

Sairaalarakennuksen säteilysuojarakenteet

Henri Iso-Tuisku

Opinnäytetyö

Toukokuu 2019

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Iso-Tuisku, Henri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2019
	Sivumäärä 79	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Sairaalarakennuksen säteilysuojarakenteet		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Jukka Konttinen, Seppo Pitkänen		
Toimeksiantaja(t) SRV Rakennus Oy		
Tiivistelmä <p>Tutkimuksen aiheena on sairaalarakennuksen säteilytilojen läpivientisuojiin suunnittelu ja toteutus. Työn tärkeyttä korostavat läpivientien puutteelliset suunnitelmat, joiden toteutukseen ei ollut saatavilla valmiita malleja. Opinnäytetyön tilaajana toimi SRV Rakennus Oy.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli toteuttaa laadukas ja turvallinen säteilysuojarakenne, jonka lopputarkastuksen suorittaa säteilyturvakeskus. Tutkimusaineiston keräämiseen käytettiin saatavilla olevia rakennussuunnitelmia, ja suunnitelmien pohjalta alettiin kehittää toimivaa ratkaisua. Tutkimuksessa käytettiin avuksi arkkitehdin ja Keski-Suomen sairaanhoitopiirin sädesairaalfyysikoiden haastatteluja sekä heidän luovuttamia aineistoja. Kerättyjen tietojen perusteella suunniteltiin ja toteutettiin läpivientisuojamalli, joka otettiin käyttöön keskussairaala Novassa.</p> <p>Tutkimuksessa tuodaan esille säteilytilojen suojauksen suunnittelun kannalta keskeisiä asioita toimivan ja optimaalisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Tutkimus tuo myös esille ongelmia ja epäkohtia liittyen säteilytiloihin ja niiden suojauksiin. Oikeilla materiaalivalinnoilla ja optimoiduilla materiaalipaksuuksilla päästään hyvään ja turvalliseen lopputulokseen, jolloin myös kustannuksissa voidaan säästää suuresti. Säteilytilojen tärkeänä suunnitteluun ja kustannuksiin vaikuttavina tekijöinä nousi esiin suunnittelijoiden ammattitaito sekä suunnitelmien lähtötietojen saatavuus ja oikeellisuus.</p> <p>Opinnäytetyön tulokset tullaan analysoimaan säteilysuojatilojen välimittausten perusteella. Välimittaukset suoritetaan sairaalfyysikoiden toimesta. Mittauksista saadaan selville, suojasivatko toteutetut rakenteet riittävästi säteilyltä. Lopulliset mittaukset suorittaa säteilyturvakeskus, kun tilat ovat valmiita.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Säteily, ionisoiva säteily, säteilysuoja, säteilysojamateriaali, läpivienti, lyijy, raskasbetoni, sairaala, keskussairaala Nova		
Muut tiedot		

Description

Author(s) Iso-Tuisku, Henri	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2019
	Number of pages 79	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: x
Title of publication Title Radiation Protection Structures for hospital building		
Degree programme Bachelor of Engineering, Civil Engineering		
Supervisor(s) Konttinen, Jukka; Pitkänen, Seppo		
Assigned by SRV Construction Ltd		
Abstract <p>The aim of the thesis was to design and implement duct protection for the radiation facilities of a hospital building. The importance of the work was emphasized by lack of plans for the implementation of the work, for which no readymade models were available. The thesis was assigned by SRV Construction Ltd.</p> <p>The main objective was to implement a high quality and safe radiation protection structure that will be measured by the Radiation and Nuclear Safety Authority. The available building plans were used to collect the research data. The building plans were also used for developing an effective solution. Interviews with the hospital physicist of the Central Finland District and the architect were used as well as the materials provided by them. Based on the collected data, a duct protection model was designed and implemented on site.</p> <p>The study emphasizes the key issues in radiation protection planning to achieve a functional and optimal outcome. The study also highlights problems and flaws in radiation facilities and their protection. With the right material choices and optimized material thicknesses, a good and safe outcome can be achieved, which can greatly save costs. As an important factor, influencing the design and cost of radiation facilities raised the need for design skills, availability of source information and correctness of plans.</p> <p>The results of the thesis will be analyzed based on the results of interim measurements of the radiation facilities, which the hospital physicist will accomplish. The measurements will show whether the implemented structures are adequately shielded from the radiation. The final measurements will be performed by the Radiation and Nuclear Safety Authority when the facilities are ready for use.</p>		
Keywords (subjects) Radiation, ionizing radiation, radiation protection, radiation protection material, duct, high density concrete, hospital, central hospital Nova		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto	8
1.1	Lähtökohdat.....	8
1.2	Työn tavoite ja rajaus	9
1.3	Kohteen esittely.....	9
1.4	Toimeksiantaja.....	11
2	Säteily	12
2.1	Mitä säteily on	12
2.2	Säteilytyypit	16
2.3	Etäisyys	19
2.4	Terveyshaitat	20
2.5	Keskussairaala Novan säteilylähteet	24
2.6	Säteilysuojelulaki	26
2.7	Säteilyturvakeskus	27
3	Säteilysuojien rakenne.....	28
3.1	Säteilysojarakenteiden suunnittelu.....	28
3.2	Sädehoitobunkkeri.....	32
3.3	Kuumasairaala	36
3.4	Säteilysojamateriaalit	40
3.5	Läpiviennit	44
4	Tutkimuksen toteutus.....	48
4.1	Tutkimusmenetelmät	48
4.2	Haastattelujen toteutus.....	49
4.3	Haastattelut	51
4.4	Mittausmenetelmät.....	52
5	Säteilymittausten tulokset	53

6	Johtopäätökset.....	54
7	Pohdinta.....	54
	Lähteet	57
	Liitteet.....	63
	Liite 1. Eri säteilylähteistä absorboituvia säteilyannoksia (Randall n.d)	63
	Liite 2. Sädehoitotila.....	64
	Liite 3. Sädehoitobunkkerin raskasbetonista valettu katon lisäsuoja.....	65
	Liite 4. Lisäsuojausta tarvinneet alueet.....	66
	Liite 5. Annosparametrit (Madsen ym. 2006).....	67
	Liite 6. Välityskertoimet (Madsen ym. 2006)	68
	Liite 7. Mallinnetut läpiviennit.	69
	Liite 8. Läpivienti seinän sisässä.	70
	Liite 9. Läpiviennit suojattava samanaikaisesti pysty- ja vaakasuuntaisesti.....	71
	Liite 10. Tarkastusluukku	72
	Liite 11. Tarkastusluukun suojaus toteutettuna	73
	Liite 12. Uusittu läpivientisuunnitelma	74
	Liite 13. Virheellinen toteutustapa	75
	Liite 14. Lyijyn valuminen	76
	Liite 15. Irtolyijyllä vuorattu läpivientiputki	77
	Liite 16. Säteilysuojaovi (Radiation Shielding n.d.)	78
	Liite 17. Haastattelurunko	79

