

# Gamma- ja röntgen- säteilyttimien vertailu

Janne Kurkivuori



# Gamma- ja röntgen- säteilyttimien vertailu

Janne Kurkivuori

ISBN 978-952-309-416-1 (pdf)  
ISSN 1796-7171

*KURKIVUORI Janne. Gamma- ja röntgensäteilyttimien vertailu. STUK-TR 29. Helsinki 2018. 31 s.*

**Avainsanat:** gammasäteilytin, röntgensäteilytin, veren säteilyttäminen

## Tiivistelmä

Veren säteilytyksellä inaktivoidaan veressä olevat lymfosyytit, jotta verensiirtoa tarvitsevalle potilaalle ei tulisi käänteishyljintäreaktiota siirrettävästä verestä. Säteilytettävä veri vaatii minimissään 25 Gy:n annoksen, jotta lymfosyytit inaktivoituvat, maksimiannos verituotteille on 50 Gy:tä. Lisäksi verta ei saa säteilyttää kahteen kertaan ja liian suuri säteilyannos lisää solujen kaliumvuotoa ja punasolujen hemolyysia. Veren säteilytyksessä käytetään joko gammasäteilytintä, jonka säteilylähteenä toimii korkea-aktiivinen umpilähde (cesium-137) tai röntgensäteilytintä, jonka säteilylähteenä toimii röntgenputki/-putket.

Suomessa toimii viisi verensäteilytysorganisaatiota, joiden säteilyttimenä toimii gammasäteilytin ja säteilylähteenä käytetään cesium-137:ää. Suomessa on kaksi röntgensäteilytintä, mutta kyseiset laitteet ovat käytössä vain biologisen materiaalin säteilytyksessä. Maailmalla on aloitettu vaihtamaan gammasäteilyttimiä röntgensäteilyttimiin säteilyturvallisuuden parantamiseksi muuttuneen maailmantilanteen vuoksi. Röntgensäteilyttimiin on siirrytty kokonaan Norjassa ja Ranskassa. Japani ja Italia on vaihtanut 80 % verensäteilyttimistä röntgensäteilyttimiin. Myöskin Tanska, Saksa, Englanti, Ruotsi ja Yhdysvallat ovat alkaneet vaihtaa gammasäteilyttimiä röntgensäteilyttimiin.

Suomessa röntgensäteilyttäminen on vieras asia, eikä gammasäteilyttimen ja röntgensäteilyttimen vertailua ole aiemmin Suomessa tehty, joten taustatiedon saamiseksi kyselyjä on lähetetty Suomessa toimiville toiminnanharjoittajille, Norjan viranomaisille ja kahteen sairaalaan sekä Ruotsiin ja Yhdysvaltoihin laitevalmistajille. Lisäksi laitevalmistajille on lähetetty kyselyjä säteilyttimistä ja niiden huolloista tarkemman tiedon saamiseksi kustannuksista ja laitteiden käyttöiästä.

Tässä raportissa selvitetään näiden kahden säteilyttimen käyttöä, toimintavarmuutta, säteilyturvallisuutta ja kustannuksia, jotka muodostuvat säteilyttimien elinkaaren aikana.

*KURKIVUORI Janne. Comparison of Cesium-137 and X-ray irradiators. STUK-TR 29. Helsinki 2018. 31 s.*

**Key words:** Cs-137, X-ray irradiator, blood irradiator

## Abstract

The lymphocytes in blood are inactivated by irradiation so that the patient would not get an adverse reaction to a blood transfusion. The blood has to be irradiated by a radiation dose of 25 Gy at the minimum in order to inactivate the lymphocytes. The maximum radiation dose for blood products is 50 Gy. Furthermore, it should be noted that blood must never be irradiated twice and too big a radiation dose increases potassium leakage of cells and haemolysis of red blood cells. Blood irradiation is performed using a gamma irradiator with a high-active cesium-137 sealed source or an X-ray irradiator with an X-ray tube/tubes.

In Finland there are five organisations that perform blood irradiation. They use gamma irradiators and cesium-137 as radiation source. There are also two X-ray irradiators in Finland but these devices are used only for irradiating biological material. In order to improve radiation safety in the altered international situation, many have started to replace gamma irradiators with X-ray irradiators. In Norway and France the gamma irradiators have been completely replaced by X-ray irradiators, while Japan and Italy have already replaced 80% of their blood irradiators by X-ray irradiators. Also Denmark, Germany, the United Kingdom, Sweden and the United States have started to replace their irradiators with X-ray irradiators.

In Finland X-ray irradiating is unaccustomed and no comparison between gamma and X-ray irradiator has been made before. So in order to acquire background information on the topic, inquiries have been sent to operators in Finland, Norway, Sweden and the United States. In addition, the manufacturers have also been sent inquiries about irradiators and their maintenance to get more specific information on the costs and the operation life of the devices.

This report discusses the use, performance, radiation safety and costs of these two irradiators during their life cycle.

# Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 VEREN SÄTEILYTTÄMINEN SUOMESSA	8
3 VEREN SÄTEILYTTÄMINEN MAAILMALLA	11
4 GAMMASÄTEILYTTÄMINEN	13
4.1 Gammasäteilyttimien tietoja	13
4.2 Säteilytyskyky	14
4.3 Cesium-137 ( <sup>137</sup> Cs)	15
4.3.1 Ominaisuudet	15
4.3.2 Riskit	16
4.4 Umpilähteiden ja niitä sisältävien laitteiden käyttö	16
4.5 Umpilähteen käytöstä poistaminen	17
4.6 Radioaktiivisen aineen kuljettaminen	17
4.7 Valvonta	18
4.8 Kustannukset	18
5 RÖNTGENSÄTEILYTTÄMINEN	20
5.1 Toimintavarmuus	21
5.2 Röntgensäteilyttimien tietoja	22
5.3 Säteilytyskyky	23
5.4 Toiminnanharjoittaja	24
5.5 Kustannukset	24
6 SÄTEILYTURVALLISUUS GAMMA- JA RÖNTGENSÄTEILYTTIMELLÄ	25
6.1 Käyttöpaikka	25
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	27
8 KIRJALLISUUSVIITTEET	30





# 1 Johdanto

Veren säteilyttämisellä estetään käänteishyljintäreaktio (veressä jäljellä olevien lymfosyyttien aktivoituminen ja jakautuminen) ja säteilyttämiseen käytetään gamma- tai röntgensäteilyttäimiä. Käänteishyljinnälle alttiita ovat vaikeat immuunipuutospotilaat, kantasolujen siirron saaneet potilaat, osa hematologisista potilaista sikiön kohdunsisäisen verensiirron yhteydessä ja pienet keskokset (< 1500 g tai < 30 raskausviikkoa). Euroopassa säteilytyksessä käytettävä annos on minimissään 25 Gy ja maksimissaan 50 Gy. Verta ei saa säteilyttää kahteen kertaan ja liian suuri säteilytysannos lisää solujen kaliumvuotoa ja punasolujen hemolyysia, mikä on vaaraksi säteilytettyä verta tarvitsevalle potilaalle. (Punainen risti 2016)

Veren säteilyttämiseen käytetään Suomessa gammasäteilyttäimiä (gamma irradiator), joiden säteilyn lähteenä toimii cesium-137. Vaihtoehtona gammasäteilyttimelle on röntgensäteilytin (X-ray irradiator). Röntgensäteilyttäimiin on siirrytty kokonaan Norjassa ja Ranskassa. Japani ja Italia on korvannut jo 80 % verensäteilyttimistä röntgensäteilyttimillä ja Tanska, Saksa, Englanti, Ruotsi ja Yhdysvallat ovat alkaneet vaihtaa gammasäteilyttäimiä röntgensäteilyttäimiin vuonna 2018. Suomessa on tällä hetkellä käytössä kaksi röntgensäteilytintä solujen ja pienkoe-eläinten säteilyttämisessä. Ennen säteilylähteen (esim. cesium-137) ja säteilyttämislaitteen (esim. gamma- tai röntgensäteilytin) vastaanottoa tulee toiminnanharjoittajalla olla Säteilyturvakeskuksen (STUK) myöntämä turvallisuuslupa, joka haetaan kirjallisella lupahakemuksella. (STUK 2016)

Suomessa verta säteilyttäviä toiminnanharjoittajia on viisi, joten veren röntgensäteilyttämiseen siirtyminen tuo uusia kustannuksia, mutta samalla poistaa monet vaarattekijät. Raportin tarkoituksena on selvittää näitä kahta eri säteilylähdettä käyttävien verensäteilyttimen eroja mm. kustannuksissa, toimintavarmuudessa, säteilyntuotossa ja säteilyturvallisuudessa.

## 2 Veren säteilyttäminen Suomessa

Veren säteilyttämiseen käytetään Suomessa gammasäteilyttäimiä ja sen säteilylähteenä käytetään cesium-137:ää. Verta säteilyttäviä toiminnanharjoittajia on Suomessa viisi. Korkea-aktiivisen umpilähteen (cesium-137) sisältävä säteilytin joudutaan kuljettamaan toiminnanharjoittajalle maanteitse kuljetuskalustolla, jonka kuljettajalla on oltava ADR-ajolupa, joka kattaa radioaktiiviset aineet. Maanteitse kuljetettavat umpilähteet tai umpilähteen sisältävät laitteet ovat alttiita lainvastaiselle toiminnalle. Kuljetettava radioaktiivinen aine on pakattava asianmukaiseen kuljetuspakkaukseen, joka vaatii viranomaisen tyyppihyväksynnän.

Suomessa on seitsemän kappaletta gammasäteilyttäimiä, joista yksi on poistettu käytöstä ja varastoitu luvanhaltijan varastoon. Lisäksi yksi gammasäteilytin on käytössä vain biologisen materiaalin säteilytyksessä, joten kokonaisuudessaan toiminnassa olevia veren gammasäteilyttäimiä on viisi kappaletta.

