

Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuus säteilyfysiikan näkökulmasta

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
Ville Huoponen
Tarkastaja:
Prof. Edwin Kukk

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Huoponen, Ville Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuus säteilyfysiikan näkökulmasta

LuK-tutkielma, 27 s., 3 liites.

Fysiikka

Tammikuu 2026

Vuonna 1986 Tšernobylin ydinvoimalassa tapahtui historiamme vakavin ydinvoimalaonnettomuus. Tutkielman alussa tutustutaan yleisellä tasolla ydinvoimaloissa syntyvään säteilyyn ja sen alkuperään, dosimetrisiin suureisiin sekä säteilyannosten ja -kenttien mittaamiseen.

Erityisesti suomenkielisestä kirjallisuudesta on haastavaa löytää onnettomuuteen liittyvää tietoa säteilyfysiikan kannalta olennaisista asioista. Siksi tutkielmassa syvennytään onnettomuuspaikalla vallinneisiin annosnopeustasoihin, reaktorista levinneisiin radioaktiivisiin päästöihin sekä onnettomuudesta työntekijöille ja lähialueiden väestölle aiheutuneisiin säteilyannoksiin. Annosnopeuksille ja säteilyannoksille arvioidaan lisäksi nyky-yksiköiden mukaisia lukuarvoja.

Usein kirjallisuudessa mainitaan, että onnettomuudessa 134 työntekijää sairastui akuuttiin säteilysairauteen ja 28 heistä menehtyi. Tutkielman lopuksi tutustutaankin vielä sairastuneiden oireistoon, käytettyihin hoitomuotoihin ja kuolleisuuteen.

Asiasanat: Tšernobyl, ydinvoimalaonnettomuus, säteily, säteilyannos, annosnopeus, säteilysairaus

Sisällys

Johdanto	1
1 Säteily ydinvoimalaitoksissa	2
1.1 Säteilylajit	2
1.2 Säteily ydinvoimalaitosalueella	3
2 Säteilyannosseurannan perusteita	4
2.1 Dosimetriasuureet	4
2.2 Säteilymittarit	6
2.3 Esimerkkejä säteilyannoksista ja annosnopeuksista	8
3 Tšernobylin onnettomuudessa vapautunut säteily	9
3.1 Onnettomuuspaikan ja lähialueiden annosnopeustasot	9
3.2 Radioaktiivinen päästö ja laskeuma	11
4 Työntekijöille ja lähialueiden väestölle kertyneet säteilyannokset	14
4.1 Tšernobylistä käytetyt annosmittausmenetelmät	14
4.2 Kertyneet säteilyannokset	14
4.2.1 Onnettomuusyön ydinvoimala- ja pelastustyöntekijät	15
4.2.2 Likvidaattorit	16
4.2.3 Lähialueiden väestö	17
5 Altistuneiden oireet ja käytetyt hoitomuodot	19
5.1 Akuutti säteily sairaus (ARS)	19
5.2 ARS-potilaiden säteily sairausoireet ja kuolleisuus	20
5.3 ARS-potilaille käytetyt hoitomuodot	21
5.4 Muiden altistuneiden säteilyn aiheuttamat sairaudet	22
Yhteenveto	23

Johdanto

Huhtikuun 26. päivänä vuonna 1986 Prypjatissa – silloisen Neuvostoliiton ja nykyisen Ukrainan alueella – tapahtui historiamme vakavin ydinvoimalaonnettomuus [1]. Tšernobylin onnettomuus luokiteltiin ydinvoimala- ja säteilyonnettomuuksien INES-vakavuusasteikolla (International Nuclear Event Scale) korkeimpaan luokkaan 7 [2].

Onnettomuus sai alkunsa, kun ydinvoimalan neljännessä yksikössä aloitettiin koe, jonka tarkoituksena oli testata turbiinigeneraattorien kykyä ylläpitää riittävää sähköntuottoa kriittisille turvallisuusjärjestelmille sähkökatkon aikana. Kokeen aikana reaktorin tuottama teho kuitenkin putosi alle sallitun 700 MW:n rajan, mikä teki reaktorista epävakaan. Lopulta lukuisten vakauttamisyritysten jälkeen reaktorin teho nousi arviolta noin neljässä sekunnissa jopa 300 000 MW:iin, minkä seurauksena reaktorissa tapahtui kaksi räjähdystä. Reaktorin päällä ollut noin 1000 tonnia painava kansilevy nousi paikaltaan, ja reaktorirakennuksen katto repeytyi avonaiseksi, päästäen samalla noin 25 % reaktorin sisäisistä osista ulkoilmaan. Räjähdysten sytyttämät tulipalot levittivät radioaktiivista kontaminaatiota laajalle alueelle, aiheuttaen mittavia laskeumia ympäri Eurooppaa. [3]

Säteilyfysiikan ja -turvallisuuden näkökulmasta onkin oleellista selvittää, kuinka laajalle alueelle laskeumat levittäytyivät ja millaisia säteilyannoksia ne aiheuttivat paikallisessa väestössä. Lisäksi on olennaista tarkastella onnettomuuspaikalla vallinneita annosnopeustasoja, pelastus-, raivaus- ja kunnostustyöntekijöille kertyneitä säteilyannoksia sekä altistuneille aiheutuneita terveydellisiä haittoja.

Suomenkielisissä lähteissä kerrotaan usein Tšernobylin laitosalueella onnettomuusaikaan työskennelleiden henkilöiden lukumääristä sekä siitä, kuinka suuri osa heistä sairastui akuuttiin säteilynsairauteen (engl. Acute Radiation Syndrome, ARS). Kirjallisuudesta on kuitenkin haastavaa löytää tarkkoja tietoja säteilyannoksista, annosnopeuksista tai altistuneilla ilmenneistä säteilynsairausoireista. Erityisesti annosnopeustiedot ovat usein esitetty vanhentuneissa yksiköissä. Siksi tässä tutkiel-

massa tarkastellaan juuri onnettomuuteen liittyvää säteilyfysiikkaa sekä muunnetaan eri raporteista ja lähteistä löytyviä dosimetrisiä tietoja nyky-yksiköihin.

1 Säteily ydinvoimalaitoksissa

1.1 Säteilylajit

Nykyaikaisissa ydinvoimaloissa käytetään usein uraanin isotooppia ^{235}U reaktoreiden ydinpolttoaineena. Uraani halkeaa spontaanilla fissiolla tai muissa fissioreaktioissa syntyneiden neutronien vaikutuksesta. Kukin fissioreaktio taas tuottaa runsaasti energiaa ja lisää neutroneja, minkä johdosta reaktorisydämessä syntyy ketjureaktio. Uraani-235:n hajotessa syntyy myös muita radioaktiivisia hajoamistuotteita, joista ehkä tunnetuimpia ovat cesiumin isotooppi ^{137}Cs ja jodin ^{131}I . Eri radioaktiivisilla isotoopeilla taas puoliintumisajat, eli ajat, joissa isotooppien aktiivisuudet ovat puolittuneet, vaihtelevat sekunneista vuosituhansiin. Esimerkiksi juuri jodi-131:n puoliintumisaika on noin kahdeksan päivää, cesium-137-isotoopin 30 vuotta ja uraani-235:n 700 miljoonaa vuotta. [4]

Tiedetään, että uraani-235 on alfa- ja cesium-137 beetasäteilijöitä [4]. Toisin sanoen uraanin halkeamisreaktiossa syntyy neutronien lisäksi myös alfahiukkasia (^4He -ydin) ja vastaavasti cesiumin halkeamisessa beetahiukkasia (elektroni e^- tai positroni e^+). Mikäli alfa- tai beetahajoamisessa syntyvä tytärystä jättä jää virittyneeksi, syntyy usein tämän purkautuessa myös sähkömagneettista gammasäteilyä (γ) [4].

Niinpä ydinvoimaloissa esiintyy alfa-, beeta- ja gammasäteilyä sekä jonkin verran neutronisäteilyä. Vaikka väliaineessa hiukassäteily eteneekin melko lyhyitä matkoja [5], ei se kuitenkaan rajoitu vain reaktorin sisäpuolelle. Työskennellessäni ydinvoimalan säteilyvalvonnassa huomasin, että esimerkiksi beetasäteilijöitä löytyy muistakin järjestelmistä, kuten lämmönvaihtimista, pumpuista sekä säiliöistä.