Kuviot

Kuvio 1. Rakennustyömaan tilanne tammikuussa 2019	10
Kuvio 2. SRV VISIO 2020	12
Kuvio 3. Säteily	14
Kuvio 4. Uraanin isotoopin 238 hajoamisketju	15
Kuvio 5. Fotonin vuorovaikutus.....	18
Kuvio 6. Eri säteilytyyppien läpäisyvoima	19
Kuvio 7. Käänteisen neliön laki, säteily	20
Kuvio 8. Säteilyn painotuskertoimet w_R eri säteilylaaduille.....	21
Kuvio 9. Kudosten painotuskertoimet w_T	22
Kuvio 10. Suomalaisen saama keskimääräinen säteilyannos vuodessa	23
Kuvio 11. Sädehoitotila	34
Kuvio 12. Sädehoitobunkkerin raskasbetonista valettu katon lisäsuoja	35
Kuvio 13. Lisäsuojausta tarvinneet alueet.	36
Kuvio 14. Annosparametrit	37
Kuvio 15. Välityskertoimet	39
Kuvio 16. Lyijyn valuminen.....	41
Kuvio 17. Ainetiheydet	42
Kuvio 18. Raskasbetoniharkot, sädehoitobunkkeri	43
Kuvio 19. Mallinnetut läpiviennit	44
Kuvio 20. Läpiviennit suojattava samanaikaisesti pysty- ja vaakasuuntaisesti.....	45
Kuvio 21. Läpivienti seinän sisässä	45
Kuvio 22. Tarkastusluukun suojaus toteutettuna	45
Kuvio 23. Tarkastusluukku.....	45
Kuvio 24. Uusittu läpivientisuunnitelma	46
Kuvio 25. Virheellinen toteutustapa	47
Kuvio 26. Irtolyijyllä vuorattu läpivientiputki.....	47

Käsitteet

Säteilylaite

Laite, joka sähköisesti tuottaa säteilyä tai joka sisältää radioaktiivista ainetta (Meltti 2009).

Säteilysuojus

Säteilyn annosnopeuden pienentäminen säteilysuojuksen tai suojusten avulla (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011).

Taivassironta

Ilmakehänkautta kulkeutuneet radioaktiiviset aineet, jotka laskeutuvat maan pinnalle ja aiheuttavat ylimääräistä säteilyä (Hyvä tietää säteilystä 2007).

Isotooppi:

Samankuineen atomit voivat sisältää erimäärät neutroneita, vaikka protonimäärä pysyy samana. Tällöin puhutaan aineen eri isotoopeista (Hyvä tietää säteilystä 2007).

Radioaktiivisuus:

Atomiytimen muuttuminen toiseksi ytimiksi. Radioaktiivinen ydin lähettää muutostapahtumalle ominaista säteilyä (alfa-, beta- tai gammasäteilyä). Radioaktiivisuus on aineen ominaisuus, ei siis esimerkiksi säteilyn ominaisuus. (Hyvä tietää säteilystä 2007.)

Puoliintumisaika:

Aika, jonka kuluessa puolet radioaktiivisen aineen ytimistä on muuttunut toisiksi ytimiksi. Seuraavan puoliintumisajan aikana jälleen puolet radioaktiivisista ytimistä hajoaa pysyviksi ytimiksi jne. Puoliintumisaika vaihtelee eri aineilla sekunnin murto-osasta miljardeihin vuosiin. (Hyvä tietää säteilystä 2007.)

Ekvivalenttiannoksella

Tarkoitetaan tietylle kudokselle tai elimelle aiheutunutta haittaa. Säteilyannoksen yksikkö on sievert (Sv) ja sen kerrannaisyksiköt milliSv (0,001 Sv) ja mikroSv (0,000 001 Sv) (Suojatoimenpiteet säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa 2012.)

Annosnopeus

Annosnopeus ilmaisee, kuinka suuren säteilyannoksen ihminen saa tietyssä ajassa. Annosnopeuden yksikkö on sievertiä tunnissa (Sv/h) (Ionisoiva säteily 2015).

Kymmenespaksuus (TVL, Tenth-Value Layer)

Ainekerros, joka pienentää säteilyannoksen tai -annosnopeuden kymmenesosaan sen alkuperäisestä arvosta (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011).

1 Johdanto

1.1 Lähtökohdat

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli toimivien ja turvallisten säteilysuojatilojen läpivientien suunnittelu ja toteutus Jyväskylän keskussairaala Novassa. Tutkimuksen tarpeellisuus tuli esille syksyllä 2018 säteilysuojien toteutuksen alkuvaiheessa. Vastaan tuli kysymys siitä, ovatko nykyiset säteilysuojasuunnitelmat riittävän hyvät, sillä suunnitelmissa havaittiin puutteita sekä toteuttamattomia paikkoja. Erityisesti säteilysuojien läpiviennit olivat säteilysuojarakenteiden ongelmakohta. Suunnitelmia läpikäytävissä ja eri tilojen suojatarpeita selvittäessä tuli ilmi, että läpivienteihin suunnatut lyijysuojaukset eivät toimisi nykyisellään, vaan olisi kehitettävä toimivammat ratkaisut.

Alkuperäisiä suunnitelmia apuna käyttäen alkoi vaihtoehtoisen läpivientisuojan kehittäminen tämän opinnäytetyön muodossa. Yhteistyötä tehtiin sairaalafyysikoiden sekä arkkitehdin kanssa, joita haastatteleamalla saatiin asiantunteva näkemys toteutukseen. Toteutustapaa suunniteltiin myös rakennusvalvojen kanssa. Säteilyturvallisuus ja säteilysuojien toimivuus ovat keskeisiä asioita käyttäjien turvallisuuden, rakentamisen laadun sekä rakenteen toimivuuden kannalta. Erityisesti sairaalarakennusten rakentamisen laatu on ajankohtainen ja keskustelua herättävä aihe. Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimi SRV Rakennus Oy.

