478-312-5 (PDF)  
ISSN 0781-1705  
Edita Prima Oy, Helsinki 2011