1.2 Säteily ydinvoimalaitosalueella

Kuten aiemmin todettiin, reaktorin fissioreaktiot tuottavat neutronisäteilyä sekä monenlaisia alfa-, beeta- ja gammasäteilijöitä. Järjestelmärakenteiden, kuten pumpujen ja venttiilien, metalliseosten epäpuhtautena löytyvä kobolttin isotooppi ^{59}Co muuttuu neutronisäteilyn vaikutuksesta ^{60}Co -isotoopiksi ydinreaktioyhtälön



mukaisesti, missä n on neutroni ja γ gammakvantti. Yhtälöstä nähdään, että reaktiossa koboltti-59 kaappaa neutronin, ja tästä syntyy koboltti-60 sekä gammakvantti. Korroosion myötä koboltti päätyy ensin rakenteista ydinpolttoaineen jäähdytteenä toimivaan veteen sekä sen mukana reaktoriin, jossa se aktivoituu yllä mainitulla tavalla. Jäähdytteen mukana aktivointituote koboltti-60 päätyy eri järjestelmiin ympäri laitosta. [6]

Koboltti-60 on beetasäteilijä, joka synnyttää hajotessaan kaksi suurenergistä gammakvanttia (1,17 MeV ja 1,33 MeV), ja sen puoliintumisaika on 5,27 vuotta. Korkeaenergisten gammakvanttien sekä pitkän puoliintumisaikansa vuoksi koboltti-60 onkin yksi eniten ydinvoimalaitosten työntekijöille säteilyannosta kerryttävistä isotoopeista. [7]

Jäähdytysjärjestelmien rakennusaineena käytettävä nikkeli voi muuttua myös radioaktiiviseksi koboltti-58:ksi neutronisäteilystä yhtälön



mukaisesti, missä p on protoni. Koboltti-58:n puoliintumisaika on 70,88 päivää, ja se emittoi hajotessaan gammakvantin (0,81 MeV). Koboltti-58 kerryttää myös kohdalaisen paljon työntekijöiden vuosiannoksia. [7]

Järjestelmien pinnoille muodostuva ja korroosiota estävä oksidikerros rapautuu ajan kuluessa jäähdytteeseen, aktivoituu reaktorissa ja kerryttää säteilyannoksia

kerääntyessään eri järjestelmiin [8]. Tällaista epämääräistä, rapautunutta ja aktivoitunutta materiaa kutsutaan yleisnimikkeellä CRUD:ksi (Corrosion-Related Unidentified Deposit) [9]. Määritelmänsä perusteella yllä mainitut kobolttia sisältävät korroosiotuotteet voidaan siis katsoa kuuluvan myös CRUD:iin. Näiden lisäksi polttoainevuodoissa uraani-235:n hajoamistuotteet, kuten aiemmin mainitut ^{137}Cs ja ^{131}I , voivat levitä järjestelmäkiertoon, mikäli esimerkiksi polttoainesauva hajoaa mekaanisesti. Tällöin polttoaine-elementeistä vuotaneet radioaktiiviset isotoopit voivat kasvattaa ydinvoimalan sisäisiä annosnopeuksia sekä siten myös säteilyannoksia.

2 Säteilyannosseurannan perusteita

2.1 Dosimetriasuureet

Säteilyturvallisuuden kannalta keskeisiä fysikaalisia suureita ovat absorboitunut ja efektiivinen annos sekä annosnopeus. Massa-alkioon m absorboitunut annos D määritellään ionisoivan säteilyn massa-alkioon tuoman energian ε ja massa-alkion suhteena. Siis kaavan

$$D = \frac{\varepsilon}{m} \quad (3)$$

mukaisesti. Absorboitunut annos kuvaa siis säteilyn vaikutusta materiaan ja sen yksikkönä on gray [$\text{Gy} = \text{J/kg}$]. Absorboituneen annoksen vanha yksikkö on rad, mikä vastaa noin 0,01 grayta. [10]

Ionisoivan säteilyn vaikutus ei kuitenkaan ole kaikille aineille, kuten eri ihmiskudoksille, sama vaan se riippuu monista säteilybiologisista tekijöistä, kuten säteilylajeista sekä säteilyn kohdekudoksen ominaisuuksista. Ekvivalenttiannos ottaa huomioon absorboituneen annoksen lisäksi säteilylajin, jonka vaikutusta kuvataan säteilyn painotuskertoimilla w_R . Ekvivalenttiannos voidaan laskea kaavalla

$$H = w_R D, \quad (4)$$

missä w_R on säteilyn painotuskerroin ja D absorboitunut annos. Mikäli säteily koostuu useammasta kuin yhdestä painotuskertoimeltaan w_R erilaisesta säteilylajista, saadaan ekvivalenttiannos laskettua kaavalla

$$H = \sum w_R D. \quad (5)$$

Koska painotuskertoimet w_R ovat paljaita lukuja ilman yksikköjä, on ekvivalenttiannoksen yksikkö [J/kg], erityisnimeltään sievert [Sv]. Vanha ekvivalenttiannoksen yksikkö on rem, joka vastaa 0,01 sievertiä. [10]

Kun säteilylajin lisäksi huomioidaan vielä kohdekudoksen ominaisuudet, voidaan ionisoivan säteilyn sattumanvaraista terveydellistä vaikutusta arvioida efektiivisellä annoksella, joka on kaavan

$$E = \sum w_T H = \sum w_T \sum w_R D \quad (6)$$

mukainen, missä w_T ovat elinten tai kudosten painotuskertoimet. Efektiivisen annoksen yksikkö on niin ikään sievert [Sv]. Painotuskertoimet w_T kuvastavat kunkin elimen tai kudoksen osuutta kokonaisuudesta, mikäli ihminen altistuu kokonaisvaltaisesti ja tasaisesti ionisoivalle säteilylle. Niinpä painotuskertoimien w_T summaksi saadaan yksi, kattaen koko kehon. [10]

Säteilykenttiä taas luonnehditaan usein annosnopeudella, joka kertoo kuinka nopeasti efektiivistä annosta kertyy kentässä. Annosnopeus \dot{E} , jonka perusyksikkö on [Sv/s], saadaan jakamalla efektiivisen annoksen muutos dE altistumisajalla dt , yhtälön

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} \quad (7)$$

mukaisesti. Yleisesti annosnopeudelle käytetään perusyksikön sijaan yksikköä [Sv/h]. [10]

2.2 Säteilymittarit

Säteilykenttien arviointiin käytetään annosnopeusmittareita, jotka ilmaisevat annosnopeuden \dot{E} suuruuden usein yksiköissä $\mu\text{Sv/h}$, mSv/h tai Sv/h . Vanhemmat mittarit, joita esimerkiksi Tšernobylissä käytettiin 1980-luvulla, käyttivät perusyksiköinä röntgeniä tunnissa $[\text{R/h}]$ [11]. Röntgen on vanhentunut yksikkö säteilytykselle, jonka avulla voidaan arvioida absorboitunutta annosta [10]. Säteilytys ja absorboitunut annos vastaavat lukuarvoiltaan melko tarkasti toisiaan, mikäli niille käytetään yksikköinä röntgeniä ja radia [10]. Kun huomioidaan radin ja Grayn yhteys sekä gammasäteilyn painotuskerroin $w_R = 1$ [10], saadaan kokokehon gammaaltistuksessa annosnopeudelle approksimaatio $1 \text{ R/h} \approx 0,01 \text{ Sv/h}$.

Useimmat kannettavat annosnopeusmittarit perustuvat geigerputken toimintaan. Geigerputki on kaasutäytteinen säteilyilmaisim, jossa säteily ionisoi täytekaasun atomeja, irronneet elektronit johdetaan vahvalla sähkökentällä anodille, ja ionisaatiot havaitaan lopulta anodivirtana. Koska sähkökenttä geigerputkessa on voimakas, edellä mainitut elektronit ionisoivat törmäyksillään lisää täytekaasun atomeja sekä virittävät molekyyliä [12]. Molekyylit taas emittoivat viritystilojen purkauksessa fotoneja, jotka irroittavat edelleen uusia elektroneja. Geigerputkessa syntyy siis useita elektronivyöryjä, eli niin sanottuja Townsendin vyöryjä (engl. Townsend Avalanche) [12], minkä johdosta ilmaisimen pulssi on aina yhtä voimakas, eikä siksi säteilyn tarkemmista ominaisuuksista saada tietoa. Suuren herkkyytensä vuoksi geigerputket ovat kuitenkin sopivia annosnopeuden mittaamiseksi. Täytekaasuna käytetään usein argonia ja heliumia, jotta vaeltavat elektronit eivät vahingossa kiinnity niiden ulkokuorille. [13]

Työkokemukseni mukaan absorboituneen sekä efektiivisen annoksen mittaamiseen käytetään nykyaikaisissa ydinvoimaloissa muun muassa passiivisia termoloidosimetrejä (TLD) sekä elektronisia DIS-dosimetrejä (Direct Ion Storage). TLD:t tallentavat niihin absorboituneen säteilyn energiaa metastabiileihin energiatiloihin,



(a) Mirion Ultraradiac -annosnopeusmittari.