Opinnäytetyön tulokset tullaan analysoimaan saatujen säteilysuojatilojen välimitausten perusteella, jotka tekevät sairaalafyysikot. Mittauksista saadaan selville, suojasivatko toteutetut rakenteet riittävästi säteilyltä. Lopulliset mittaukset tulee suorittamaan säteilyturvakeskus kohteen ollessa käyttövalmis.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada uuden keskussairaalan säteilytiloista toimivat ja turvalliset. Opinnäytetyön aloittamiseen mennessä säteilytilojen rakennusta varten oli olemassa valmiit suunnitelmat, joiden toteutus ei käytännössä ollut onnistunut. Ongelmakohtana olivat läpiviennit, joihin tässä opinnäytetyössä erityisesti keskitytään. Läpiviennit olivat vaikein yksityiskohta säteilysuojarakenteita toteutettaessa, ja niitä oli säteilysuojatiloissa useita. Läpivienteihin oli kehitettävä toimivampi ratkaisu, joka varmistaisi niiden toimivuuden vaikeissakin paikoissa.

Työssä käydään myös läpi erilaisia säteilysuojarakenteita sekä säteilysuojarakenteiden suunnittelua ja materiaaleja. Opinnäytetyön tärkeyttä puoltaa säteilylaki sekä rakentamisen laatustandardit, ja valmiita säteilysuojarakenteita tullaan mittaamaan säteilyturvakeskuksen puolesta. Opinnäytetyö on luonteeltaan käytännönläheinen, jonka suunnitelmat ja ratkaisut sovellettiin työympäristössä. Myös haastateltavat olivat alan ammattilaisia. Valmiit ratkaisut tuovat jatkossa toimivaksi todettuja menetelmiä vastaaviin kohteisiin.

1.3 Kohteen esittely

Opinnäytetyön kohteena on rakenteilla oleva Keski-Suomen keskussairaala Nova. Hankesuunnittelu kohteelle alkoi vuonna 2012. Rakennusprojekti käynnistyi ensin alueen purkutöillä ja varsinainen rakentaminen alkoi syksyllä 2016. Projektin on tarkoitus valmistua vuonna 2020.

Jyväskylän Kukkumäkeen rakennetaan Keski-Suomen keskussairaalan alueelle uusi keskussairaala, joka pyritään ottamaan käyttöön vuonna 2020. Suurin osa tiloista varataan erikoissairaanhoidolle ja loput Jyväskylän perusterveydenhuollolle. Hankkeen tavoitteena on rakenteelliset ja logistiset ratkaisut, jotka tehostavat terveydenhuoltoa sekä integroivat perusterveydenhuollon, erikoissairaanhoidon ja sosiaalipalvelut. Terveydenhoidon eri toiminnot ja lääketieteelliset erikoisalajat sijoitetaan siten, että

yhteistyö niiden välillä paranee. Tavoitteena on myös kehittää terveydenhuollolle sopivia ICT-ratkaisuja. (Keski-Suomen uusi sairaala Nova n.d.)



Kuvio 1. Rakennustyömaan tilanne tammikuussa 2019 (Työmaan tilanne 2019).

Keskussairaala Nova on jaettu neljään eri kokonaisuuteen. Kuumasairaala koostuu leikkaussaleista, synnytysaleista, teho-osastosta, päivystyksestä sekä valvonta- ja päivystysosastoista. Vuode-osastoilla potilaat saavat käyttöönsä yhden hengen potilashuoneet, ja potilaat hoidetaan ilman perinteisiä eri erikoisalojen tai erikoissairaanhoidon ja perusterveydenhuollon välisiä osastorajoja. Elektiivisen sairaalan puolella potilaat käyvät suunnitelluilla poliklinikka- ja päiväsairaalakäynneillään. Yhteiskäytössä olevia potilaan vastaanottohuoneita käytetään potilastyöhön ja paperityöt hoidetaan monitilatoimistoissa. Elektiivisen sairaalan toiminnan ytimen muodostavat osaamiskeskukset, joissa nykyiset eri erikoisalot ja ammattiryhmät toimivat yhteistyössä. Tukipalveluihin sisältyvät laboratoriot, apteekki sekä välinehuolto. (Uusi sairaala Nova 2018.)

Keskussairaala Novan suunnittelu ja toteutus ovat Terve Talo -kriteereiden mukaisia. Siten varmistetaan uuden sairaalan puhdas ja turvallinen ympäristö sairaalan käyttäjille. Keskussairaalan suunnittelun tavoite on tukea potilaskeskeistä hoitoa, ja hankkeen lopputuloksena valmistuu 368 sairaansijaa, 10 synnytyssalia, 32 teho- ja valvontapaikkaa, 24 leikkaussalia, 12 pientoimenpide- ja skopiahuonetta, 215 vastaanottohuonetta, 75 päiväsairalapaikkaa, 3 sädehoidon bunkkeria, 3 magneettikuvaushuonetta, ICT -tila sekä apteekin lääkevalmistustila. (Keski-Suomen uusi sairaala Nova n.d.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään valmistuviin säteilyhoidon tiloihin.

1.4 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi SRV Rakennus Oy. SRV perustettiin vuonna 1987 nimellä SRV Vitokset, ja se on nykyään pörssiyritys, joka toimii Suomen kasvukeseuksissa, Venäjällä sekä Virossa. Liikevaihto vuonna 2017 oli yli 1,1 miljardia euroa. SRV:llä työskentelee yli 1 000 ihmistä, ja SRV työllistää hankkeissaan noin 4000:n alihankkijan verkoston.

SRV yhtiöt Oyj on SRV:n konsernin emoyhtiö. SRV Rakennus Oy vastaa kotimaan toiminnasta ja sen alueyksikköihin kuuluvat SRV Pirkanmaa, SRV Keski-Suomi, SRV Pohjois-Suomi, SRV Lounais-Suomi sekä Rakennusliike Purmonen. Liiketoiminta kotimaassa koostuu asunto-, toimitila- ja infrarakentamisesta. SRV Russia Oy vastaa ulkomaan liiketoiminnasta. SRV Baltia Oy:n fuusio SRV Yhtiö Oyj:öön tapahtui 31.12.2013. Lisäksi SRV:n konserniin kuuluvat SRV Kalusto Oy sekä SRV Infra. (SRV intranet 2017.)