STUK lähetti Suomessa toimiville verensäteilytysorganisaatioille keväällä 2018 kyselyn veren säteilyttämisen käytön selvittämiseksi. Kyselyllä haluttiin kartoittaa seuraavia asioita:

1. Mikäläinen/minkälaisia verensäteilyttäimiä teillä on käytössä ja minkälaisia kokemuksia teillä on kyseisestä säteilyttimestä?
2. Osaatko kertoa (noin-arviota) paljonko teidän verensäteilyttimienne käyttö maksaa vuositasolla?
3. Kuinka usein/harvoin säteilylähte tulee uusia ja mitä vanhalle säteilylähteelle tehdään?
4. Minkälaisen koulutuksen kyseinen laite vaatii ja järjestättekö lisäkoulutuksia? Jos järjestätte niin kuinka usein?
5. Kuinka paljon säteilytätte verta (päivässä, viikossa tai kuukaudessa)?
6. Kuinka usein teette annosmittauksia ja laadunvalvontaa?
7. Millaiseksi olette kokeneet huollon toiminnan ja nopeuden?
8. Minkälainen varasuunnitelmaa teillä on laiterikon tai muun vastaavan ongelman ajaksi?
9. Minkälainen toimintasuunnitelma teillä on tulipalon tai muun vastaavan onnettomuuden sattuessa?
10. Onko teillä tiedossa, koska laite tulisi uusia? Ja oletteko miettinyt uudeksi verensäteilyttimeksi röntgensäteilytintä (mikäli teillä ei ole edellä mainittua laitetta jo käytössä)?
11. Oletteko miettinyt gammasäteilyttimen ja röntgensäteilyttimen hyötyjä ja haittoja ja miksi ette siirtyisi säteilyttämään verta röntgensäteilyttimellä?

Kyselyyn vastasi viisi kuudesta toiminnanharjoittajasta. Kyselyn perusteella saatiin hyvä kuva Suomessa toiminnassa olevista verensäteilyttimistä.

Suomessa käytössä olevia gammasäteilyttäimiä ovat STS GmbH:n valmistama OB 29/4 (2 kpl), Molsgaard Medicalin valmistama Gammacell 2000 (2 kpl), Best Theratronics Ltd:n valmistama Gammacell 3000 Elan ja Gamma-Service Medical GmbH:n valmistama

GSR C1 ja BIOBEAM GM 8000. Säteilytyslaitteiden käyttöikä on valmistajien antamien tietojen mukaan noin 15 vuotta ja tämänhetkisen turvallisuussuunnitelman mukaan säteilylähteet tulisi uusia joka 15. vuosi, vaikka cesium-137:n puoliintumisaika on 30 vuotta. Suomessa toiminnanharjoittajat ovat käyttäneet gammasäteilyttimiä noin 20–25 vuotta ennen uuden säteilyttimien hankintaa. Säteilyttimen ja umpilähteen iän kasvaessa verivalmisteen säteilytysaika kasvaa, jolloin säteilyttimestä saatava hyöty heikkenee.

Suomessa verivalmisteita säteilytetään arkipäivisin noin 100–370 pussia (200–300 ml/pussi), riippuen toiminnanharjoittajasta.

Toiminnanharjoittajat ovat olleet hyvin tyytyväisiä gammasäteilyttimiin sen toimintavarmuuden, helppokäyttöisyyden ja kustannusten osalta. Vuosittaiset kustannukset koostuvat pääosin määräaikaishuolloista, vikahuolloista, STUKin lupamaksuista ja pyyhintäkokeista, jotka ovat yhteensä noin 4 000–5 500 euroa. Henkilökunnan palkkoja, sähköä, tilavuokria tai muita vastaavia kuluja ei ole otettu huomioon. Toiminnanharjoittajat ovat olleet tyytyväisiä huollon toimivuuteen, esimerkiksi apua on saatu puhelimitse ja tarvittaessa säteilyttimen huolto onnistuu muutamassa päivässä. Huollon tai konerikon aikana veri tilataan Veripalvelulta tai muista yliopistosairaaloista.

Annosmittaukset suoritetaan huoltojen yhteydessä vuosittain ja jokaisessa säteilyteytysssä veripussissa on annoskertymää ilmaiseva tarraindikaattori. Säteilytyslaitteesta vastaava henkilö perehdyttää uudet työntekijät laitteen käyttöön. Lisäkoulutusta vaaditaan mikäli tulee uusi ohjelmistopäivitys.

Muutama toiminnanharjoittaja on harkinnut röntgensäteilyttäjää gammasäteilyttimen tilalle, mutta ongelmiksi ovat muodostuneet laitteen suuret käyttökustannukset, huoltojen hinta ja toimintavarmuus. Monella toiminnanharjoittajalla säteilyttimen tulee olla käyttövalmis 24/7 (ad hoc -tilauksia), joten laitteen tulee olla luotettava ja aina toimintavalmiina. (STUK 2018b)

Gammasäteilyttimien lisäksi Suomessa on kaksi röntgensäteilytintä, joita käytetään vain solujen ja pienkoe-eläinten säteilytyksessä. Keväällä 2018 STUK lähetti seuraavan kyselyn toiminnanharjoittajille, joiden käytössä on tällainen röntgensäteilytin.

1. Minkälainen/minkälaisia röntgensäteilyttimiä teillä on käytössä ja minkälaisia kokeimuksia teillä on kyseisestä säteilyttimestä?
2. Osaatteko kertoa (noin-arviota) paljonko teidän röntgensäteilyttimienne käyttö maksaa vuositasolla?
3. Minkälaisen koulutuksen kyseinen laite vaatii ja järjestättekö lisäkoulutuksia? Jos järjestätte niin kuinka usein?
4. Kuinka paljon säteilytätte (päivässä, viikossa tai kuukaudessa)?
5. Kuinka usein teette annosmittauksia ja laadunvalvontaa?
6. Millaiseksi olette kokeneet huollon toiminnan ja nopeuden?

Toiminnanharjoittajista kyselyyn vastasi vain toinen. Toiminnanharjoittajalla on käytössään Faxitron Bioptics LLC:n valmistama Faxitron Multirad 350 (taulukko 1) biologisen materiaalin säteilytin, jolla säteilytetään vain soluja ja pieniä koe-eläimiä (hiiret ja rotat). Laite tullut markkinoille 2015 ja toiminnanharjoittaja hankki kyseisen säteilyttimen samana vuonna.

Toiminnanharjoittajan kokemuksen mukaan röntgensäteilyttäjää on helppokäyttöinen, mutta laitteen ohjelmistossa ja tekniikassa on kuitenkin ollut lukuisia ongelmia. Viimeksi säteilyttimeen on jouduttu vaihtamaan takuuhuoltona korkeajännitegeneraattori, tuolloin säteilytin oli pois käytöstä kuusi viikkoa. Laitteen huolto tulee joko Tanskasta tai Faxitronin tehtaalta Yhdysvalloista. Toiminnanharjoittaja ei ole täysin tyytyväinen huollon toimivuuteen.

Vastaava johtaja ja säteilyttimen vastuuhenkilö on saanut säteilyttimen käyttökoulu-

tuksen asennuksen yhteydessä. Käyttökoulutuksen saaneet perehdyttävät uudet työntekijät säteilyttimen käyttöön.

Multirad 350 -säteilyttimellä on minimihuoltosopimus, jonka vuosikustannus on noin 2 900 euroa. Muita kustannuksia säteilyttimen käytöstä ei ole seurattu (sähkö + vesi).

Säteilytintä käytetään noin 3–4 kertaa viikossa. Aina koneen käyttöpäivänä on lämmitys (30 min), joka suoritetaan vähintään kerran viikossa.

Laite tarkistaa käynnistyksen yhteydessä sisäisellä laadunvarmistusmittauksella säteilyn tuoton, verraten sitä valmistajan tekemään kalibrointiin. Omia mittauksia on tehty sädehoidon avustamana, mutta ne eivät ole rutiinimittauksia. (STUK 2018a)

**Taulukko 1.** Faxitron Multirad 350- ja Faxitron Multirad 225 -säteilyttimien ominaisuudet.

	<b>Faxitron Multirad 350</b>	<b>Faxitron Multirad 225</b>
Koko	K 1880 mm L 1080 mm S 880 mm	K 1880 mm L 1080 mm S 880 mm
Paino	1575 kg	1160 kg
Maksimijännite/ Maksimiteho	350 kV / 4000 W	225 kV / 4000 W
Putken maksimijännite	17,8 mA	11,4 mA
Annosnopeus- maksimi kVp & mA	Up to: 140 Gy/min (ilman suodatusta) Up to: 40 Gy/min (2 mm CuAl) Up to: 16,5 Gy/min (4,0 mm CuHVL)	Up to: 285 Gy/min (ilman suodatusta) Up to: 42 Gy/min (2 mmAl) Up to: 25 Gy/min (0,3 mmCu)
Sähkö	220 VAC +/- 10 %, 50 / 60 Hz, Yksivaihe: 7,5 kVA	220 VAC +/- 10 %, 50 / 60 Hz, Yksivaihe: 7,5 kVA

### 3 Veren säteilyttäminen maailmalla

Norja alkoi miettiä vaihtoehtoa gammasäteilyttimille vuoden 2011 terrori-iskun jälkeen, joka tehtiin autopommin muodossa ison sairaalarakennuksen sisäänmeno-oven edessä. Tiedossa ei ole, oliko terrori-isku kohdistettu juuri gammasäteilyttimen korkea-aktiiviselle umpilähteelle (cesium-137) vai jollekin muulle. Norja alkoi miettiä vuoden 2011 tapahtuneen terrori-iskun jälkeen röntgensäteilyn käyttöä veren säteilyttämisessä ja vuoteen 2015 mennessä Norja oli korvannut kaikki gammasäteilyttimet röntgensäteilyttimillä. Terrori-iskun seurauksena Norjassa kiellettiin gammasäteilyttimien myynti/käyttö. (Øvergaard 2018)

Norjan säteilyviranomaiset tekivät tutkimuksen verensäteilyttimistä ja lähettivät tätä koskien kyselyn muiden maiden viranomaisille kysyen seuraavaa:

- Onko teillä käytössä molempia verensäteilyttäimiä (gamma- ja röntgensäteilytin)?
- Osaatko kertoa montako röntgensäteilytintä ja gammasäteilytintä teidän maassanne on?
- Mitkä ovat kokemuksenne röntgensäteilyttimistä, luotettavuus, kustannukset, huollot jne?

Vastauksia tuli yhdeksästä maasta (Espanja, Slovenia, Ruotsi, Ranska, Tšekin tasavalta, Belgia, Sveitsi, Saksa (Baijeri) ja Luxemburg). Kyselyn yhteenvedon tuloksena oli, että yhdellä maalla on käytössä gammasäteilyttimet ja kolmella maalla käytössä on röntgensäteilyttimet. Yksi maa vastasi, että he ovat vaihtamassa gammasäteilyttimet muutaman vuoden sisällä röntgensäteilyttimiin. Kokonaisuudessaan vastanneilla mailla on gammasäteilyttäimiä 104 kappaletta ja röntgensäteilyttäimiä 19 kappaletta.