[14]



(b) Mirion DIS-1 -dosimetri. [15]

Kuva 1: Esimerkkikuvat nykyaikaisista annosnopeusmittarista ja DIS-dosimetristä.

joita voidaan taas purkaa kuumentamalla TLD:tä. Purkautuessa osa energiasta emittoituu valona, jonka intensiteetti voidaan havaita. Ja edelleen intensiteetin perusteella voidaan päätellä TLD:iin absorboituneen annoksen suuruus. Niinpä kertyneitä säteilyannoksia voidaan lukea TLD:stä ainoastaan niille sopivilla lukulaitteilla. Tämän vuoksi TLD:tä kutsutaan passiiviseksi säteilyilmaisimeksi. [13]

DIS-dosimetrit perustuvat taas ionisaatiokammion sekä DIS-muistisolun yhteistoimintaan [16]. Ionisaatiokammion toimintaperiaate vastaa geigerputkea, mutta käyttöjännite ja siten kammiossa vallitseva sähkökenttä on heikompi, eikä edellä mainittuja elektronivyöryjä pääse tapahtumaan. Niinpä ionisaatiokammion anodivirrasta voidaan suoraan määrittää absorboitunut annos. DIS-muistisolu koostuu puolijohdehilasta, joka tallentaa ionisoivan säteilyn synnyttämien ionien muuttamaa sähkövarausta, ja kun tätä verrataan alkuperäiseen varaukseen, saadaan absorboitunut annos laskettua. Verrattuna termoloistedosimetriin, DIS-dosimetrin etuna on sen jatkuvatoimisuus, eli kertynyt säteilyannos voidaan lukea koska tahansa. [13]

Nykyisin paljon ydinvoimaloissa käytetty annosnopeusmittari Mirion Ultraradiac on esitetty kuvassa 1a ja vastaavasti kuvassa 1b on Mirion -yhtiön valmistama DIS-1 -dosimetri.

Taulukko I: Esimerkkisäteilyannoksia. Taulukon tiedot haettu lähteestä [2].

Säteilyannos	Tilanne
0,01 mSv	Hammasröntgenkuvaus
0,1 mSv	Keuhkojen röntgenkuvaus
2 mSv	Ennen vuotta 1986 syntyneelle suomalaiselle Tšernobylin onnettomuudesta kertyvä elinikäisannos
2 mSv	Lentohenkilökunnan kosmisesta säteilystä aiheutuva vuosiannos
5,9 mSv	Suomalaiselle kertyvä keskimääräinen efektiivinen vuosiannos
20 mSv	Säteilytyöntekijän vuosiannosraja
1000 mSv	Annosraja, joka vuorokaudessa saatuna aiheuttaa säteilysairausoireita
6000 mSv	Annosraja, joka vuorokaudessa saatuna aiheuttaa ARS:n ja mahdollisesti kuoleman

2.3 Esimerkkejä säteilyannoksista ja annosnopeuksista

Referenssiarvojen saamiseksi taulukossa I on esitetty eri ekvivalenttiannoksia ja efektiivisiä annoksia, kun taas taulukosta II löytyy esimerkkejä eri annosnopeuksista. Säteilyn terveysvaikutuksia arvioitaessa tulee huomioida, että pitkän aikavälin 1000–6000 mSv:n efektiivinen annos ei aiheuta akuuttia säteilysairautta, mutta voi kasvattaa syöpäriskiä merkittävästi [2].

Taulukko II: Esimerkkiannosnopeuksia. Taulukon tiedot haettu lähteestä [2].

Annosnopeus	Tilanne
0,04 – 0,30 $\mu\text{Sv/h}$	Taustasäteily Suomen alueella
0,2 – 0,4 $\mu\text{Sv/h}$	Hälytysraja, jonka ylittyessä Suomen säteilyvalvontaverkon automaattinen järjestelmä aktivoituu
5 $\mu\text{Sv/h}$	10 km korkeudessa vallitseva annosnopeus
5 $\mu\text{Sv/h}$	Suomen huippuarvo Tšernobylin onnettomuuden aikaan
10 $\mu\text{Sv/h}$	Suositus ulkona olon välttämisestä
30 $\mu\text{Sv/h}$	Maksimitaso 1 m päässä, jonka alittaessa isotooppihoitopotilas pääsee kotiin
100 $\mu\text{Sv/h}$	Väestö käsketään suojautumaan sisätiloihin

3 Tšernobylin onnettomuudessa vapautunut säteily

3.1 Onnettomuuspaikan ja lähialueiden annosnopeustasot

Onnettomuushetkellä reaktorisydämessä neutronien hidastinaineena toimiva grafiitti, polttoaine-elementit ja muut reaktorin rakenteet lensivät palasina satojen metrien päähän ympäri laitosaluetta [11]. Erityisesti grafiitti- ja polttoainepalaset nosivat välittömästi onnettomuuspaikan annosnopeustasot erittäin suuriksi [11]. Ensimittausten mukaan palasten annosnopeuksiksi saatiin 2 000–20 000 R/h (kokokehon gamma-altistukselle $\approx 20\text{--}200$ Sv/h) [11]. Tästä eteenpäin tutkielmassa käytetään kohdassa 2.2 esitellyn approksimaation mukaisia annosnopeusarvoja yksiköissä Sv/h.

Lähteen [11] mukaan onnettomuuspäivinä laitosyksikön alueella yleinen annosnopeus oli 10–15 Sv/h, vaikkakin suojiensa takana ja kauempana säteilytasot olivat merkittävästi alhaisemmat. Räjähdyksessä reaktorirakennuksen paikalle syntyneen

kraaterin annosnopeus mitattiin viereiseltä katolta, ja lukemaksi saatiin 30 000 R/h (≈ 300 Sv/h). Turbiinihallin alakerroksissa, joissa työntekijöiden oli avattava pumpujen venttiilejä manuaalisesti, annosnopeudet vaihtelivat 5–150 Sv/h välillä, kun taas neljännen yksikön päävalvomossa annosnopeuden yleistaso oli 30–50 mSv/h. Reaktorirakennuksen syöttövesihuoneen täyttänyt vesi ja siellä olleet polttoainepalaset säteilivät 50 Sv/h. Elektrolysoimislaitetilasta löytyneen romun annosnopeudet vaihtelivat taas 50–150 Sv/h välillä. Ydinvoimalan lähikaupungissa, Prypjatissa, annosnopeuden yleistaso onnettomuuspäivänä arvioitiin olleen 5–10 mSv/h. [11]

Tutkiessaan kraateria helikopterilla 250–300 metrin korkeudessa tuhoutuneen reaktorin yläpuolella, lentäjät altistuivat voimakkuudeltaan 3 Sv/h annosnopeuskentälle. Ennen kuin hiekkasäkit, joilla tulipalo pyrittiin sammuttamaan, tiputettiin kraaterin pohjalle, 110 metrin korkeudella annosnopeudeksi mitattiin yli 500 R/h (≈ 5 Sv/h). Tiputusten jälkeen samalla korkeudella annosnopeus kohosi 18 Sv/h. [11]

Muutama päivä onnettomuuden jälkeen, 7. toukokuuta, mittauspartio tutki lähialueiden annosnopeuksia tarkemmin. Prypjatista löytyi tuolloin alueita, joissa maaperän ja teiden annosnopeudet olivat 600 mSv/h. Prypjatin ja Tšernobylin ydinvoimalaitoksen yhdistävällä tiellä annosnopeudeksi taas mitattiin 0,7 R/h (≈ 7 mSv/h). Kiovassa annosnopeudet olivat 0,005–0,2 mSv/h. Ydinvoimalan kolmannen yksikön tiloissa annosnopeudet vaihtelivat 20–100 mSv/h, kun taas neljännen yksikön päävalvomossa annosnopeudet olivat 0,1–0,7 Sv/h. Varavalvomossa annosnopeudeksi mitattiin 500 R/h (≈ 5 Sv/h). Ydinvoimalan suurjännitekytkinlaitoksen (engl. unified switching facility) ORU-750:n alueella annosnopeudet olivat 0,001–4 Sv/h, ja läheisellä betonisekoituslaitoksella annosnopeus oli 0,10–0,15 Sv/h. [11]