SRV:llä on strategia ajanjaksolle 2016-2020, ja SRV:llä tehtiin vuonna 2017 useita strategiaa tukevia toimenpiteitä esimerkiksi asiakaskokemuksen ja vastuullisuuden osalta. SRV VISIO 2020:n mukaiset toimenpiteet tähtäävät mission, vision ja kolmen strategisen päämäärän toteutumista, joita ovat alan paras asiakaskokemus, alan houkuttelevin työpaikka sekä alan paras kannattavuus. (SRV intranet 2017.)



Kuvio 2. SRV VISIO 2020 (Strategia n.d.).

2 Säteily

Tässä kappaleessa esitetään lyhyesti säteilyyn liittyviä käsitteitä, jotka muodostavat riittävän pohjan opinnäytetyön teoreettisen osuuden ymmärtämiseksi. Päälähteenä modernin fysiikan käsitteiden osalta on käytetty Beiserin (2003) kirjaa. Modernin fysiikan näkemyseroja ei käsitellä, sillä esitettävät käsitteet ja niiden tämänhetkiset, yleisesti hyväksytyt tulkinnat tarjoavat opinnäytetyön sovelluksien kannalta riittävän tarkan viitekehyksen, jossa asioita tarkastellaan.

2.1 Mitä säteily on

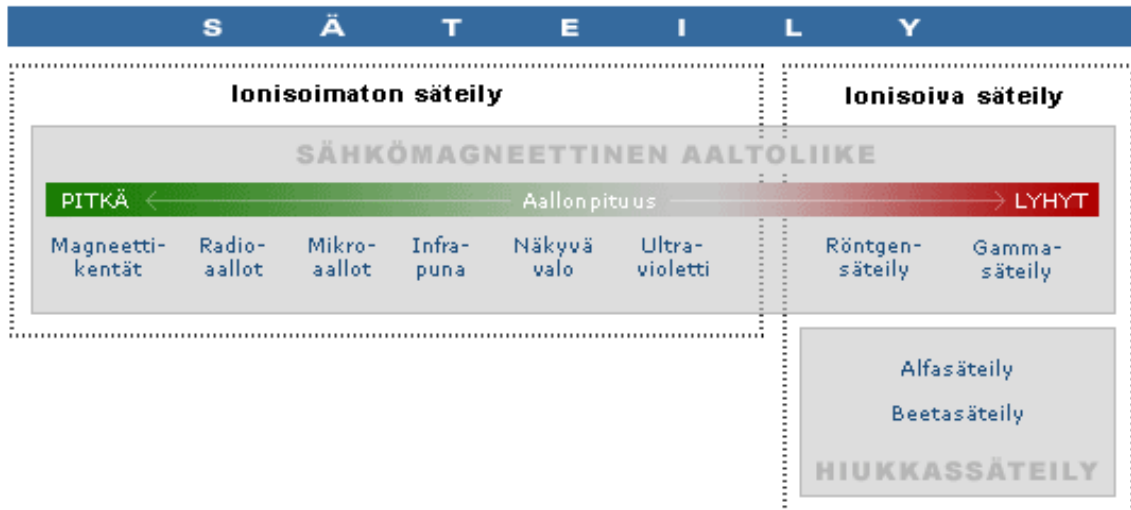
Säteily on energian etenemistä tyhjiössä tai jossain väliaineessa aaltojen tai subatomisten hiukkasten muodossa (Eisler 2007). Auringonpaiste on yksi tutuimmista säteily-

lyn muodoista. Se tarjoaa valoa ja lämpöä. Nautimme ja tarvitsemme sitä, mutta samalla huolehdimme, ettemme altistuisi liiaksi sille. (Nuclear Radiation and Health effects 2018.)

Tässä opinnäytetyössä termillä säteily tarkoitetaan sekä hiukkassäteilyä että sähkömagneetista säteilyä. Säteilyllä tai yleisimmin aineella on aaltoliikkeen ja hiukkasten ominaisuuksia. Kyse on aineen aaltohiukkasdualismista. Esimerkiksi sähkömagneettinen säteily voidaan mieltää aalloksi, jota karakterisoi jokin aallonpituus λ ja taajuus ν , ja jolle pätee aaltojen fysikaaliset ominaisuudet, kuten heijastuminen, taittuminen, diffraktio ja niin edelleen. Toisaalta sähkömagneettinen säteily voidaan mieltää koostuvan fotoneista, jotka ovat lepomassattomia, varauksettomia valonnopeudella liikkuvia alkeishiukkasia. Fotonit selittävät, miten sähkömagneettinen säteily, kuten valo, on vuorovaikutuksessa aineen kanssa. (Beiser 2003.)

Säteily on joko ionisoimatonta tai ionisoivaa riippuen säteilyn energian määrästä. Ionisoimaton säteily on sellaista sähkömagneettista säteilyä, jonka energia ei riitä irrottamaan atomin elektroneja tai rikkomaan atomien ja molekyylien välisiä sidoksia. Raja ionisoimattoman ja ionisoivan säteilyn välillä on noin ultravioletivalon ja röntgensäteiden aallonpituuksien välissä (ks. kuvio 3). (Mitä säteily on 2019.) Mitään hyvin määriteltyä raja-arvoa ionisoimattoman ja ionisoivan säteilyn välille ei ole määritetty, joten tässä työssä sovelletaan Säteilyturvakeskuksen (STUK) ST-ohjeiden suuntaviivoja.

Ionisoimatonta säteilyä sovelletaan esimerkiksi mikroaaltouuneissa ja matkapuhelimissa. Ionisoimattomaan säteilyyn kuuluu myös maapallon ilmakehän läpäisevä auringonsäteily. (Mitä säteily on 2019.)



Kuvio 3. Säteily (Mitä säteily on 2019).

Toisin kuin ionisoimattomalla säteilyllä, ionisoivalla säteilyllä on riittävästi energiaa, että se kykenee irrottamaan säteilyn kohteeksi joutuvan aineen atomeista elektroneja tai rikkomaan aineen molekyylejä (Mitä säteily on 2019). Toisin sanoen ionisoiva säteily ionisoi atomeja ja rikkoo atomien välisiä sidoksia. Säteilyturvallisuusohjeessa ST 1.9 (Säteilytoiminta ja säteilymittaukset, ST 1.9. 2016) määritellään ionisoiva säteily seuraavasti.