Kokemukset röntgensäteilyttimistä olivat seuraavat:

- Röntgensäteilyttäjät ovat toimineet hyvin, mutta muutamia ongelmia on ollut.
- Liian lämpimässä huoneessa koneeseen on tullut häiriöitä.
- Koneen huolto on ollut kalliimpaa kuin gammasäteilyttimen.
- Röntgensäteilytin tarvitsee jatkuvaa virtaa toimiakseen, mikä vaatii suuremmat virtajohtimet ja sulakkeet.
- Veren säteilyttäminen röntgensäteilyllä kestää kauemmin kuin gammasäteilyttäminen. (Øvergaard and Saxebol 2013)

NTI:n (Nuclear Threat Initiative) varapresidentti Andrew Bieniawski kertoo vuoden 2017 artikkelissa, että tavoitteena on vaihtaa Yhdysvalloissa kaikki gammasäteilyttimet röntgensäteilyttimiin vuoteen 2025 mennessä. Maailmanlaajuisesti käytössä uskotaan olevan jo yli 2 000 röntgensäteilytintä. Ranska ja Norja ovat korvanneet gammasäteilyttimet röntgensäteilyttimillä ja Japani on korvannut jo 80 % gammasäteilyttimistä röntgensäteilyttimillä. Bieniawski epäilee etteivät Venäjä, Intia ja Kiina tule vaihtamaan gammasäteilyttämiään röntgensäteilyttimiin. (Kramer 2017)

STUK oli sähköpostitse yhteydessä laitevalmistajaan (Rad Source Technologies LLC)

ja maahantuojaan (Nuklex AB) keväällä 2018, kun tarvittiin yksityiskohtaisempaa tietoa röntgensäteilyttimistä.

Laitevalmistaja Rad Sourcen röntgensäteilyttimiä on myyty maailmanlaajuisesti yli 350 kappaletta, pelkästään vuonna 2012 laitemyynti oli noin viisi miljoonaa dollaria. Rad Sourcen säteilyttimiä käyttää Yhdysvalloissa 23 toiminnanharjoittajaa. Rad Sourcen uusi malli RS 3400 on valmistettu korvaamaan täydellisesti gammasäteilyttimet. RS 3400:ssa on patentoitu 4 pi -röntgensäteilytekniikka, joka estää säteilyttimen lämpenemisen ja mahdollistaa suuremman säteilyn röntgenputkista. Lisäksi matalampi käyttölämpötila pidentää röntgensäteilyttimen elinikää ja 4 pi -röntgenputki on korjattavissa, kun taas tavallinen röntgenputki pitää korvata uudella. Kyseinen laitetekniikka tekee RS 3400:sta hyvin käyttäjäystävällisen ja suositun säteilyttimen. (Hacher 2018)

Viimeisen kolmen vuoden aikana (2015–2018) Rad Source RS 3400 -laitetta on myyty Yhdysvalloissa 86 kpl ja muualle maailmaan 14 kpl. Euroopassa RS 3400 -laitteita on Ruotsissa (3 kpl), Tanskassa (1 kpl + tulossa toinen) ja Saksassa (1 kpl). Lisäksi Englanti on hankkimassa kyseisen säteilyttimen Lontooseen ja Yhdysvallat on vaihtamassa kaikki gammasäteilyttimensä röntgensäteilyttimiin. (Hacher 2018)

Nuklex välittää seuraavia säteilyttimiä: Best Theratronics Raycell Mk 1 ja 2, Gammacell 1000/3000 ja Gammacell 40 Exactor. Ruotsissa on otettu käyttöön Best Theratronicsin valmistama röntgensäteilytin vuonna 2006–2007, johon on kertaalleen jouduttu vaihtamaan virtalähde ja röntgenputket. Nuklexin arvion mukaan röntgensäteilyttimien elinikä on noin 10–15 vuotta riippuen säteilyttimen käyttöasteesta. Gammasäteilyttimille Nuklex lupaa eliniäksi 15 vuotta. (Berglund 2018)

## 4 Gammasäteilyttäminen

Gammasäteilyttimien säteilyn lähteenä toimii cesium-137, joka tuotetaan käytetystä ydinpolttoaineesta. Gammasäteilytin on niin sanotusti itsenäinen säteilytin, joka on suunniteltu erityisesti tutkimuksille, jotka tarvitsevat pieniä annoksia ja suhteellisen pienen läpäisyn (säiliön tilavuus 1–5 litraa). Verin säteilytys vaatii 25–50 Gy, mikä tekee gammasäteilyttimestä hyvän työlaitteen. Gammasäteilyttimen toimintavarmuuden, säteilytyksen nopeuden, yksinkertaisuuden, helpon käytön ja koon puolesta laite sopii hyvin laboratorioympäristöön. (IAEA 2005) Gammasäteilytin valmistetaan tehtaalla, josta tilattu säteilytin lähtee toiselle tehtaalle umpilähteen (cesium-137) asennukseen. Umpilähteiden asennuksen jälkeen gammasäteilytin toimitetaan toiminnanharjoittajalle maanteitse.

### 4.1 Gammasäteilyttimien tietoja

Gammasäteilyttimien valmistajia/maahantuojia ovat mm:

- Best Theratronics Ltd, Kanada (laitteet: Gammacell 3000 Elan ja Gammacell 40 Exactor)
- Gamma-Service Medical GmbH, Saksa (laitteet: GSR C1 ja Biobeam GM 8000)
- Nuklex AB, Ruotsi (maahantuojia).

**Taulukko 2.** Gammasäteilyttimien vertailu. Valmistajat: Best Theratronics Ltd ja Gamma-Service Medical GmbH.

	<b>Gammacell 3000 Elan</b>	<b>Gammacell 40 Exactor</b>	<b>GSR C1</b>	<b>Biobeam GM 8000</b>
Koko	K 1500 mm L 800 mm S 1229 mm (0,72 m <sup>2</sup> )	K 1496 mm L 924 mm S 1229 mm	K 1700 mm L 680 mm S 720 mm	K 1740 mm L 810 mm S 810 mm
Paino	1479 kg	2994 kg	2200 kg	2900 kg
Minimi-huonekoko	K 2,44 m L 2,13 m S 2,44 m	-	L 2,5 m S 2,5 m	L 2 m S 2 m
Sähkö	100 V, 50 tai 60 Hz, 300 VA 115 V, 60 Hz, 300 VA 230 V, 50 Hz, 300 VA (ei varavirta-akkua)	100 V, 50 tai 60 Hz, 300 VA 115 V, 60 Hz, 300 VA 230 V, 50 Hz, 300 VA (ei varavirta-akkua)	100–240 V 50–60 Hz varavirta-akkua	90–264 V 47–63 Hz (ei varavirta-akkua)
Säteilytyskyky	2,38 L, aika 25 Gy keskiannokselle noin 5,6 min tai 2,9 min	8 L 1,0 Gy / min	3,8 L, 40 TBq 1,5 Gy/min 3,8 L, 60 TBq 3,0 Gy/min 3,8 L, 120 TBq 6,0 Gy/min	1,3 L, 5 Gy/min 5,1 L, 2,8 Gy/min 7,5 L, 2,6 Gy/min

## 4.2 Säteililytskyky

Keväällä 2018 STUKin tekemän kyselyn vastausten perusteella verta säteilytetään viikon aikana keskimäärin noin 100–370 pussia riippuen toiminnanharjoittajasta. Vuorokauden aikana yhden verensäteilyttimen tulisi säteilyttää 14–53 pussia, mikä vastaa punasoluis- sa noin 3,6–13,8 litraa ja trombosyyteissä 14–53 pussia vastaa taas 4,4–15,9 litraa.

Punasolujen tilavuus yhdessä pussissa on 260 ml mikä vastaa yhtä yksikköä ja trombo- syyttien tilavuus yhdessä pussissa on 300 ml, mikä vastaa neljää yksikköä.

Mikäli 20–74 pussia/päivä säteilytettäisiin Best Theratronics Ltd:n Gammacell 3000 Elanilla ja Gammacell 40 Exactorilla tai Gamma-Service Medical GmbH:n GSR C1:llä ja Biobeam GM 8000:lla, tulokset olisivat taulukoissa 3 ja 4 esitettyjen mukaiset (säteilytin- vertailu tehty Suomessa käytössä olevien säteilyttimien valmistajien antamalla tiedoilla).

**Taulukko 3.** Aikavertailu: 14 verivalmistepussin säteilytys 25 Gy:n keskiannoksella. Vertailussa Best Theratronics Ltd:n ja Gamma-Service Medical GmbH:n gammasäteilyttimet.

<b>Vuoro- kaudessa</b>	<b>Gammacell 3000 Elan, 2,38 L</b>	<b>Gammacell 40 Exactor, 8 L</b>	<b>GSR C1, 3,8 L</b>	<b>Biobeam GM 8000, 1,3 L, 5,1 L, 7,5 L</b>
Punasoluja 14 pss	11 min (25 Gy / 5,3 min) 6 min (25 Gy / 2,9 min)	25 min (1,0 Gy/min)	17 min (1,5 Gy/min) 8 min (3 Gy/min) 4 min (6 Gy/min)	15 min (5 Gy/min) 9 min (2,8 Gy/min) 10 min (2,6 Gy/min)
Trombosyytit 14 pss	11 min 25 Gy / 5,3 min) 6 min (25 Gy / 2,9 min)	25 min (1,0 Gy / min)	34 min (1,5 Gy/ min) 16 min (3 Gy/min) 8 min (6 Gy/min)	20 min (5 Gy/min) 9 min (2,8 Gy/min) 10 min (2,6 Gy/min)

**Taulukko 4.** Aikavertailu: 53 verivalmistepussin säteilytys 25 Gy:n keskiannoksella. Vertailussa Best Theratronics Ltd:n ja Gamma-Service Medical GmbH:n gammasäteilyttimet.