3.2 Radioaktiivinen päästö ja laskeuma

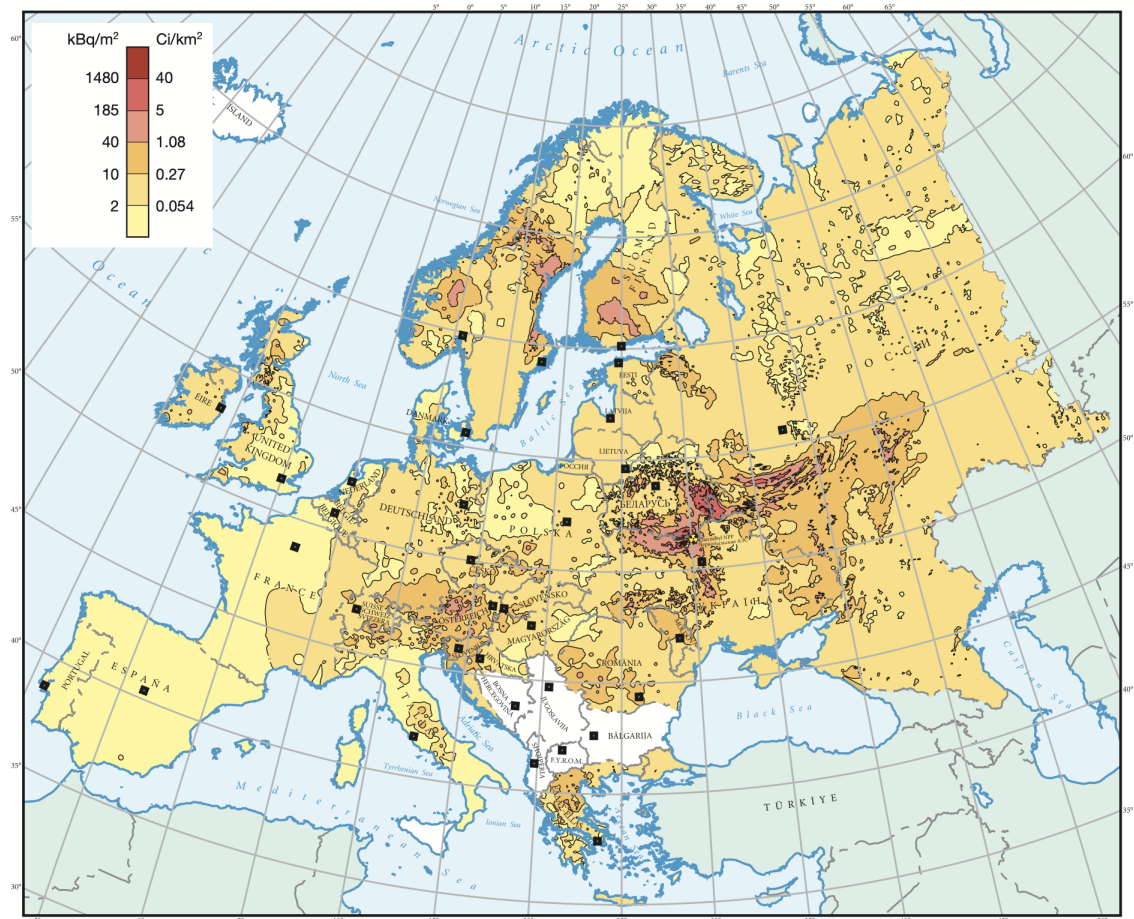
Onnettomuuspaikalla päiviä roihunneet tulipalot vapauttivat ilmakehään suuren määrän radioaktiivisia isotooppeja, jotka kulkeutuivat lopulta eri puolille Eurooppaa [17]. Kuvan 2 taulukossa on lueteltu merkittävimmät onnettomuudessa vapautuneet radioisotoopit, joista huomataan, että aktiivisuudeltaan suurimmat vapautuneet isotoopit olivat ^{133}Xe , ^{132}Te , ^{131}I ja ^{133}I . Kuten kuvan 2 taulukosta nähdään, ne ovat kuitenkin lyhytikäisiä. Isotoopit, joiden puoliintumisaajat ovat suuria, jäävät taas vuosikymmeniksi luontoon ja aiheuttavat näin pidemmän aikaa säteilyaltistumista. Toisaalta lähes jokaisen vapautuneen pitkäikäisen isotoopin aktiivisuus oli suhteellisen pieni. Terveys- ja ympäristövaikutusten kannalta merkittävimmät radioisotoopit olivat ^{137}Cs ja ^{131}I , joiden lisäksi vapautuneista isotoopeista vain ^{133}I sekä ^{135}I kerryttivät yleisesti säteilyannoksia Tšernobylin lähialueilla [17].

Onnettomuusalueen ympäristöön vapautuneet isotoopit, kuten suurin osa ^{90}Sr , ceriumit, plutoniumit, ^{241}Am sekä 75 % 30 km:n suojavyöhykkeen ^{137}Cs -isotoopista, levisivät pieninä (koko $\leq 10 \mu\text{m}$) polttoainepartikkeleina. Kauemmaksi Eurooppaan levinneet isotoopit, kuten ruteniumit, jodit, ^{132}Te , ^{137}Cs ja ^{134}Cs , levisivät höyryaerosoleina ja kaasuseoksina. [17]

Kuvassa 3 on esitettyinä ^{137}Cs -isotoopin laskeumakartta Euroopan alueelle. Laskeumalle käytetään yleisesti pintakontaminaatiolle tuttua yksikköä kBq/m^2 , joka kuvaa neliömetrin alueelta löytynyttä aktiivisuutta. Kuten kuvasta 3 huomataan, nykyisen Venäjän, Valko-Venäjän ja Ukrainan alueilla laskeumat ovat voimakkaimimmat. Näiden lisäksi erityisesti Itävallasta, Norjasta, Ruotsista sekä Suomesta löytyy vahvasti kontaminoituneita alueita.

Radionuclide	Half-life	Activity released (PBq)
Noble gases		
⁸⁵ Kr	10.72 years	33
¹³³ Xe	5.25 days	~ 6500
Volatile elements		
^{129m} Te	33.6 days	240
¹³² Te	3.26 days	~ 1150
¹³¹ I	8.04 days	~ 1760
¹³³ I	20.8 h	~ 2500
¹³⁴ Cs	2.06 years	~ 47
¹³⁶ Cs	13.1 days	36
¹³⁷ Cs	30.0 years	~ 85
Elements with intermediate volatility		
⁸⁹ Sr	50.5 days	~ 115
⁹⁰ Sr	29.12 years	~ 10
¹⁰³ Ru	39.3 days	>168
¹⁰⁶ Ru	368 days	>73
¹⁴⁰ Ba	12.7 days	240
Refractory elements (including fuel particles)		
⁹⁵ Zr	64.0 days	84
⁹⁹ Mo	2.75 days	>72
¹⁴¹ Ce	32.5 days	84
¹⁴⁴ Ce	284 days	~ 50
²³⁹ Np	2.35 days	400
²³⁸ Pu	87.74 years	0.015
²³⁹ Pu	24 065 years	0.013
²⁴⁰ Pu	6537 years	0.018
²⁴¹ Pu	14.4 years	~ 2.6
²⁴² Pu	376 000 years	0.00004
²⁴² Cm	18.1 years	~ 0.4

Kuva 2: Tšernobylin onnettomuudessa vapautuneet radioisotoopit. [17]



Kuva 3: ^{137}Cs -isotoopin laskeuma Euroopan alueelle Tšernobylin onnettomuuden jälkeen. Kuvassa valkoinen väri kuvastaa alueita, joista ei ole saatu dataa. Kuva muokattu lähteestä [18].

4 Työntekijöille ja lähialueiden väestölle kertyneet säteilyannokset

4.1 Tšernobylässä käytetyt annosmittausmenetelmät

Onnettomuusajaksi Tšernobylin ydinvoimalassa säteilyannostietojen keräämistä harjoitti usea toimija, minkä johdosta käytännöt ja menetelmät säteilyannosseurannassa vaihtelivat melko paljon [19]. Osalla ydinvoimalatyöntekijöistä, kuten valvomossa työskennelleillä operaattoreilla, oli mukanaan henkilökohtaiset dosimetrit [11].