”Ionisoiva säteily on hiukkasina tai sähkömagneettisina aaltoina enintään 100nm:n aallonpituudella tai vähintään $3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$:n taajuudella tapahtuva energian siirto, joka pystyy tuottamaan ioneja suoraan tai välillisesti.”

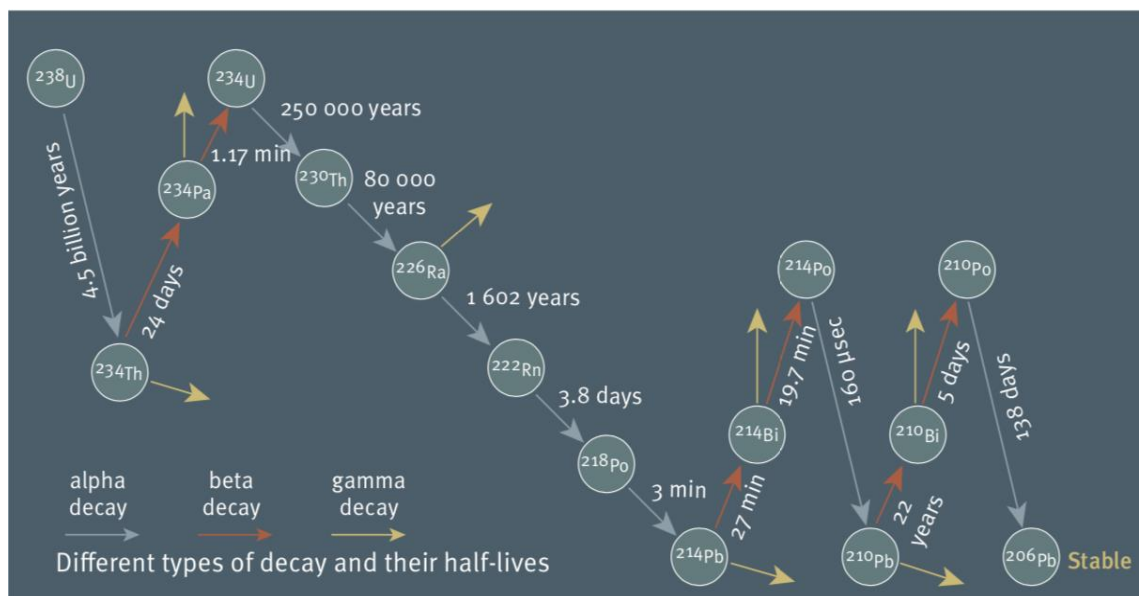
Esimerkiksi fotonin energia $3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ taajuudella on $1,988 \cdot 10^{-18} \text{ J}$. Tämä saadaan laskettua kaavalla $E = h\nu$, missä h on Planckin vakio $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ja ν on taajuus. (Beiser 2003.) Säteilyenergia on siis suoraan verrannollinen säteilyn taajuuteen, joten mitä suurempi taajuus, sitä suurempi energia. Korvaamalla taajuus aallonpituudella edellisessä kaavassa saadaan $E = hc/\lambda$, sillä aallonpituudelle ja taajuudelle pätee suhde $\nu = c/\lambda$, missä vakio c on valonnopeus tyhjiössä. (Beiser 2003.) Tällöin siis mitä lyhyempi aallonpituus, sitä suurempi energia. (ks. kuvio 3).

Atomifysiikassa energian yksikkönä käytetään usein elektronivoltteja (eV), missä 1 elektronivoltti vastaa $1,602 \cdot 10^{-19}$ joulea (Beiser 2003). Edellä lasketun fotonin

energia elektronivolteissa on siis noin $12\text{eV} \approx \frac{1,988 \cdot 10^{-18}\text{J}}{1,602 \cdot 10^{-19}\text{J/eV}}$. Tässä työssä pidetään 12eV säteilyenergiaa kynnsarvona ionisoivalle säteilylle. Kyseinen säteilyenergia ei ihan riitä ionisoimaan typen atomia, jonka ionisoimiseen tarvittaisiin $14,5\text{eV}$ energia. Toisaalta 12eV riittää rikkomaan vetymolekyylin H_2 , jonka sidosenergia on $4,5\text{eV}$. Molekyylin sidosenergia on energia, joka vaaditaan erottamaan molekyylin atomit toisistaan. (Beiser 2003.)

Ionisoivaa säteilyä on esimerkiksi röntgenlaitteiden tuottama röntgensäteily ja erilaisista radioaktiivisista aineista lähtevä säteily. Näistä röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä ja radioaktiivisten aineiden säteily on joko hiukkassäteilyä, sähkömagneettista säteilyä tai jopa molempia.

Ainetta kutsutaan radioaktiiviseksi, mikäli se sisältää epävakaita atomeja. Prosessi, jossa epävakaita atomeja hajoavat, kutsutaan radioaktiiviseksi hajoamiseksi. Kun atomi hajoaa, se menettää energiaa säteilyn muodossa ja muuttuu joksikin toiseksi atomiksi. Tuloksena on atomi, joka on joko stabiili eli vakaa tai epävakaa. Kuviossa 4 näkyy uraanin isotoopin ^{238}U hajoamisketju, hajoamistyyppit ja puoliintumisajat. Epävakaa uraani- ^{238}U hajoaa useiden eri vaiheiden kautta stabiiliksi lyijyn isotoopiksi ^{206}Pb .



Kuvio 4. Uraanin isotoopin ^{238}U hajoamisketju (United Nations Environment Programme 2016).

2.2 Säteilytyypit

Tässä tutkielmassa keskitytään vain ionisoivaan säteilyyn, joten tästä eteenpäin säteilyllä tarkoitetaan joko ionisoivaa hiukkassäteilyä tai ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä, ellei toisin mainita. Seuraavaksi kuvataan tämän tutkielman kannalta oleelliset ionisoivat säteilytyypit.