<b>Vuoro- kaudessa</b>	<b>Gammacell 3000 Elan, 2,38 L</b>	<b>Gammacell 40 Exactor, 8 L</b>	<b>GSR C1, 3,8 L</b>	<b>Biobeam GM 8000, 1,3 L, 5,1 L, 7,5 L</b>
Punasoluja 53 pss	32 min (25 Gy / 5,3 min) 15 min (25 Gy / 2,9 min)	50 min (1,0 Gy/min)	68 min (1,5 Gy/min) 32 min (3 Gy/min) 16 min (6 Gy/min)	74 min (5 Gy/min) 34 min (2,8 Gy/min) 26 min (2,6 Gy/min)
Trombosyytit 53 pss	37 min (25 Gy / 5,3 min) 20 min (25 Gy / 2,9 min)	50 min (1,0 Gy/min)	85 min (1,5 Gy/ min) 40 min (3 Gy/min) 20 min (6 Gy/min)	65 min (5 Gy/min) 36 min (2,8 Gy/min) 30 min (2,6 Gy/min)



### 4.3 Cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ )

Cesium-137 on radioaktiivinen aine, joka tuotetaan ydinfission seurauksena ydinreakto-reissa. Cesium-137:n puoliintumisaika on 30,2 vuotta ja hajotessaan se lähettää beeta-hiukkasia. Cesium-137 cesiumkloridi ( $\text{CsCl}$ ) on yleisin käytössä oleva muoto, jota käytetään gammasäteilyttimissä. Sairaalat ja lääketieteelliset laitokset ovat radioaktiivisten aineiden suurimpia käyttäjiä. Esimerkiksi sterilointimenettelyllä elintarviketeollisuu-dessa tai sairaalaympäristössä cesium-137:ää käytetään hyvän gammasäteilyn vuoksi. (Pubchem 2018; Moore and Pomper 2015)

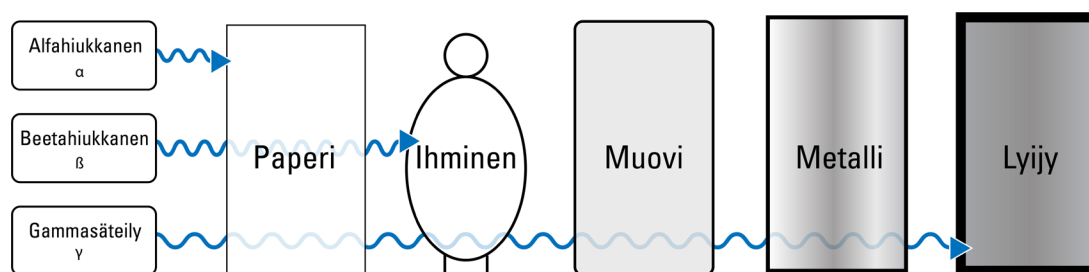
#### 4.3.1 Ominaisuudet

Taulukossa 5 on esitetty cesium-137:n ominaisuudet.

**Taulukko 5.** Cesium-137:n ominaisuudet.

Puoliintumisaika	30,2 vuotta
Gammaenergia	662keV (85 %) 36 keV (1 %) 32 keV (6 %)
Maksimi beetaenergia	173 keV (5 %) 512 keV (95 %)
Ominaisaktiivisuus	3,214TBq/g
Gammavakio	$3,8 \times 10^{-1}$ mR/hr/mCi $1,03 \times 10^{-4}$ mSv/hr/MBq
Hajoamisvakio	$7,307 \times 10^{-10}$ per sekunti
Hajoamistila	$\beta^-$ (1,176528 MeV)

Cesium-137 on beetasäteilijä ja beetahiukkaset voivat olla joko elektroneja tai positroneja. Elektronit ovat negatiivisesti varautuneita, kun taas positronit ovat varaukseltaan positiivisia. Cesium-137:n lähettämä beetasäteily on hyvin läpäisykykyistä ja pystyy tunkeutumaan esimerkiksi ihoon. Beetahiukkasen hajoamisen yhteydessä syntyy gammasäteilyä, joka on sähkömagneettista aaltoliikettä (ei hiukkassäteilyä). Hajoamisesta syntyvä gammasäteily on hyvin läpäisykykyistä ja säteilyltä suojautuminen on vaikeampaa kuin muulta säteilyltä suojautuminen. Gammasäteilyn energiasta riippuen vaimentamiseen vaaditaan paksu kerros betonia, teräslevyjä tai lyijyä. Pieneltä gammaenergialta suojautumiseen riittää millimetrin paksuinen lyijykerros (kuva 1). (STUK 2015)



**Kuva 1.** Cesium-137:n läpäisykyky.

### 4.3.2 Riskit

Verensäteilyttimissä käytettävät cesium-137 -lähteet ovat korkea-aktiivisia umpilähteitä ja lainvastaisessa toiminnassa cesium-137:ää voisi käyttää ”likaisissa pommeissa”. Mikäli umpilähteen sisältämä cesium-137 vapautettaisiin lainvastaisella toimella, voisi suuri alue saastua radioaktiivisesta aineesta ympäristöineen ja rakennuksineen. Radioaktiivisen aineen saastuttamalla alueella oleskelevat henkilöt ja eläimet voivat altistua säteilylle ja tämän seurauksena riski altistua säteily sairauksille kasvaa (NTI 2017).

Tulipalon sattuessa toiminnanharjoittajan tiloissa, jossa on käytössä verensäteilytin, jonka säteilylähteenä toimii korkea-aktiivinen umpilähde (cesium-137), on riski, että laite vaurioituu palon aikana niin pahoin, että korkea-aktiivista ainetta pääsee vuotamaan laitteen ulkopuolelle. Laitteen vaurioitumisen seurauksena lähiympäristö voi saastua pahoin ja lähistöllä työskentelevät henkilöt voivat altistua radioaktiiviselle aineelle tai säteilylle. (STUK 2012a)

Suomessa tapahtui yliopistosairaalassa tulipalo vuonna 2011, jossa paloi verensäteilytin. Säteilylähteenä verensäteilyttimessä oli cesium-137-umpilähde, jonka aktiivisuus oli 60 TBq. Tulipalo ei kuitenkaan vahingoittanut gammasäteilytintä niin pahoin, että radioaktiivista ainetta olisi päässyt lähiympäristöön. (Korpela and Markkanen 2011)

Vuonna 2017 Suomen tieliikenneonnettomuuksissa loukkaantuneita henkilöitä oli 5 675, joista menehtyi 209 henkilöä. Tieliikenneonnettomuuksien tilaston perusteella voidaan olettaa, että kuljetettaessa korkea-aktiivista ainetta maanteitse on aina olemassa kohtuullinen tieliikenneonnettomuuden riski, jolloin kuljetuksessa oleva korkea-aktiivinen umpilähde voi päästä vaurioitumaan ja vuotamaan suojauksista huolimatta lähiympäristöön saastuttaen sen ja ympärillä olevat henkilöt. (Tilastokeskus 2018)

Vuorokauden sisällä saatavan 1000 mSv:n annoksen oireita voivat osalla ihmisistä olla ohimenevä pahoinvointi ja tilapäiset verenkuvamuutokset. Lyhyessä ajassa saatavasta 3000 mSv:n annoksesta kehittyy vakava säteily sairaus, kun taas yli 6000 mSv:n annos nopeasti saatuna on letaaliannos. (STUK 2012b)

## 4.4 Umpilähteiden ja niitä sisältävien laitteiden käyttö

Toiminnanharjoittajan on haettava turvallisuuslupaa aina ennen säteilylähteen vastaanottoa. Mikäli toiminnanharjoittaja uusii korkea-aktiivisen säteilylähteen tai vaihtaa sen toiseen, tulee hakea turvallisuusluvan muutosta etukäteen. Korkea-aktiiviselle säteilylähteelle on asetettava taloudellinen vakuus lähteestä aiheutuvien kustannusten varalle, joita ovat säteilylähteen vaarattomaksi teko, ympäristön puhdistus yms. Turvallisuuslupa myönnetään toiminnanharjoittajalle, jos säteilyn käyttö täyttää säteilylaissa 592/1991 2 § säädetyt vaatimukset:

1. toiminnalla saavutettava hyöty on suurempi kuin toiminnasta aiheutuva haitta (oikeutusperiaate)
2. toiminta on siten järjestetty, että siitä aiheutuva terveydelle haitallinen säteilyaltistus pidetään niin alhaisena kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista (optimointiperiaate)
3. yksilön säteilyaltistus ei ylitä asetuksella vahvistettavia enimmäisarvoja (yksilönsuojaperiaate).

Lisäksi hakemuksessa on riittävän luotettavasti osoitettava (säteilylain 27.3.1991/592 16 § mukaan), että:

1. säteilyn käyttötarkoitus ja käyttöpaikka, säteilylähteet sekä säteilyn käyttöön liittyvät laitteet ja varusteet
2. säteilyn käyttöorganisaatio

3. järjestelyt toiminnassa mahdollisesti syntyvistä radioaktiivisista jätteistä huolehtimiseksi ovat sellaiset, että säteilyä voidaan turvallisesti käyttää.

Käytettäessä umpilähteitä tai niitä sisältäviä laitteita, kuten säteilyyn perustuvia mittalaitteita, sädehoidon laitteita ja säteilytyslaitteita, on säteilyturvallisuuden lisäksi huolehdittava säteilylähteiden turvajärjestelyistä. Toiminnanharjoittajalla tulee olla käytössään riittävä asiantuntemus, esimerkiksi fyysikko. (STUK 2016)

Umpilähteissä on oltava valmistajan antama yksilöllinen numerotunnus, joka tulee olla merkittynä itse säteilynlähteeseen sekä kaiverrettuna tai leimattuna säteilylähteen suojukseen. Mikäli edellä mainitut merkitsemistavat eivät käytännössä ole mahdollisia, tulee tuolloin asiakirjoista ja tarvittaessa kuljetussuojuksista käydä ilmi lähteen tiedot.

Toiminnanharjoittajan on pidettävä ajantasaista kirjanpitoa vastuullaan olevista säteilylähteistä sekä niiden vastaanotoista ja luovutuksista mukaan lukien säteilylähteiden aktiivisuudeltaan alle vapaarajan olevat säteilylähteet. Säteilylähteiden vastaanotot ja luovutukset on tehtävä vastaavan johtajan valvonnassa. (STUK 2016)

## 4.5 Umpilähteen käytöstä poistaminen

Toiminnanharjoittajan vastuulla on huolehtia umpilähteistä ja umpilähteitä sisältävistä laitteista läpi laitteen elinkaaren. Laitteen käytöstä poisto suoritetaan turvallisuusluvas- sa nimetyn vastaavan johtajan valvonnassa, jotta säteilylähteen katoamisen riski pienee.

Käytöstä poistetut umpilähteet on palautettava lähteen valmistajalle tai toimittajalle. Mikäli toimittaja ei voi vastaanottaa säteilylähdettä voidaan ne vaihtoehtoisesti toimittaa tunnustettuun laitokseen, joka tekee radioaktiivisen jätteen vaarattomaksi. STUKille on tehtävä ilmoitus kahden viikon kuluessa umpilähteen luovutuksesta.

Korkea-aktiivisten umpilähteiden käytöstä poistossa umpilähde on palautettava ensisijaisesti vastaanottositoumuksen antajalle (lähteen valmistaja tai toimittaja), jolloin STUK vapauttaa toiminnanharjoittajan taloudellisen vakuuden sen jälkeen, kun vastaanottajan antamalla todistuksella on osoitettu, että käytössä olleesta umpilähteestä on huolehdittu asianmukaisesti. (STUK 2016)

## 4.6 Radioaktiivisen aineen kuljettaminen

Veren gammasäteilytykseen tarvittava cesium-137 kuljetetaan sitä tarvitsevalle toiminnanharjoittajalle maanteitse, jolloin cesium-137:n kuljetus on altis lainvastaiselle toiminnalle.