Raivaus-, puhdistus- ja kunnostustöiden työntekijöillä, eli niin sanotuilla likvidaatoreilla, annosseuranta oli järjestetty hyvin vaihtelevalla tavalla. Osalla heistä oli henkilökohtainen dosimetri ja osalle työryhmistä jaettiin yksi dosimetri, jonka mukaan ryhmäläisten säteilyannokset arvioitiin. Myös niin sanottua ryhmäarviointimenetelmää (engl. group-commitment method) käytettiin, missä säteilyannokset laskettiin työpaikan annosnopeuden sekä siellä kulutetun työskentelyajan perusteella. Lopulta annokset yleistettiin kaikille, jotka työskentelivät samanlaisissa tehtävissä. Tällaisilla ryhmämenetelmillä lasketut säteilyannokset voivat poiketa paljonkin todellisista, joidenkin arvioiden mukaan jopa kolminkertaisesti. Niinpä kaikille likvidaatoreille ei ole olemassa tarkkoja ja yksilöllisiä annostietoja. [19]

Kyselytutkimuksen, jossa tavoitettiin noin 7 % yksilöllisen annosmerkinnän omaavista likvidaatoreista, mukaan vajaalla 65 %:lla ydinvoimalatyöntekijöistä oli käytössään henkilökohtainen dosimetri. Yli 90 %:lle sotilashenkilöstöön kuuluvalla likvidaatoreille sovellettiin yllä mainittuja ryhmämenetelmiä säteilyannosten arvioimiseen. [19]

4.2 Kertyneet säteilyannokset

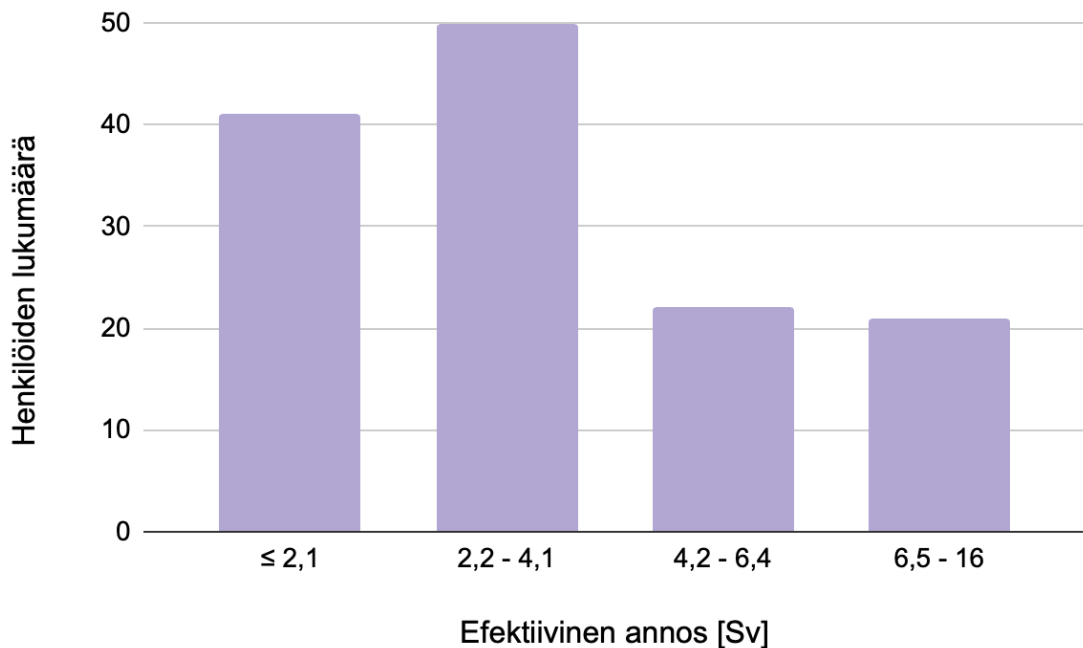
Tarkasteltaessa onnettomuudessa kertyneitä säteilyannoksia voidaan altistuneet jakaa karkeasti kolmeen ryhmään. Ensimmäiseksi ryhmäksi luokitellaan ydinvoimala-

ja pelastustyöntekijät, jotka olivat onnettomuusyönä ja sitä seuranneina päivinä töissä. Näihin kuuluvat esimerkiksi paikalle hälytetyt palomiehet sekä ydinvoimaloiden operaattorit, sähköasentajat ja muut insinöörit. Likvidaattoreiksi luokitellaan taas henkilöt, jotka olivat suorittamassa Tšernobylin ydinvoimalalla muun muassa dekontaminointi-, raivaus- ja kunnostustöitä vuosina 1986–1990 [20]. Tuona aikana 30 km:n suojavyöhykkeellä työskenteli yhteensä 600 000 likvidaattoria [20]. Viimeinen ryhmä koostuu lähialueilla asuneesta väestöstä, johon erityisesti Prypjatin kaupungin asukkaat kuuluivat. Tässä tutkielmassa ei käsitellä muualla Euroopassa ja maailmalla altistuneita väestöryhmiä.

4.2.1 Onnettomuusyön ydinvoimala- ja pelastustyöntekijät

Lähteen [20] mukaan onnettomuudessa eniten säteilylle altistunut noin 600 henkilön joukko koostui ydinvoimala- ja pelastustyöntekijöistä, jotka työskentelivät onnettomuusyönä. Heistä 134:llä todettiin ARS suuren gamma- ja beeta-altistuksen myötä. Sisäisen altistuksen merkittävyys oli heillä suhteellisen pientä, kahta tapausta lukuun ottamatta. Niinpä suurin osa säteilyannoksista kertyi nimenomaan ulkoisesta säteilystä. [20]

Kuvan 4 pylväsdiagrammissa on esitetty ARS-potilaille gammasäteilystä kertyneet efektiiviset annokset. Koska ARS-potilaiden tapauksessa kyseessä oli todennäköisesti suhteellisen tasainen kokokehon gamma-altistus ($w_R = 1$ ja $w_T = 1$), lähteessä [20] raportoidut kokokehoannokset [Gy] voidaan esittää suoraan efektiivisinä annoksina [Sv]. On kuitenkin huomioitava, että ARS-potilaista kahdeksalle arvioitiin lisäksi beetasäteilystä 10–30 Gy:n suuruisia ihoannoksia, joita kuvan 4 pylväsdiagrammi ei kuvaa [20]. Niinpä näiden kahdeksan kohdalla esitetyt efektiiviset annokset aliarvioivat todellista altistusta. Lisäksi 23 luuytimen vajaatoimintaan kuolleen palomiehen kilpirauhasen sisäiseksi annokseksi laskettiin 0,021–4,1 Gy [17]. Jälkikäteen tehtyjen laskelmien mukaan onnettomuusyönä työskennelleistä 87 %:lla



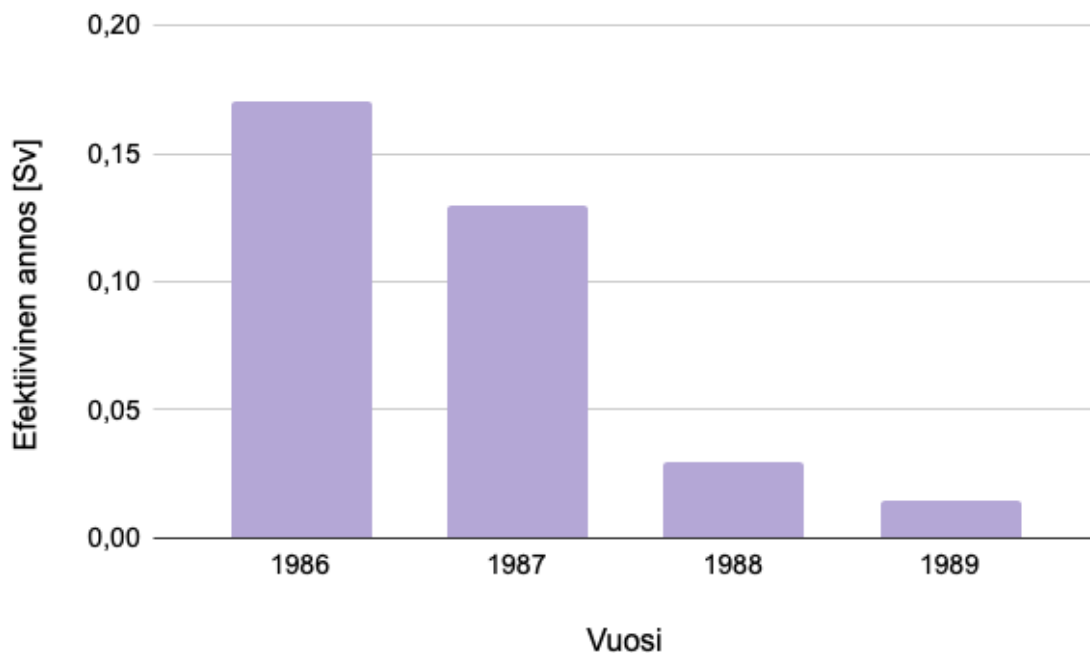
Kuva 4: ARS-potilaiden lukumäärät ja heille gammasäteilystä kertyneet efektiiviset annokset. Data on kerätty lähteestä [20], ja annokset ovat esitetty approksimaatiolina, yksiköissä [Sv].

efektiiviset annokset ylittivät 500 mSv [20].