Alfasäteily (α) on hiukkassäteilyä, jota voi syntyä atomin ytimen hajotessa. Alfasäteilyssä atomista irtautuu heliumydin (alfahajoaminen). Irronnutta ydintä kutsutaan alfahiukkaseksi, joka siis koostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista. Protonilla on yhden alkeisvarauksen e varaus, joten alfahiukkasen varaus on $+2e$. Alfahiukkasten varaus, niiden suhteellisen hidas nopeus ja suuri massa merkitsevät sitä, että ne ovat helpommin vuorovaikutuksessa aineen kanssa kuin beetahiukkaset tai gammasäteet ja menettävät energiaansa nopeasti. Tämän takia alfahiukkasilla on heikko läpäisykyky, ja täten ne eivät pysty läpäisemään esimerkiksi ihmisen ihoa tai paperiarkkia. Kuitenkin kehon sisällä ne voivat aiheuttaa vakavampia biologisia vahinkoja kuin muut säteilytyypit. Alfahajoamisen seurauksena syntyy usein myös gammasäteilyä, kun hajonnut ydin muodostaa radioaktiivisen ytimen (ks. kuvio 4), missä esimerkiksi uraanin isotooppi 238 alfahajoaa torium isotoopiksi 234, joka edelleen beeta- ja gammahajoamisen myötä hajoaa protaktiniumiksi.

Beetasäteily (β) on hiukkassäteilyä, jota voi syntyä atomin ytimen hajotessa. Beetasäteilyä muodostuu kahdesta erilaisesta atomin hajoamistavasta: negatiivisesta beetahajoamisesta (β^-) ja positiivisesta beetahajoamisesta (β^+). Negatiivisessa beetahajoamisessa atomin neutroni muuttuu protoniksi ja samalla atomista lähtee yksi elektroni (varaus $-e$) ja yksi antineutriino. Positiivisessa beetahajoamisessa atomin protoni muuttuu neutroniksi ja samalla atomista lähtee yksi positroni (varaus $+e$) ja neutriino. Kummankin tapauksen hiukkasia voidaan yleisesti kutsua beetahiukkasiksi. Beetahiukkaset ovat läpäisykykyisempiä kuin alfahiukkaset ja pystyvät tunkeutumaan esimerkiksi ihoon, mutta pysähtyvät ohueen alumiini kerrokseen. Beetahajoamisen yhteydessä esiintyy usein myös gammasäteilyä joko elektronisieppauksen tai annihilaation seurauksena. Elektronisieppauksessa atomin ydin sieppaa atomin sisim-

mältä elektronikuorelta elektronin, jonka tilalle jää aukko. Aukon täyttää jokin ylemmän elektronikuoren elektroni, jonka siirtymän seurauksena syntyy gammasäteilyä. Annihilaatiossa elektroni ja positroni, eli hiukkanen ja antihhiukkanen yhtyvät, ja niiden massoihin sidottu energia vapautuu säteilyenergiaksi gammasäteilyn muodossa.

Neutronisäteily ilmenee, kun neutroneja vapautuu ydinfissiossa ja -fuusiossa. Toisin kuin alfa- ja beetahiukkaset, neutronit ovat sähkövarauksettomia hiukkasia. Ihmiskeho koostuu suuresta määrästä vetyä (osa vesimolekyyleistä, jotka täyttävät 70% kehosta). Kun neutronit osuvat vedyn ytimeen eli protoniin, ne aiheuttavat elimistössä erilaisia vaurioita protoni-ionisaatioiden seurauksina. Koska nopeasti liikkuvat neutronit ovat vaarallisia elävälle kudokselle, täytyy neutronilähteet suojata hyvin. (Basic about Radiation 2018.)

Gammasäteily (γ) on sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy, kun atomin ydin siirtyy viritystilasta alempaan viritystilaan tai perustilaan (gammahajoaminen). Lisäksi gammasäteilyä syntyy, kun positroni törmää elektroniin esimerkiksi β^+ -säteilyn yhteydessä. Tällöin elektroni ja positroni häviää, ja syntyy kaksi fotonia (γ -kvantteja), joiden suunnat ovat vastakkaiset elektronin ja positronin suuntiin nähden. Elektronin ja positronin yhteismassa vastaa 1,02MeV energiaa. Tällöin molemmilla fotoneilla on puolet tästä energiasta eli 0,51MeV. Gammasäteet ja röntgensäteet ovat lähes identtisiä, paitsi että röntgensäteitä tuotetaan keinotekoisesti eikä ne tule atomiytimeistä. Mutta toisin kuin valolla, näillä säteillä on suuri läpäisyteho ja voivat kulkea läpi ihmiskehon. Energiämäärästä riippuen sen vaimentamiseksi voidaan tarvita paksu kerros betonia, terästä tai lyijyä. Koska gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, sen vuorovaikutus aineen kanssa ilmenee fotonien kautta. Fotonit ovat vuorovaikutuksessa aineen kanssa pääsääntöisesti kolmella tavalla. Nämä tavat ilmenevät valosähköilmiössä, Compton-sironnassa ja parinmuodostuksessa. Kaikissa tapauksissa fotonin energiaa absorboituu vuorovaikutuksen kohteena olevaan aineeseen. Valosähköilmiössä sähkömagneettisen säteilyn energia ($h\nu$) riittää vapauttamaan elektronin atomista. Tällöin fotoni absorboituu atomiin ja luovuttaa energiansa elektronille. Parinmuodostuksessa sähkömagneettisen säteilyn energia ($h\nu$) muuttuu aineeksi, kuten esimerkiksi elektroniksi (e^-) ja positroniksi (e^+). (Beiser 2003.) Compton-sironnassa fotoni törmää vapaaseen elektroniin. Tämän takia elektroni saa myös jonkin

verran liike-energiaa, ja sironneen fotonin energia pienenee ja suunta muuttuu. (Lammentausta 2017.)