Kuljetuksen keskeinen turvallisuusperiaate on suojata kuljetushenkilökunta, muut ihmiset ja ympäristö radioaktiivisen aineen lähettämältä säteilyltä. Kuljetuksesta huolehtivan organisaation tulee varautua häirintään ja pyrkiä estämään tahalliset vahingonteot, ja kuljettajalla on oltava tarvittava pätevyys vaarallisten aineiden kuljetukseen.

Ajoneuvoissa on oltava radioaktiivista ainetta koskevat merkinnät. Lisäksi ajoneuvoissa on oltava määräysten edellyttämät varusteet ja turvallisuusohjeet, joiden mukaan kuljettava lasti on kuormattu turvallisesti ja umpilähteen vahingoittuminen, katoaminen ja luvaton käyttöönotto on tehokkaasti estetty kuljetuksen ajan. On myös tärkeätä, että kuljetuksesta vastaavat organisaatiot ovat luotettavia ja niillä on riittävä pätevyys ja resurssit tehtävien hoitamiseen. Kuljetusta suorittavalla kuljettajalla on oltava Liikenteen turvallisuusviraston (Trafi) hyväksymä ADR-lupa, joka kattaa radioaktiiviset aineet, tai tiedostava koulutus. (STUK 2016)

Suomessa vaarallisten ja radioaktiivisten aineiden kuljettamista valvovat pääsääntöisesti poliisi ja Trafi, joiden kanssa STUK toimii yhteistyössä.

Yhdysvallat on kiristänyt gammasäteilyttimien turvajärjestelyjä NRC:n (National Research Council) vuonna 2008 tekemän raportin suositusten mukaisiksi. Toiminnanharjoittajien vähimmäisturvallisuustasoon tulee kuulua verkkokalvo- tai sormenjälkitunnistimet, erikoiskoulutus ja työntekijöiden taustan tarkastaminen. Lisäksi cesium-137 -säteilytintä käyttävien toiminnanharjoittajien on noudatettava erinäisiä protokollia, kuten GPS-seurantaa, taatakseen turvallisen kuljetuksen.

Mikäli säteilylähde (säteilytin) joudutaan siirtämään kaupunkialueella, kuten New Yorkissa, kadut tulee sulkea lainvalvojan toimesta. Lainvalvoja valvoo ja turvaa siirron myös silloin, kun säteilylähde siirretään rakennuksesta kuljetuksen suorittavaan kulkuneuvoon. (Bakken et al. 2013)

## 4.7 Valvonta

Umpilähteelle on tarvittaessa tehtävä pyyhintäkoe, kun

- umpilähde tai sen välittömässä läheisyydessä olevia osia irrotetaan huollon tai muun syyn vuoksi
- umpilähde vaihdetaan
- umpilähde luovutetaan toiselle toiminnanharjoittajalle ja edellisestä pyyhintäkokeesta on yli vuosi aikaa
- ympäristöolosuhteet (esim. syövyttävät aineet, kosteus, lämpötila, värinä) tai muut syyt ovat haitallisesti vaikuttaneet umpilähteen tiiviyteen
- kiinteästi asennettu umpilähteen sisältävä laite irrotetaan käyttöpaikaltaan esimerkiksi varastoinnin, kuljetuksen tai käytöstä poiston jälkeen.

Tämän lisäksi umpilähteelle on tehtävä säännöllisesti viiden vuoden välein standardin ISO 9978 mukainen tai muu soveltuva pyyhintäkoe, kun kyseessä on kuljetettava säteilylähde.

Pyyhintäkoenäyte on pyrittävä ottamaan umpilähteen pinnalta tai sen välittömästä ympäristöstä. Mikäli umpilähteen on todettu vuotavan, pyyhintäkoenäyte on otettava lähimmäistä saavutettavissa olevista osista, joihin umpilähde on voinut vuotaa ja asiasta on välittömästi ilmoitettava STUKille. Umpilähteiden pyyhintäkokeista on aina pidettävä kirjaa. (STUK 2016)

Uuden säteilylakiluonnoksen mukaan korkea-aktiivisten säteilylähteiden valvonta ja tarkkailu tulee tiukentumaan sekä korkea-aktiiviselle umpilähteelle asetettava taloudellinen vakuus tulee muuttumaan ja koskemaan sellaisia toimijoita, joilta sitä ei ole aiemmin vaadittu. Lisäksi säteilylakiluonnoksen mukaan korkea-aktiivisen umpilähteen käyttäjien tulisi arvioida vaihtoehdot käyttää korkea-aktiivisen umpilähteen sijaan muuta menetelmää. Veren säteilyttämisessä vaihtoehtoinen menetelmä korkea-aktiiviselle umpilähteelle on röntgensäteilyyn perustuva säteilyttäminen. Röntgensäteilyyn perustuvaan säteilyttämiseen siirtyessä kustannukset helpottuisivat merkittävästi valvonnan, turvajärjestelyiden, kuljetusjärjestelyiden sekä säännöllisten vuototestien osalta. Vaihtoehtoisen röntgensäteilyttämisen seurauksena myös riski säteilyturvallisuuspoikkeamiin ja niistä aiheutuviin haittoihin pienenesi. (STUK 2018c)

## 4.8 Kustannukset

Yksi toiminnanharjoittaja teki Nuklex AB:lle tarjouspyynnön uudesta gammasäteilyttimestä ja vanhan säteilyttimen poisviennistä. Nuklex AB antoi tarjouksen vain uudesta laitteesta (Gammacell). Kustannusarvio oli 290 000–300 000 €.

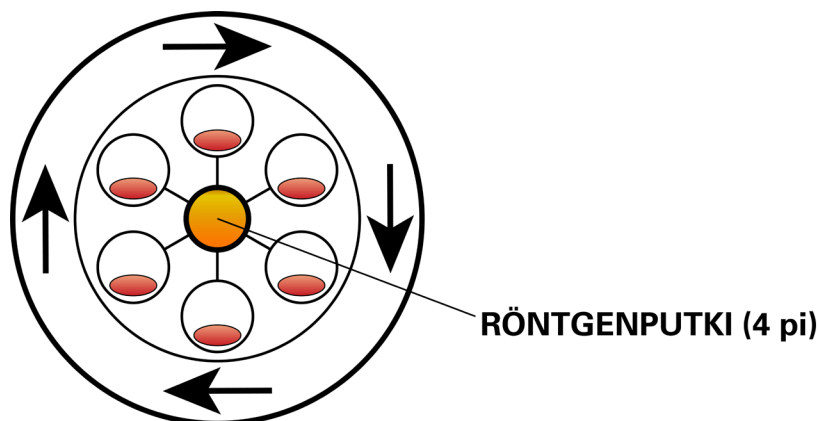
Vuosittain kustannuksia muodostuu arviolta 4 000–5 500 euroa, ja vanhan säteilylähteen kierrätys/poisto maksaa noin 50 000 euroa, jolloin gammasäteilyttimen elinkaaren aikana (15 vuodessa) kustannuksia muodostuu noin 110 000–132 500 euroa. Säteilyttimen hankintahinnan ollessa noin 290 000–350 000 euroa on gammasäteilyttimen kokonais-hinta elinkaaren aikana noin 400 000–532 500 euroa, vanhan laitteen ja säteilylähteen kierrätys mukaan lukien.

## 5 Röntgensäteilyttäminen

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota tuotetaan röntgenputkessa. Röntgenputki on tyhjiöputki, jossa on hehkukatodi ja anodi. Katodin ja anodin välille kytketään jännite, joka voi olla 5400 kV. Jännitteen vaikutuksesta hehkukatodilta irtaavat elektronit liikkuvat suurella nopeudella kohti anodia ja lopulta törmäävät siihen. Elektronien nopeuden pienentyessä osa elektronien liike-energiasta muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi, jota kutsutaan röntgensäteilyksi. (STUK 2015)

Röntgensäteilytin on eräänlainen huipputekninen laite, joka mahdollistaa in vitro- ja in vivo -olosuhteiden turvallisen säteilytyksen laboratoriossa lääketieteellisessä ja biologisessa tutkimuksessa. Veren säteilytykseen voidaan käyttää myös röntgensäteilyttämistä siihen valmistetuilla laitteilla. Röntgensäteilytin vaatii toimiakseen tasaisen veden (jäähdytys) ja sähkövirran tulon, jolloin röntgensäteilytin ei vaadi ulkoista säteilylähdettä. Röntgensäteilytin ei tarvitse erillistä säteilyturvallista tilaa, vaan säteilytin on suojattu siten, ettei säteilyä pääse ”vuotamaan” säteilytyskammion ulkopuolelle.

Verivalmistetta säteilytetään elektroneilla, jotka tulevat kahdesta vastakkain olevasta röntgenputkesta ja kahdella kartionmuotoisella palkilla varmistetaan, että verivalmisteen saama säteilyannos on tasainen ja riittävä lymfosyyttien inaktivoimiseen. Isoimmissa säteilyttimissä, kuten RS 3400:ssa, verivalmisteen laitetaan litran vetoisuudelta oleviin putkiin, jotka asetetaan säteilykammioon (kuva 2). Säteilytyskammiossa sijaitsevat putket pyörivät kehtomaisesti kehää ympäri, jolloin varmistetaan, että säteilytettävä veri saa tasaisen säteilyannoksen (röntgenputki 4 pi on sijoitettu kehän keskelle). (Rad Source Technologies 2018)

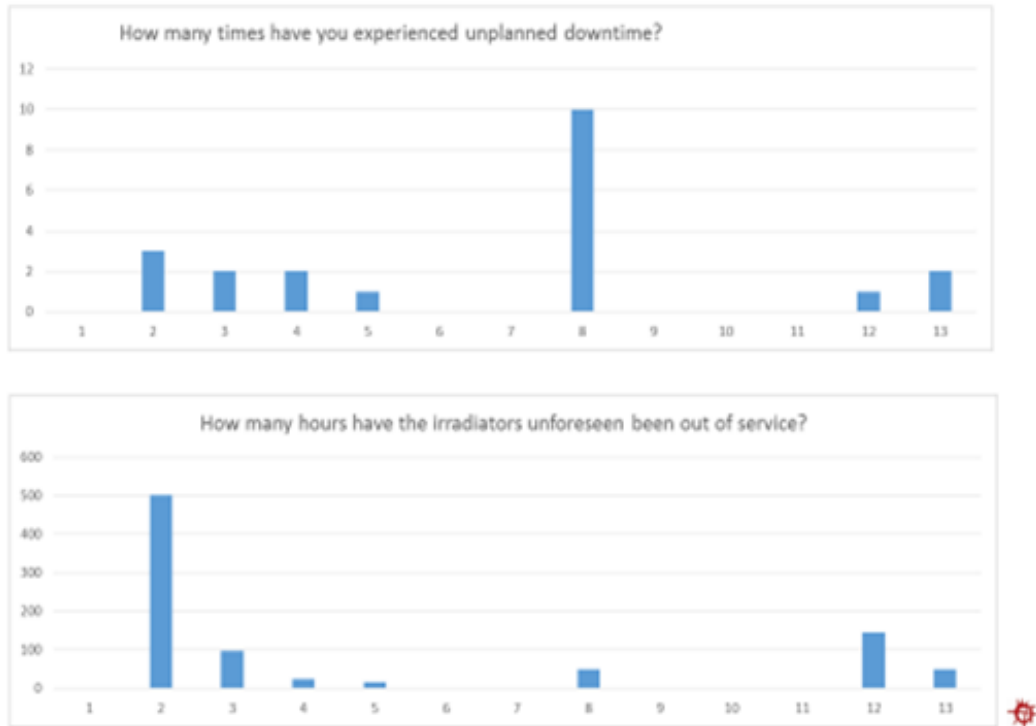


Kuva 2. RS 3400-röntgensäteilyttimen säteilykammio.