4.2.2 Likvidaattorit

Kuten kohdassa 4.1 todettiin, likvidaattorien annosmittauksiin sovellettiin useimmiten ryhmämenetelmiä, jolloin yksittäisten henkilöiden saamia tarkkoja efektiivisiä annoksia on vaikea arvioida. On kuitenkin arvioitu, että lopulliset keskimääräiset efektiiviset annokset likvidaattoriryhmillä vaihtelivat 15–170 mSv:n välillä, yksittäisten tapausten ollessa yli 500 mSv [17]. Likvidaattorien, jotka työskentelivät ensimmäisten kuukausien ajan Tšernobylässä, kilpirauhasten sisäisten annosten keskiarvoksi arvioidaan 0,21 Gy, vaihteluvälin ollessa <0,15–3 Gy [17].

Kuvan 5 pylväsdiagrammissa on esitetty likvidaattorien keskimääräiset efektiiviset annokset onnettomuuden ensimmäisinä vuosina. Diagrammista huomataan, että



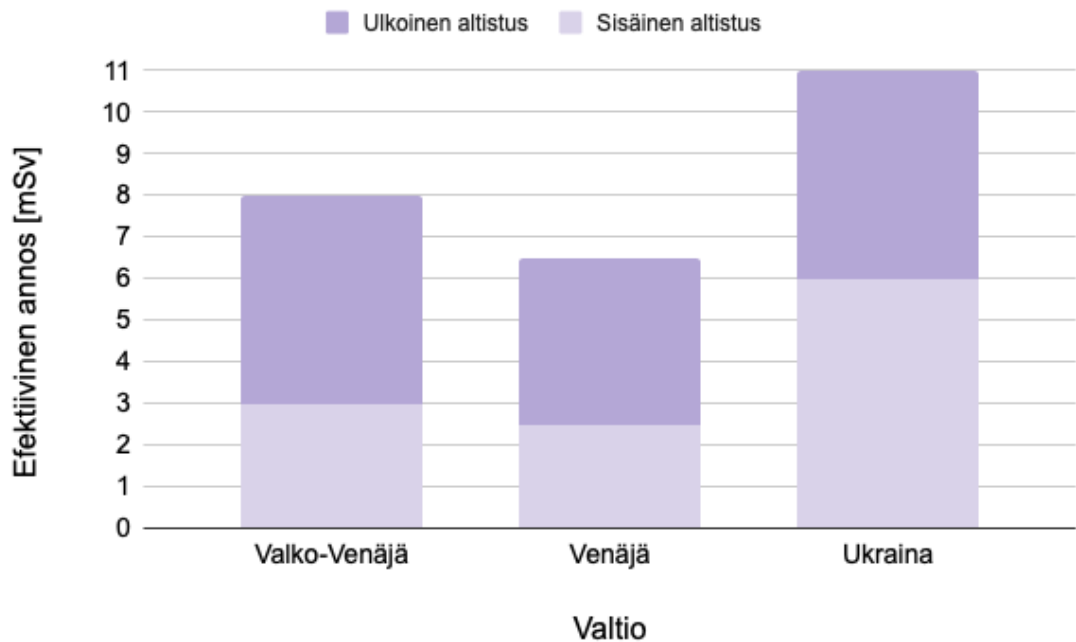
Kuva 5: Likvidaattorien keskimääräiset efektiiviset annokset vuosina 1986–1989. Data kerätty lähteestä [20].

ajan kuluessa annokset pienenevät selvästi. Tämä voinee johtua dekontaminoineista ja lyhytikäisten radioisotooppien häviämisistä. On kuitenkin huomioitava, että kuvassa 5 esitetyt annosarviot sisältävät paljon virhelähteitä ja voivat siten poiketa todellisista merkittävästi.

Sekä ydinvoimala- ja pelastustyöntekijöiden, että likvidaattorien vuosina 1986–1990 saaman efektiivisen annoksen keskiarvoksi arvioidaan 120 mSv. 85 % annoksista oli välillä 20–500 mSv. [21]

4.2.3 Lähialueiden väestö

Suurin osa lähialueiden väestön kilpirauhasannoksista on peräisin jodi-131:n sisäisestä altistuksesta, kun taas cesium-137 on tähän päivään asti ollut muiden elinten merkittävin ulkoisen sekä sisäisen altistuksen aiheuttaja [20]. Tämä johtunee cesium-137:n pitkästä puoliintumisajasta sekä merkittävistä laskeumista, joiden myötä väes-



Kuva 6: Valko-Venäjän, Venäjän ja Ukrainan kontaminoituneilla alueilla asuneiden keskimääräiset efektiiviset annokset (ilman kilpirauhasannoksia) valtioittain. Vaalea väritys kuvaa sisäisestä ja tumma väritys ulkoisesta altistuksesta aiheutunutta efektiivistä annosta. Data kerätty lähteestä [20].

tö on altistunut syömällä ja juomalla kontaminoituneita luonnontuotteita.

27.4.1986 sekä 7.5.1986 Prypjatista sekä Tšernobylin ydinvoimalan lähialueilta evakuoitiin noin 100 000 asukasta [17], joiden kilpirauhasannosten väestöpainotetuksi keskiarvoksi arvioidaan 0,47 Gy [20]. Heidän, jotka evakuoitiin kahden vuorokauden sisällä onnettomuudesta, vastaava keskiarvo on 0,17 Gy, ollen aikuisilla 0,07 Gy ja vauvoilla 2 Gy [20]. Tuhansien mittausten ja kyselyjen perusteella ukrainalaisten evakuoitujen kilpirauhasannosten keskiarvo asettuu lapsilla välille 0,11–3,9 Gy, murrosikäisillä 0,066–0,39 Gy sekä aikuisilla 0,066–0,40 Gy [17]. Valkovenäläisten evakuoitujen vastaavat annokset ovat taas 1,0–4,3 Gy, 1,0 Gy ja 0,68 Gy [17].

Noin 30 000 suojavyöhykkeellä asuneelle henkilölle arvioitiin ulkoisen efektiivisen annoksen vaihteluväliksi 0,1–380 mSv ja keskiarvoksi 17 mSv [17]. Kuvan 6 pylväs-

diagrammista nähdään Valko-Venäjän, Venäjän sekä Ukrainan kontaminoituneilla alueilla asuneiden keskimääräiset efektiiviset annokset, kun kilpirauhasannoksia ei huomioida.

5 Altistuneiden oireet ja käytetyt hoitomuodot

5.1 Akuutti säteily sairaus (ARS)

Akuutti säteily sairaus on hengenvaarallinen tila, jolla on useita eri muotoja, ja jonka eteneminen riippuu voimakkaasti sairastuneen absorboituneesta annoksesta [22]. ARS:ssa on havaittavissa kolme vaihetta: akuuttivaihe, latenttivaihe ja kriittinen vaihe, jotka voivat kuitenkin ilmentyä osittain päällekkäin [22].

Akuuttivaiheessa säteilyn välittömät vaikutukset alkavat esiintyä tuntien kuluessa, mikäli kokokehoannos on riittävän suuri [23]. Yleisimpiin oireisiin kuuluvat muun muassa oksentaminen, päänsärky ja kuumeilu [22]. Myös ruokahaluttomuutta ja yleistä pahoinvointia voidaan havaita alkuoireissa [23]. Kun absorboitunut annos ylittää 6–8 Gy:n, tavataan usein lisäksi voimakasta ripulia ja tajuttomuutta [22]. Beetasäteilystä aiheutuva voimakas ihoaltistus voi taas aiheuttaa vakavia palovammoja [23].