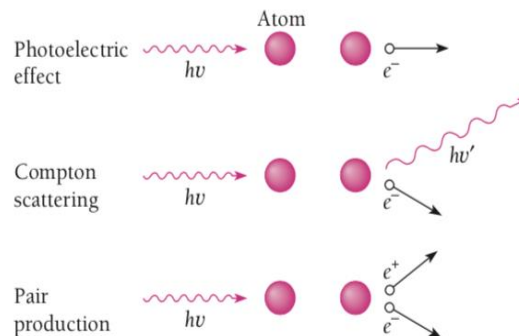


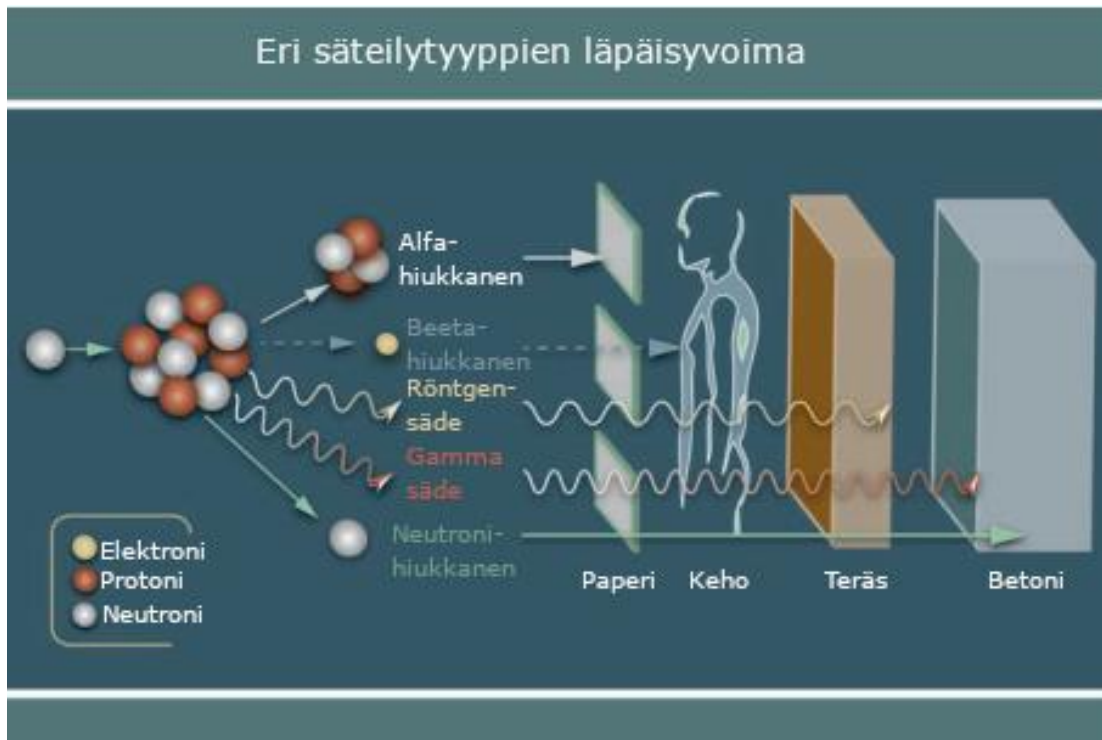
Figure 2.27 X- and gamma rays interact with matter chiefly through the photoelectric effect, Compton scattering, and pair production. Pair production requires a photon energy of at least 1.02 MeV.

Kuvio 5. Fotonin vuorovaikutus (Beiser 2003).

Röntgensäteilyllä on samat ominaisuudet kuin gammasäteilyllä, vaikka röntgensäde tuotetaan eri tavalla. Tavanomaisesti röntgensäteilyä muodostuu röntgenputkessa eli tyhjiöputkessa, jossa elektronit kiihtyvät katodilta kohti anodia. Elektronin joutuessa vuorovaikutukseen anodin aineen atomien kanssa sen suunta muuttuu ja vauhti hidastuu. Vauhdin hidastuessa (elektronin "jarruttaessa") elektronin liike-energia tai ainakin osa siitä muuttuu fotoniksi. (Kyseessä on tavallaan käänteinen ilmiö valosähköilmiölle, missä fotoni absorboituu atomiin luovuttaen elektronille energiansa.) Tällä tapaa syntyvää säteilyä kutsutaan jarrutussäteilyksi, jota voi tuki syntyä muualakin kuin röntgenputkessa.

Mitä korkeampi jännite röntgenputken katodin ja anodin välillä on, sitä nopeampia elektroneja ja lyhyempiä aallonpituudeltaan olevia röntgensäteitä röntgenputkella voidaan tuottaa. Röntgenputken jännite määrittää siis pienimmän aallonpituuden λ_{min} . Koska elektronit menettävät kokonaan tai osittain energiansa, tällöin röntgensäteilyssä ilmenee kaikki aallonpituudet pienimpään aallonpituuteen λ_{min} asti. Kyseessä on säteilyn jatkuva spektri, jonka λ_{min} rajaa. (Beiser 2003.) Vertailun vuoksi radioaktiivisista aineista lähtevällä gammasäteilyllä on yksi (tai kaksi) kiinteä aallonpituus (Basic about Radiation 2018).

Atomin järjestysluku Z , eli atomin ytimessä olevien protonien lukumäärä, vaikuttaa myös röntgensäteilyn energian määrään. Mitä suurempi järjestysluku atomilla on, sitä voimakkaammin elektroni on vuorovaikutuksessa sen kanssa. Tällöin jarrutus-
teily voimistuu. (Beiser 2003.)