## 5.1 Toimintavarmuus

STUK lähetti Norjaan NRPA:lle (Norwegian Radiation Protection Authority) kyselyn röntgensäteilyttimien toimintavarmuudesta keväällä 2018. NRPA lähetti tilastointia röntgensäteilyttimien toimintahäiriöistä, käyttökatkoista ja siitä, kuinka kauan laitteet ovat olleet huollon tai laitevian aikana pois käytöstä. Tilastot ovat vuosilta 2015–2016, jonka aikana Norjalla on ollut röntgensäteilyttimet käytössä (kuvat 3 ja 4).

### Unforeseen downtime



Kuva 3. NRPA:n keräämää tietoa röntgensäteilyttimien toimintavarmuudesta.

## Reasons for unforeseen downtime

### Hospital with 500 hours downtime:

- "Circuit board error resulted in the generator breaking down. The machine came with a malfunction, but fluctuation of voltage in the building was probably a contributing factor. Time consuming troubleshooting/(defaulting) and demands for authorized technical operators, in combination with need of spare parts from Canada, result in significant vulnerability."

### Hospital with 144 hours downtime:

- "Power failure lead to technical issues, had to wait for spare parts from Canada."

### Hospital with unforeseen downtime 10 times:

- "Technical failures"

### Other hospitals:

- "Poor training of staff"
- "Challenges with the machine"



**Kuva 4.** NRPA:n keräämää tietoa röntgensäteilyttimien toimintahäiriöiden syistä.

Yhteenvetona NRPA kertoi, että röntgensäteilytystä käyttävät toiminnanharjoittajat ovat olleet tyytyväisiä nykyisiin laitteisiinsa. NRPA epäili toiminnan alussa isoimman ongelman olevan osaamisen puute röntgensäteilyttimen käytössä ja siinä, että laiterikon aikana tarvittavia varaosia ei ollut Norjassa, vaan ne piti tilata Kanadasta. (Øvergaard 2018, Ramberg 2018)

Suomessa solujen ja pienkoe-eläinten säteilytyksessä käytettävä Multirad 350 -säteilyttimessä on ollut ongelmia laitteen ohjelmiston epävakaudessa ja korkeajännitegeneraattorissa. Korkeajännitegeneraattori hajosi aamulämmityksen aikana ja tuolloin huollon kesto oli noin 6 viikkoa. Vastaavanlainen tilanne verensäteilyttimen kanssa olisi erittäin haitallista toiminnanharjoittajalle. MultiRad 350 -säteilytin oli tullut markkinoille toiminnanharjoittajan hankkiessa sen 2,5 vuotta sitten. (STUK 2018a)

## 5.2 Röntgensäteilyttimien tietoja

Röntgensäteilyttimien valmistajia ovat

- Rad Source Technologies LLC., USA (laite: RS 3400).
- Best Theratronics Ltd, Kanada (laitteet: Raycell Mk2 2,0, Raycel Mk2 3.5 ja Raycell Mk 1).



**Taulukko 6.** Röntgensäteilyttimien vertailu. Valmistajat: Best Theratronics Ltd ja Radsorce LLC.

	<b>Raycell Mk2 (2,0 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk2 (3,5 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk1 (liikuteltava)</b>	<b>RS 3400</b>
Koko	K 1525 mm L 1450 mm S 1000 mm	K 1525 mm L 1450 mm S 1000 mm	K 1255 mm L 1450 mm S 975 mm	K 1910 mm L 1200 mm S 890 mm
Paino	1000 kg Lattia 111kg/cm <sup>2</sup>	1000 kg Lattia 111kg/cm <sup>2</sup>	600 kg Lattia 76 kg/cm <sup>2</sup>	1111 kg
Sähkö	Yksivaihe 60 Hz, 60 A tyypillisesti 240 V Kolmivaihe 50 Hz, 25 A tyypillisesti 400 V	Yksivaihe 60 Hz, 60 A tyypillisesti 240 V Kolmivaihe 50 Hz, 25 A tyypillisesti 400 V	Yksivaihe 60 Hz, 21 A tyypillisesti 208 V Yksivaihe 50 Hz, 19 A tyypillisesti 230 V	Yksivaihe 50–60 Hz, 30 A, 208–240 V
Vesi	10 L / min 35–60 psi jatkuva	10 L / min 35–60 psi jatkuva	Oma vesisäiliö (ei vaadi vesijohtoon liittämistä)	Oma vesisäiliö 37,85 L (ei vaadi vesijohtoon liittämistä)
Säteilytys- kyky	2,0 L versio, aika 25 Gy keskiannokselle noin 2,8 min	3,5 L versio, aika 25 Gy keskiannokselle noin 4,9 min	1,7 L, aika 25 Gy keskiannokselle noin 5 min	6 x 1 L säiliötä, aika 25 Gy keskiannokselle alle 5 min

### 5.3 Säteilytyskyky

Keväällä 2018 tehdyn kyselyn perusteella verta säteilytetään viikon aikana keskimäärin noin 100–370 pussia riippuen toiminnanharjoittajasta. Vuorokauden aikana yhden verensäteilyttimen tulisi säteilyttää 14–53 pussia, mikä vastaa punasoluissa noin 3,6–13,8 litraa ja trombosyyteissä 14–53 pussia vastaa taas 4,4–15,9 litraa.

Punasolujen tilavuus yhdessä pussissa on 260 ml mikä vastaa yhtä yksikköä ja trombosyyttien tilavuus yhdessä pussissa on 300 ml, mikä vastaa neljää yksikköä.

Mikäli kyseinen 14–53 pussia päivässä säteilytettäisiin Best Theratronics Ltd:n Raycell Mk2:lla (2,0 L- ja 3,5 L -versiot), Raycell Mk1:llä tai Radsorce LLC:n RS 3400:llä tulokset olisivat seuraavat (taulukot 7 ja 8).

**Taulukko 7.** Aikavertailu: 14 verivalmistepussin säteilytys 25 Gy:n keskiannoksella. Vertailussa Best Theratronics Ltd:n ja Radsorce Technologies LLC:n röntgensäteilyttimet .

<b>Vuorokaudessa</b>	<b>Raycell Mk 2 (2,0 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk2 (3,5 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk1, 1,7 L (liikuteltava)</b>	<b>RS 3400, 6 x 1 L</b>
Punasoluja 14 pss	6 min	10 min	15 min	5 min
Trombosyytit 14 pss	9 min	10 min	15 min	5 min

**Taulukko 8.** Aikavertailu: 53 verivalmistepussin säteilytys 25 Gy:n keskiannoksella. Vertailussa Best Theratronics Ltd:n ja Radsorce Technologies LLC:n röntgensäteilyttimet.

<b>Vuorokaudessa</b>	<b>Raycell Mk 2 (2,0 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk2 (3,5 L -versio)</b>	<b>Raycell Mk1, 1,7 L (liikuteltava)</b>	<b>RS 3400, 6 x 1 L</b>
Punasoluja 53 pss	20 min	20 min	45 min	15 min
Trombosyytit 53 pss	23 min	25 min	50 min	15 min

## 5.4 Toiminnanharjoittaja

Säteilyä käyttävän toiminnanharjoittajan on haettava kirjallisesti turvallisuuslupaa STUKilta ennen säteilyn käyttöönottoa. Turvallisuuslupahakemuksessa on nimettävä vastaava johtaja. Mikäli turvallisuuslupa haetaan usean vastuuyksikön tai käyttöpaikan yhteiseksi, tulee tuolloin olla vastuuyksikköjen tai käyttöpaikkojen yhteinen toimintajärjestelmä, toimintojen keskitetty sisäinen valvonta sekä asianmukainen ja dokumentoitu käyttöorganisaatio vastuuhenkilöineen. Tällöin on nimettävä vastaavan johtajan avuksi käyttöpaikalle vastuuhenkilöitä. Toiminnanharjoittajalla tulee olla käytössään riittävä asiantuntemus (lääketieteellisen fysiikan asiantuntija, sairaalafysikko). (STUK 2011)

## 5.5 Kustannukset

Röntgensäteilyttimen kustannusten selvittämiseksi STUK lähetti kyselyn keväällä 2018 norjalaiseen sairaalaan, NNSA:lle (National Nuclear Security Administration, USA) ja Nuklex AB:lle.

Norjalaisen sairaalan käytössä olevalle röntgensäteilyttimelle on tehty Best Theratronicsin kanssa huoltosopimus, joka maksaa vuodessa 265 000 Norjan kruunua, johon on laskettu mukaan huoltoinsinöörien matkakustannukset 10 000 Norjan kruunua (hinnat ilman arvonlisäveroa). Eli kokonaisuudessaan hinta vuoden 2017 huolloille on noin 27 500 euroa, johon kuuluu huoltoinsinöörien matkakulut noin 1 000 euroa.

NNSA kertoi röntgensäteilyttimien hinnan olevan noin 250 000–350 000 dollaria (200 000–285 000 euroa). Vuosittaiset huoltokustannukset määräytyvät aina säteilyttimen käytön mukaan, mutta huolto maksaa vuosittain noin 6 000–20 000 dollaria (n. 5 000–16 000 euroa). Normaalilla käytöllä röntgensäteilyttimen röntgenputkien arvioitu elinikä on 10–15 vuotta ja putket ovat vaihdettavissa uusiin. Lisäksi vedestä ja sähköstä muodostuu vuosittaisia kustannuksia, joita on vaikea arvioida.

Rad Source-laitevalmistajan röntgensäteilyttimen vuosittainen huolto maksaa noin 15 000 euroa (kiinteä hinta). Huoltosopimukseen sisältyy tarvittavat varaosat ja uusi röntgenputki.