Latenttivaiheessa, joka kestää saadusta annoksesta riippuen 1–35 päivää, akuuttivaiheen oireet tasottuvat, ja altistunut voi tuntea olonsa lähes terveeksi. Keski suurten annosten (4–8 Gy) tapauksissa myös latenttivaiheessa voi esiintyä ripulia ja karvanlähtöä, kun taas suurissa annoksissa (>8 Gy) latenttivaihetta ei välttämättä ilmene lainkaan. [22]

Kriittisessä vaiheessa altistuneen yleiskunto heikkenee ja varsinaiset säteily sairausoireet alkavat, johtuen pääosin luuydin vauriosta. Luuydin vaurion myötä verisolutuotanto romahtaa, mikä johtaa esimerkiksi valkosoluihin kuuluvien granulocyte ja lymfosyyttien vähenemiseen. Tämä johtaa lopulta infektiokerkkyyteen. Myöskin

punasolujen ja verihiutaleiden määrät alenevat merkittävästi, jolloin sairastuneelle kehittyy anemia ja verenhiyytymisongelmia. [23]

Säteilyannoksen ylittäessä kolmen grayn, suolisto vaurioituu, mikä johtaa ripuliin, nestehukkaan sekä infektioihin. Mikäli sairastunut on saanut yli kuuden grayn annoksen, luuydin tuhoutuu lopullisesti. Samoin käy suoliston limakalvolle yli 12 Gy:n tapauksissa. Kun annos ylittää 50 Gy:n, keskushermostolliset oireet, kuten kouristelu, sekavuus sekä väsymys, ilmenevät. [23]

5.2 ARS-potilaiden säteily-sairausoireet ja kuolleisuus

Kohdassa 4.2.1 mainitut 134 ARS-potilasta kuljetettiin onnettomuuden ensimmäisten tuntien aikana Moskovaan säteily-sairauteen erikoistuneelle osastolle. Heistä 15:llä havaittiin suolistovaurioita ja kahdeksalla keuhkotulehdusta. Lisäksi 19 potilaalla esiintyi vakava beeta-altistuksesta aiheutunut ihotulehdus. Beta-altistusta seuranneet palovammat, jotka kattoivat yli 50 % potilaan pinta-alasta, johtivat lopulta suurella todennäköisyydellä kuolemaan. [22]

14–23 päivää onnettomuuden jälkeen 15 potilasta oli kuollut ihovaurioihin tai sisäisiin komplikaatioihin, kun taas kaksi potilasta oli kuollut keuhkotulehdukseen. Alle 1,5 kuukauden jälkeen onnettomuudesta iho- ja keuhkovaurioihin oli menehtynyt vielä kuusi potilasta, kaksi luuydinsiirron jälkeiseen tulehdukseen sekä yksi keuhkokuumeesta muodostuneeseen hypoksemiaan (tila, jossa veren happipitoisuus on alhainen [24]). Noin kolmen kuukauden jälkeen kaksi potilasta menehtyi ihovaurion kautta levinneeseen tulehdukseen, ja 112 päivän jälkeen yksi potilas kuoli aivoverenvuotoon. [22]

Virallisten raporttien perusteella kaikkiaan 134 ARS-potilaasta 28 kuoli säteily-sairauteen lyhyen ajan sisällä onnettomuudesta. Lopulta säteily-sairausoireita tavattiin ainoastaan potilailla, joiden saama annos ylitti yhden grayn. Kuolleista ARS-potilaista 20 sai annoksiksi vähintään 6,5 Gy, seitsemän vähintään 4,2 Gy ja yksi

sai 2,2–4,1 Gy:n annoksen. [22]

Vuonna 2003 tehtyjen tutkimusten mukaan ARS-potilaista 14 menehtyi vielä 1987–2001 välisenä aikana, suurin osa 1990-luvulla. Kuolinsyynä olivat keuhkokuolio, iskeeminen sydänsairaus, myelodysplastinen oireyhtymä, keuhkotuberkuloosi, maksakirroosi, rasvaembolia, sepelvaltimotauti sekä akuutti myelomonoblastinen leukemia. Huomioitavaa on, että säteily sairauden osuutta on vaikea määrittää etenkin myöhäiskuolemista. [22]

Selviytyneillä ARS-potilailla merkittävimmät terveydelliset ongelmat liittyvät ihovaurioihin, kuten arpiin, kovettumiin ja haavaumiin, sekä säteilyn aiheuttamaan harmaakaihiin. Neljällä selviytyneistä on vahvistetusti todettu kiinteä syöpäkasvain. Pitkäaikaisseurannalla on todettu, että selviytyneillä verisolutuotanto on palautunut ennalleen, mutta verisyöpien esiintyvyydessä on havaittu kasvua. Osalla on todettu hermostollisia, suolistollisia sekä sydän- ja verisuonisairauksia, mutta näiden sekä kertyneiden säteilyannosten välille ei ole löydetty selvää korrelaatiota. [21]

5.3 ARS-potilaille käytetyt hoitomuodot

Kuten aiemmissa kohdissa todettiin, moni ARS-potilaista kärsi luuydinvaurioista, minkä vuoksi myös heidän verisolutuotantonsa romahti. Niinpä potilaille, joiden säteilyannos ylitti kaksi grayta, annettiin ulkoisesti punasoluja ja verihitaleita. Verihitalesiirrot osoittautuivatkin erityisen hyödyllisiksi verenvuotojen hallinnassa. [25]

13 potilaalle, joiden absorboitunut annos ylitti kuusi grayta, suoritettiin luuydinsiirto. Heistä seitsemän kuitenkin kuoli alle kuukaudessa ja viisi myöhemmin. Kuudelle, myös yli kuusi grayta saaneille, taas suoritettiin sikiön maksasolujen siirto, sillä sopivia luovuttajia ei löytynyt. Kukin heistä kuitenkin menehtyi alle kuukaudessa. [25]

Arvioidaan, että kolmen potilaan kuolema johtui yksinomaan tarpeettomasta

sekä väärin tehdystä luuydinsiirrosta. Myös ARS-potilailla, joiden annos ylitti yhdeksän grayta, luuydinsiirto jopa heikensi haittavaikutustensa vuoksi muiden annettujen hoitojen tehokkuutta. [22]

Aseptiseen eristykseen taas määrättiin potilaat, joiden saamat annokset ylittivät kaksi grayta. Toisin kuin tyypillisesti eristyspotilailla, tällä kertaa siis mikrobien leviäminen potilaaseen pyrittiin estämään. Eristyksen lisäksi tulehduksia pyrittiin estämään sekä antibiooteilla [22] että sieniä tuhoavilla lääkkeillä. Myös viruslääkkeitä käytettiin potilailla, joilla havaittiin herpesksen aiheuttamia haavoja. [25]

Suolistovauriopotilailla noudatettiin ravitsemusta, jossa kaikki tarvittavat ravintoaineet annettiin suoraan verenkiertoon, kun taas ihovauriopotilaille suoritettiin paikallishoitoja. Potilaiden hoitoon, kuten infektioiden hallintaan ja elintoimintojen vakauttamiseen, liittyy yllä mainittujen lisäksi runsaasti yksityiskohtaisia menetteilyjä, joihin tässä tutkielmassa ei kuitenkaan syvennyttä. [22]

5.4 Muiden altistuneiden säteilyn aiheuttamat sairaudet

Vaikka likvidaattoreilla, joiden annokset eivät virallisten rekisterien mukaan ylittäneet yhtä grayta, ei tavattu deterministisiä säteilysairauksia, on heidän keskuudessaan havaittu paljon työkyvyttömyyttä. Työkyvyttömyyden yleisimmät syyt ovat olleet "hermostollinen väsymys", "vegetatiivinen epätasapaino" sekä paniikkihäiriöt. Likvidaattorien saamista annoksilla ei kuitenkaan ole osoitettu suoraa yhteyttä työkyvyttömyyteen, joten yllä mainitut neuropsykiatriset oireet voivat johtua muista tekijöistä, kuin säteilyaltistumisista. [26]

Tšernobylin saastuneilla lähialueilla eläneillä lapsilla kilpirauhassyöpää on havaittu merkittävästi keskimääräistä enemmän. Valko-Venäjän Gomelin alueella lasten vuosittainen syöpäsiintyvyys oli yli 100 tapausta miljoonaa lasta kohti, kun länsimaissa sama lukema on 0,5–1,0. Vuoteen 1998 mennessä lasten kilpirauhassyöpiä oli diagnosoitu noin 1000 tapausta. Lähteen [21] mukaan vuosina 1991–2005 rapor-

toitiin yhteensä 6848 kilpirauhassyöpää henkilöillä, jotka olivat onnettomuusaikaan alle 18-vuotiaita. Tutkimusten mukaan henkilöillä, jotka olivat vuonna 1986 alle viisivuotiaita, onkin suurin sairastumisriski, kun taas yli 18-vuotiaana altistuneilla ei ole havaittu tilastollista poikkeamaa kilpirauhassyöpätapauksissa. [26]

Likvidaattorien ja lähialueiden väestön keskuudessa on havaittu myös muita terveydellisiä ongelmia, mutta näille ei ole osoitettu suoraa yhteyttä säteilyaltistusten kanssa [21].

Yhteenveto

Ydinvoimaloissa esiintyy lähes jokaista ionisoivan säteilyn lajia, mutta niiden vaikutukset rajoittuvat normaalioloissa vain laitosalueelle, eivätkä ne siten aiheuta merkittäviä säteilyannoksia edes työntekijöille. Säteilykenttien voimakkuutta ja säteilyn kertymistä voidaan kuitenkin tarkkailla erilaisilla annosnopeusmittareilla sekä henkilökohtaisilla dosimetreilla. Näistä saatavan tiedon sekä dosimetristen laskujen avulla voidaan arvioida säteilyn ihmiselle aiheuttavan terveyshaitan todennäköisyyttä.

Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuus oli havainnollistava osoitus siitä, mitä seurauksia turvallisuuskulttuurin laiminlyönnillä sekä keskeneräisillä turvallisuusjärjestelmillä voi olla. Edellä mainittujen turvallisuusperiaatteiden merkitys korostui vuonna 1986, kun tekniset sekä henkilöstölliset virheet johtivat Tšernobylin ydinvoimalan neljännen yksikön reaktorin räjähdykseen. Samalla voimakkaasti radioaktiivisia aineita, kuten ^{137}Cs ja ^{131}I , levisi ulkoilmaan muuttaen voimalan ympäristön elinkelvottomaksi ja aiheuttaen laskeumia nykyisten Ukrainan, Valko-Venäjän, Venäjän sekä Pohjois-Euroopan alueille. Onnettomuuspäivinä voimalalla oli alueita, joiden yleinen annosnopeustaso oli 10–15 Sv/h, kun taas suurin mitattu annosnopeus oli peräti 30 000 R/h, eli 300 Sv/h. Nämä hengenvaarallisen korkeat säteilytasot johtivat virallisten raporttien mukaan 134 akuuttiin säteily sairauteen sekä 28 kuolemaan. Välillisten uhrien määrää on mahdotonta määrittää, mutta erityi-

sesti onnettomuusaikana eläneiden lasten kilpirauhassyöpäriskit ovat merkittävästi kohonneet.

Vaikka onnettomuudesta on tehty monia laadukkaita vertaisarvioituja tutkimuksia, tulee mielestäni julkisten raporttien ilmoittamiin lukemiin suhtautua varauksella. Tšernobylin annosmittausmenetelmissä sekä silminnäkiöiden kertomuksissa on monia virhelähteitä, jotka saattavat vääristää todellisia lukuja. Myös silloisen Neuvostoliiton yritykset peitellä tapahtunutta saattavat vääristää esimerkiksi ilmoitettuja uhrilukuja. Onnettomuuden todelliset vaikutukset saattavatkin selvitä vasta vuosien päästä, kun 1980-luvun lapset vanhenevat ja pitkäaikaisvaikutuksista tehdyt lisätutkimukset tuottavat uutta tietoa aiheesta.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassa on käytetty ChatGPT-tekoälysovellusta (ChatGPT 5.2) tiedonhankintaan, oikeakielisyyden tarkistamiseen sekä lähteiden etsintään.

Viitteet

- [1] Säteilyturvakeskus (STUK) [online, viitattu 16.9.2025]. Saatavilla: <<https://stuk.fi/tsernobylin-ydinvoimalaonnettomuus>>.
- [2] Säteilyturvakeskus (STUK), ”Säteilyvaara ja suojaus”, 2020.
- [3] P. H. Jensen, ”The Chernobyl accident in 1986: Causes and consequences”, General Physics Colloquium (1994).
- [4] Säteilyturvakeskus (STUK) [online, viitattu 16.9.2025]. Saatavilla: <<https://stuk.fi/mita-sateily-on>>.
- [5] J. Sandberg, R. Paltemaa, ”Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet”, teoksessa Säteily ja sen havaitseminen, Säteilyturvakeskus (STUK), s. 11–63, 2002.
- [6] R. Castelli, ”Nuclear Corrosion Modeling: The Nature of CRUD”, Butterworth-Heinemann, 2009.
- [7] M.-S. Yim, H. Ocken, Progress in Nuclear Energy **39**, 1, s. 31–51 (2001) doi:10.1016/S0149-1970(01)00002-6.
- [8] S. Odar, P. Rudling, Advanced Nuclear Technology International **2** (2015).
- [9] Y. Li, S. Ni, S. Li, S. He, C. K. Cheng, K. Dong, J. Zhao, International Journal of Heat and Mass Transfer **250**, 127258, (2025) doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127258.
- [10] O. J. Marttila, ”Suuret ja yksiköt”, teoksessa Säteily ja sen havaitseminen, Säteilyturvakeskus (STUK), s. 65–91, 2002.
- [11] G. Medvedev, Technical Report No. JPRS-UEA-89-034, Springfield, VA: U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, 1989.
- [12] B. Almutairi, T. Akyurek, S. Usman, Nuclear Engineering and Technology **51**, 4, s. 1081–1090 (2019) doi:10.1016/j.net.2019.02.008.
- [13] S. Klemola, ”Säteilyn ilmaisimet”, teoksessa Säteily ja sen havaitseminen, Säteilyturvakeskus (STUK), s. 115–134, 2002.
- [14] Mirion [online, viitattu 1.10.2025]. Saatavilla: <<https://www.laurussystems.com/products/ultraradiac-plus/>>.
- [15] Mirion [online, viitattu 1.10.2025]. Saatavilla: <<https://www.mirion.com/products/technologies/health-physics-radiation-safety-instruments/dosimetry-telemetry-systems/passive-dosimetry-systems/dis-1-direct-ion-storage-dosimeter>>.
- [16] Mirion Technologies (RADOS) Oy [online, viitattu 26.9.2025]. Saatavilla: <https://dosimetry.web.cern.ch/sites/default/files/download/DIS-1_UserManual.pdf>.

- [17] V. Saenko, V. Ivanov, A. Tsyb, T. Bogdanova, M. Tronko, Yu. Demidchik, S. Yamashita, *Clinical Oncology* **23**, 4, s. 234–243 (2011) doi:10.1016/j.clon.2011.01.502.
- [18] K. A. Higley, *Radiation Protection Dosimetry* **121**, 4, s. 476–477 (2006) doi:10.1093/rpd/ncl163.
- [19] V. V. Chumak, E. V. Bakhanova, N. V. Musijachenko, "Dosimetric monitoring at time of Chernobyl clean-up: A retrospective view", esitetty konferenssissa 10th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA-10), Hiroshima, Japan, 2000.
- [20] B. Bennett, A. Bouville, P. Hall, M. Savkin, H. Storm, "Chernobyl accident: Exposures and effects", esitetty konferenssissa 10th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA-10), Hiroshima, Japan, 2000.
- [21] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), "Sources and Effects of Ionizing Radiation" **2**, United Nations, New York, 2011.
- [22] F. A. Jr. Mettler, A. K. Gus'kova, I. Gusev, *Health Physics* **93**, 5, s. 462–469 (2007) doi:10.1097/01.HP.0000278843.27969.74.
- [23] P. Wendla, "Säteilyvammat", teoksessa *Säteilyn terveysvaikutukset*, Säteilyturvakeskus (STUK), s. 49–63, 2002.
- [24] Duodecim Terveyskirjasto (2016) [online, viitattu 7.10.2025]. Saatavilla: <<https://www.terveyskirjasto.fi/ltt01245>>.
- [25] N. Parmentier, J. C. Nenot, *Atmospheric Environment* **23**, 4, s. 771–775 (1989) doi:10.1016/0004-6981(89)90480-0.
- [26] P. Wendla, "Tšernobylin turman terveysvaikutukset – opetuksia tulevaisuudelle", teoksessa *Säteilyn terveysvaikutukset*, Säteilyturvakeskus (STUK), s. 165–186, 2002.