Suomessa käytössä oleva solujen ja pienkoe-eläinten röntgensäteilytin (Faxitronin valmistama MultiRad 350) on ollut käytössä vuodesta 2016 saakka. Säteilyttimessä on ollut paljon ongelmia ohjelmiston ja tekniikan kanssa. Toiminnanharjoittajalla on säteilyttimelleen minimihuoltosopimus, jonka vuosittainen kustannus on noin 2 900 euroa. Muita kustannuksia, kuten sähkön tai veden kulutusta, ei toiminnanharjoittaja ole seurannut.

Röntgensäteilyttimen elinkaari on noin 10–15 vuotta. Elinkaaren pituus riippuu koneen käyttöasteesta. Säteilyttimen elinkaaren aikana kustannuksia muodostuu huoltosopimuksista/varaosista, jotka tekevät 15 vuodessa noin 73 000–398 000 euroa (minimi–maksimi). Röntgensäteilyttimen hinnan ollessa noin 204 000–285 000 euroa on tuolloin kokonaiselinkaarikustannus 15 vuodessa noin 277 000–683 000 euroa. Elinkaaren kustannuksissa ei ole huomioitu veden ja sähkön kulutusta, henkilökunnan palkkoja ja mahdollisia tilojen vuokria.

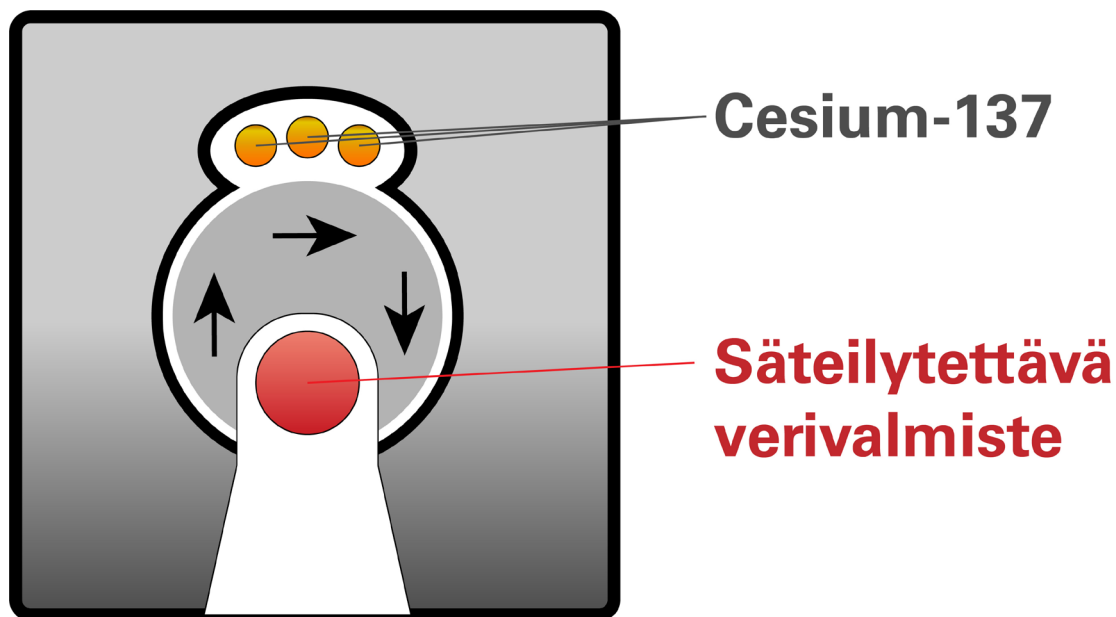
Jos elinkaaren laskee Rad Sourcen röntgensäteilyttimen 15 vuoden käyttöiän perusteella ovat kustannukset seuraavanlaiset: laitteen hankintahinta noin 204 000–285 000 euroa, vuosittainen huolto 15 000 euroa, joka on 15 vuoden aikana 225 000 euroa. Tuolloin säteilyttimen kokonaisarvio 15 vuoden käyttöiällä on noin 429 000–510 000 euroa. Elinkaaren kustannuksissa ei ole huomioitu veden ja sähkön kulutusta, henkilökunnan palkkoja ja mahdollisia tilojen vuokria. (Hacher 2018)

## 6 Säteilyturvallisuus gamma- ja röntgensäteilyttimellä

Verensäteilyttimellä työskentely ei vaadi erityisiä säteilysuojaimia tai muita vastaavia erityisjärjestelyjä, kuten sädehoidossa tai isotooppilaboratoriossa työskentely vaatii ohjeen ST 1.6 mukaan. Myöskään henkilöstöä ei tarvitse luokitella säteilytyöluokkaan A tai B, joissa työntekijöille on järjestettävä säteilyaltistuksen ja terveydentilan seuranta säteilytyöluokan perusteella. (STUK 2004; STUK 2009)

### 6.1 Käyttöpaikka

Gamma- tai röntgensäteilyttimien käyttö ei vaadi erillistä säteilysuojelutilaa. Molemmat säteilyttimet on rakennettu siten, ettei säteilyä pääse vuotamaan säteilykammion ulkopuolelle (kuva 5). Tämä mahdollistaa sen, että säteilyttimen voi asentaa laboratoriotilaan ilman rakenteellisia muutoksia. Gammasäteilyttimillä korkea-aktiivisen umpilähteen aiheuttama säteily pidetään säteilykammiossa vankalla suojauksella ja yksinkertaisella tekniikalla, kun taas röntgensäteilyttimellä säteily katkeaa heti säteilykammion luukun auetessa tai kun katkaistaan virta.



Kuva 5. GSR C1 -säteilykammion rakenne.

Gammasäteilyttimen asennuksessa, sijoittelussa ja valvonnassa on kuitenkin huomioitava se, että säteilytin kuuluu turvajärjestelyjen tasoon B tai A (A on korkein) säteilylähteensä vuoksi. Cs-137-säteilylähteet kuuluvat turvajärjestelyjen tasoon A silloin, kun umpi- tai avolähteen aktiivisuus on suurempi tai yhtä suuri kuin  $1 \cdot 10^{14}$  Bq). (STUK 2017)

Turvajärjestelyjen taso A:ssa tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- Toiminnanharjoittajan on pidettävä ajantasaista kirjaa säteilylähteiden ja -laitteiden tarkistuksesta, vastaanotosta, luovuttamisesta ja kirjanpidosta.
- Pääsyä säteilylähteen luokse tulee valvoa ja rajoittaa kulunvalvonnalla, jotta asiattomat henkilöt eivät pääse käsiksi säteilylähteeseen.
- Toiminnanharjoittajan tulee laatia turvajärjestelysuunnitelma, jossa kuvataan turvajärjestelyiden menettelyt, vastuujaoit ja tehtävät. Turvajärjestelysuunnitelmaa laadittaessa toiminnanharjoittajan on keskusteltava paikallisen poliisin kanssa ja sovittava menettelyistä erityyppisissä tilanteissa ja turvajärjestelysuunnitelman ajantasaisuus on tarkistettava säännöllisesti (kerran vuodessa).
- Säteilylaite tulee turvata rakenteellisilla esteillä, joiden tarkoituksena on vaikeuttaa ja hidastaa pääsyä säteilylähteen luokse ja siten pyrkiä estämään lähteen luvaton haltuunotto tai lähteeseen kohdistuva vahingonteko.
- Säteilyn käyttöpaikka on varustettava etävalvontakameralla tai jollain vastaavalla menettelyllä, jolla hälytyksen syy voidaan varmentaa viivytyksettä. Myös paikallisen poliisin kanssa on sovittava menettelyt, joilla varmistetaan viivytyksetön ilmoitus havainnoista poliisille.

Röntgensäteilytin ei vaadi erityisiä turvajärjestelysuunnitelmia tai vastaavia järjestelyjä toiminnanharjoittamisessa. (STUK 2017)

## 7 Johtopäätökset

Verensäteilyttimet ovat laboratoriossa käytettäviä säteilyttimiä, joiden on tarkoitus olla varmatoimisia, helpokäyttöisiä, turvallisia ja säteilyannoksen tulee olla 25 – 50 Gy. Gammasäteilyttimiä on ollut pitkään käytössä ja niitä on edelleenkin maailmassa enemmän kuin röntgensäteilyttimiä. Gammasäteilyttimen säteilylähteenä toimiva cesium-137 on korkea-aktiivinen umpilähde, joka tuotetaan ydinpolttoaineen jätteestä. Cesium-137 sopii hyvin veren säteilyttämiseen sen gammasäteilyn ja pitkän puoliintumisajan vuoksi.

Gammasäteilyttimen ylläpito on hieman edullisempaa verrattuna röntgensäteilyttimen ylläpitoon, mutta gammasäteilyttimen vaatima säteilylähde (cesium-137) pakottaa säteilyä käyttävän organisaation vähintään turvajärjestelytaso B:hen. Kun taas röntgensäteilytin on ns. ”vihreä” ja turvallinen vaihtoehto gammasäteilyttimelle. Lisäksi tulevan säteilylakimuutoksen myötä vaatimukset tulevat tiukentumaan korkea-aktiivisten umpilähteiden käytön ja kuljetuksen osalta.

Röntgensäteilyttimen elinkaarikustannus (15 vuotta) on suunnilleen 276 854–682 526 euroa (ei ole huomioitu veden- ja sähkönkulutusta, henkilöstön palkkoja ja mahdollisia tilojen vuokria), kun taas gammasäteilyttimen elinkaarikustannus (15 vuotta) on noin 400 000–532 500 euroa (ei ole huomioitu sähköä, henkilöstön palkkoja ja mahdollisia tilojen vuokria). Näin ollen röntgensäteilyllä veren säteilyttäminen maksaa 15 vuoden elinkaaren aikana 150 026 euroa enemmän. Se tekee yhdessä vuodessa noin 10 002 euroa ja kuukaudessa taas 834 euroa.

Jos toiminnanharjoittajalla on käytössään Rad Sourcen röntgensäteilytin (huolto kiinteähintainen, sisältäen varaosat ja röntgenputken), kustannusarvio elinkaaren aikana (15 vuotta) gammasäteilyttimellä on noin 19 490 euroa suurempi, joka tekee noin 1 299 euroa vuodessa ja kuukaudessa noin 108 euroa.

Verensäteilytinvalmistajien antamien tietojen mukaan tehdyssä säteilyttämisaajan vertailussa huomio kiinnittyi röntgensäteilyttimen nopeuteen veren säteilyttämisessä, mikäli vertailee Rad Source Technologies LLC:n RS 3400 (6 L) -säteilytintä vs. Gamma-Service Medical GmbH:n Biobeam BM 8000 (7,5 L) -säteilytintä (taulukko 9).

**Taulukko 9.** Röntgen- ja gammasäteilyttimen aikavertailu (isot säteilyttimet).

	<b>Röntgensäteilytin</b>	<b>Gammasäteilytin</b>
<b>Säteilytin</b>	<b>RS 3400 (6 L)</b>	<b>Biobeam GM 8000 (1,3 L, 5,1 L, 7,5 L)</b>
Punasoluja 14 pss	5 min	15 min (5 Gy/min) 9 min (2,8 Gy/min) 10 min (2,6 Gy/min)
Punasoluja 53 pss	5 min	74 min (5 Gy/min) 34 min (2,8 Gy/min) 26 min (2,6 Gy/min)
Trombosyytit 14 pss	15 min	20 min (5 Gy/min) 9 min (2,8 Gy/min) 10 min (2,6 Gy/min)
Trombosyytit 53 pss	15 min	65 min (5 Gy/min) 36 min (2,8 Gy/min) 30 min (2,6 Gy/min)

Kun taas pienemmän vetoisuuden omaavan säteilyttimen aikavertailussa Gamma-Service Medical GmbH:n GSR C1 (3,8 L) -säteilytin oli aina muutaman minuutin nopeampi kuin Best Theatronics Ltd:n valmistama Raycell Mk2 (3,5 L versio) -säteilytin (taulukko 10).

**Taulukko 10.** Röntgen- ja gammasäteilyttimen aikavertailu (pienet säteilyttimet).

	<b>Röntgensäteilytin</b>	<b>Gammasäteilytin</b>
<b>Säteilytin</b>	<b>Raycell Mk2 (3,5 L)</b>	<b>GSR C1 (3,8 L)</b>
Punasoluja 14 pss	10 min	17 min (1,5 Gy/min) 8 min (3 Gy/min) 4 min (6 Gy/min)
Punasoluja 53 pss	10 min	68 min (1,5 Gy/min) 32 min (3 Gy/min) 16 min (6 Gy/min)
Trombosyytit 14 pss	20 min	34 min (1,5 Gy/min) 16 min (3 Gy/min) 8 min (6 Gy/min)
Trombosyytit 53 pss	25 min	85 min (1,5 Gy/min) 40 min (3 Gy/min) 20 min (6 Gy/min)

Laitevalmistajien antamien tietojen perusteella tehdyissä säteilytysaikavertailuissa voidaan todeta, että röntgensäteilyttäminen on yhtä tehokasta ja nopeaa kuin gammasäteilyttimillä suoritettava veren säteilyttäminen.

Kokonaisuutena röntgensäteilyttimen elinkaarikustannukset ja säteilyttämiskyky vastaavat hyvin paljon gammasäteilyttimen kustannuksia ja säteilytyskykyä, kun huomioidaan hinnassa korkea-aktiivisen umpilähteen poiston kustannukset. Kun verensäteilyttimiä tarkastellaan säteilyturvallisuuden kannalta, vie tuolloin röntgensäteilytin säteilyturvallisudellaan voiton. Säteilyttimien vertailussa on hyvä huomioida gammasäteilyttimen umpilähteen puoliintumisaika, joka kasvattaa vuosittain säteilyttämisaikaa, kun röntgensäteilyttimen säteilytysaika ei kasva vaan pysyy vakiona vuodesta toiseen.

Röntgensäteilyttimen käytössä tulee ottaa huomioon koneen lämmitys, joka kestää 30 min. Kyseisiä säteilyttimen lämmityksiä ei tarvitse tehdä gammasäteilyttimellä ja täten gammasäteilytin on aina toimintavalmiina veren säteilytykseen. Lisäksi röntgensäteilyttimen käytössä on huomioitava, että säteilyttimelle on taattu jatkuva virran saanti ja käyttöpaikalla on sähkökatkojen aikana toimiva varavirtageneraattori. Mikäli sähkökatko tulee juuri säteilytyksen aikana ja säteilyttimessä ei ole varavirta-akkua, joka varmistaisi

säteilytyksen jatkuvuuden, on riski että pienenkin sähkökatkon aikana säteilytys katkeaa ja säteilytettävä verivalmiste ei saa tarvitsemaansa säteilyannosta lymfosyyttien inaktivoimiseen. Tällöin verivalmiste on käyttökelvoton. Edellä mainittua ongelmaa ei ole gammasäteilyttimellä, koska säteilyttimen säteilylähteenä toimii umpilähde (cesium-137) ja säteilytin pystyy jatkamaan säteilyttämisen loppuun. Säteilyttimien käyttötarkoituksessa tulee huomioida myös verivalmisteiden Ad hoc -tilaukset. Mikäli verivalmisteen tulee olla heti saatavilla, niin tuolloin röntgensäteilytin ei mahdollisesti ole parhain vaihtoehto säteilytykseen.

Eri maiden toiminnanharjoittajille ja laitevalmistajille tehtyjen kyselyjen perusteella voidaan todeta, että gammasäteilyttimet pystytään korvaamaan röntgensäteilyttimillä eikä kustannusten ero ole merkittävä laitteiden elinkaaren aikana. Lisäksi toiminnanharjoittajat ovat olleet tyytyväisiä laitteen käyttöominaisuuksiin ja siihen ettei röntgensäteilytin tarvitse niin mittavia turvajärjestelyitä ja säteilyttämisen riskit ovat minimaaliset gammasäteilyttimiin verrattuna. Laitevalmistajan antamien tietojen perusteella röntgensäteilyttimien myynti on kasvamassa, mikä voi mahdollisesti johtaa siihen, että veren säteilyttäminen gammasäteilyttimillä on hiipumassa ja tämän seurauksena laitevalmistajat alkavat hiljalleen karsimaan gammasäteilyttimien valmistusta ja keskittyvät röntgensäteilyttimien valmistamiseen ja myyntiin.

## 8 Kirjallisuusviitteet

Bakken E, Cary K, Derrick A, Hildebrand E, Schroeckenthaler K and Taalbi M, 2013. Cost-benefit analysis of switching from cesium-chloride to X-ray blood irradiators. University of Wisconsin-Madison. Saatavissa: <https://www.lafollette.wisc.edu/images/publications/cba/2013-irradiators.pdf>

Berglund J, Best Theratronics Ruotsi 2.3.2018. Henkilökohtainen keskustelu sähköpostitse.

Hacher K, Rad Source Technologies 1.3.2018. Henkilökohtainen keskustelu sähköpostitse.

IAEA, 2005. Gamma irradiators for radiation processing. IAEA Brochure. Vienna: International Atomic Energy Agency. Saatavissa: <http://www-naweb.iaea.org/naweb/iachem/Brochgamairradd.pdf>

Korpela H and Markkanen M, 2011. Incident involving a blood irradiator. Poster in IAEA Conference 2011. Saatavissa: <https://gnssn.iaea.org/CSN/Abu%20Dhabi%20Conference/Shared%20Documents/Posters/IAEA-CN-204-135%20Finland%20Korpela.pdf>

Kramer D, 2017. Push to purge cesium irradiators gains momentum. Physics Today, 24 Oct 2017. American Institute of Physics. Saatavissa: <http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.2.20171024a/full/>

Moore GM and Pomper MA, 2015. Permanent risk reduction: A roadmap for replacing high-risk radioactive sources and materials. Middlebury Institute of International Studies at Monterey. pp. 7–8. Saatavissa: <https://www.nonproliferation.org/wp-content/uploads/2015/07/Pomper-Moore-2015.pdf>

NTI, 2017. Dealing with the double-edged sword of cesium blood irradiation. Washington: Nuclear Threat Initiative. Saatavissa: <http://www.nti.org/analysis/articles/dealing-double-edged-sword-cesium-blood-irradiation/>

Øvergaard S, NRPA 19.2.2018. Henkilökohtainen keskustelu sähköpostitse.

Øvergaard S, Saxebol G, 2013. Norway is phasing out gamma based blood irradiators. European Alara Network Newsletter. Issue 33. Saatavissa: <https://www.eu-alara.net/images/stories/Newsletters/Newsletter33/4-norway%20is%20phasing%20out%20gamma%20based%20blood%20irradiators.pdf>

PubChem, 2018. Cesium-137. Open chemistry database. Modify date 2018-06-02. Saatavissa: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5486527#section=Top>



Punainen Risti, 2016. Verivalmisteiden käytön opas 2016. Päivitetty 01/2018. Saatavissa: <http://view.24mags.com/mobilev/06245f57f379dc98aaf1f0ac499b932e#/page=1>

Rad Source Technologies, 2018. RS3400 X-ray blood irradiator. Product overview. Saatavissa: <http://www.radsources.com/blood-irradiator/>

Ramberg K, norjalainen toiminnanharjoittaja 28.2.2018. Henkilökohtainen keskustelu sähköpostitse.

STUK, 2004. Säteilyn käyttö. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjan kirja nro 3. Luku 5.10: Säteilynsuojelutoimet työpaikalla. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/sateilyn-kaytto>.

STUK, 2009. Säteilyturvallisuus työpaikalla. Ohje ST 1.6. (10.12.2009).

STUK, 2011. Säteilynkäyttöorganisaatio. Ohje ST 1.4. (2.11.2011).

STUK, 2012a. Suojelutoimet säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa. Ohje VAL 1. (5.10.2012). Luku 6: Pääsyn rajoittaminen alueelle. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/documents/12547/103518/ohje-val1.pdf/7c9ef0ff-6a3a-47dd-b08d-d1fb5c197bd5>

STUK, 2012b. Suojelutoimet säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa. Ohje VAL 1. (5.10.2012). Luku 3: Säteilyn terveystehot. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/documents/12547/103518/ohje-val1.pdf/7c9ef0ff-6a3a-47dd-b08d-d1fb5c197bd5> Pääsy STUK-sähköposteihin kun työsuhde loppunut

STUK, 2015. Ionisoiva säteily. www-sivu. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/ionisoiva-sateily>

STUK, 2016. Umpilähteiden ja niitä sisältävien laitteiden säteilyturvallisuus. Ohje ST 5.1. (13.9.2016).

STUK, 2017. Säteilylähteiden turvajärjestelyt. Ohje ST 1.11. (21.3.2017).

STUK, 2018a. Kysely 1: Kysely toiminnanharjoittajille röntgensäteilyttimistä.

STUK, 2018b. Kysely 2: Kysely toiminnanharjoittajille verensäteilyttimistä.

STUK, 2018c. Säteilylakiluonnos 2018, kohta 4.1.4.6 Korkea-aktiivisen umpilähteen käyttö. s. 55/343 [Viitattu 10.4.2018]

Tilastokeskus, 2018. Taulukot 2018. Available: <https://www.stat.fi/til/ton/tau.html>