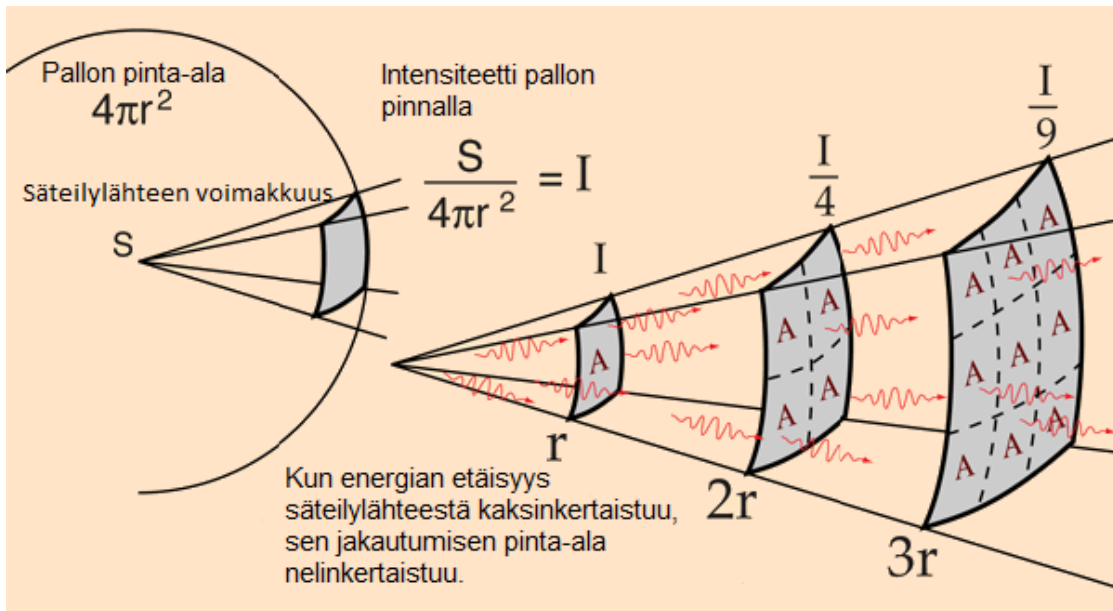


Kuvio 6. Eri säteilytyyppien läpäisyvoima (suomennettu) (United Nations Environment Programme 2016).

2.3 Etäisyys

Säteilyn voimakkuus heikkenee etäisyyden kasvaessa. Mitä kauempana potilaasta hoitaja on, sitä pienempi on hänen saamansa säteily määrä.

Jokainen pistemäinen säteilylähde, jonka vaikutus leviää tasaisesti ja esteettömästi kaikkiin ilmansuuntiin, noudattaa *käänteisen neliön lakia*. Tämä johtuu täysin geometrisista periaatteista. Vaikutuksen intensiteetti I , millä tahansa säteellä r , on säteilylähteen voimakkuus S jaettuna pallon pinta-alalla $4\pi r^2$. (ks. kuvio 7). Koska käänteisen neliön laki on täysin geometrinen, sitä voidaan soveltaa erilaisiin ilmiöihin. Painovoiman, sähkökentän, valon, äänen tai säteilyn pistemäiset lähteet noudattavat kaikki käänteisen neliön lakia. (Nave 2016.)



Kuvio 7. Käänteisen neliön laki, säteily (suomennettu) (Nave 2016).

2.4 Terveyshaitat

Kudosten tai elinten säteilyvaurio riippuu niihin absorboituneesta säteilyn määrästä ja tyypistä. *Keskimääräinen absorboitunut annos* on suure, joka kuvaa säteilystä kohteeseen absorboitunutta säteilyenergian määrää kilogrammaa kohti. Sen yksikkö on gray (Gy), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. (Ionizing radiation, health effects and protective measures 2016.) Kyseinen suure ei kuitenkaan kerro mitään säteilyn tyypistä. Esimerkiksi yhden joulen suuruinen gammasäteily vaikuttaa eri tavalla kuin yhden joulen suuruinen alfasäteily.

Ekvivalenttiannos on suure, joka kuvaa keskimääräisen absorboituneen annoksen ottaen samalla huomioon säteilytyypin. Sen yksikkö on sievert (Sv), $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. STUK:n ST-ohje 7.2 (Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, ST 7.2. 2014) määrittelee ekvivalenttiannoksen seuraavasti.

Kudoksen tai elimen T ekvivalenttiannos $H_{T,R}$ on säteilyn painotuskertoimella w_R kerrottuna kudoksen tai elimen keskimääräinen absorboitunut annos $D_{T,R}$:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R},$$

missä w_R on säteilyn painotuskertoimen säteilylaadulle R ja $D_{T,R}$ on säteilylaadusta R aiheutuva, kudoksen tai elimen T keskimääräinen absorboitunut annos.

Tällöin yhden joulen suuruudesta gammasäteilystä kilogrammaa kohti aiheutuva ekvivalenttiannos on $1 \cdot 1Gy = 1Sv$, missä 1 on fotonin painotuskertoimen. Vastaavasti yhden joulen suuruudesta gammasäteilystä kilogrammaa kohti aiheutuva ekvivalenttiannos on $20 \cdot 1Gy = 20Sv$, missä 20 on alfahiukkaseen painotuskertoimen.

Mikäli eri tyyppisiä säteilylähteitä on useampia, voidaan ekvivalenttiannos laskea ekvivalenttiannoksien summana $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$.

Säteilyenergian ja -tyypin lisäksi tulee huomioida, että säteilyn haitta vaikuttaa eri kudoksiin ja elimiin eri tavalla. *Efektiivinen annos* on suure, joka kuvaa säteilyn aiheuttamaa terveydellistä kokonaisuutta ottaen huomioon eri kudosten ja elintyyppit. Sen yksikkö on myös sievert (Sv). STUK:n ST-ohje 7.2 (Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, ST 7.2. 2014) määrittelee efektiivisen annoksen seuraavasti.

Efektiivinen annos E on kudosten painotuskertoimilla w_T kerrottujen ekvivalenttiannosten H_T summa:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Ekvivalenttiannoksen ja efektiivisen annoksen laskemisessa tarvittavat painotuskertoimet w_R ja w_T löytyvät kuvioista 8 ja 9.

Säteilylaatu	w_R
Fotonit, kaikki energiat	1
Elektronit ^{*)} ja myonit, kaikki energiat	1
Neutronit, energia	
• alle 10 keV	5
• vähintään 10 keV ja enintään 100 keV	10
• yli 100 keV ja enintään 2 MeV	20
• yli 2 MeV ja enintään 20 MeV	10
• yli 20 MeV	5
Protonit ^{**)} , energia yli 2 MeV	5
Alfahiukkaset, fissiofragmentit, raskaat ytimet	20
^{*)} Muut kuin DNA-molekyylisiin sitoutuneiden ydinten lähettämät Augerin elektronit.	
^{**)} Lukuunottamatta rekyyliprotoneita.	

Kuvio 8. Säteilyn painotuskertoimet w_R eri säteilylaaduille (Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, ST 7.2. 2014).

Kudos tai elin	w_T
Sukurauhaset	0,20
Punainen luuydin	0,12
Paksusuoli	0,12
Keuhkot	0,12
Mahalaukku	0,12
Virtsarakko	0,05
Rintarauhaset	0,05
Maksa	0,05
Ruokatorvi	0,05
Kilpirauhanen	0,05
Iho	0,01
Luun pinta	0,01
Muut kudokset	0,05

Kuvio 9. Kudosten painotuskertoimet w_T (Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, ST 7.2. 2014).

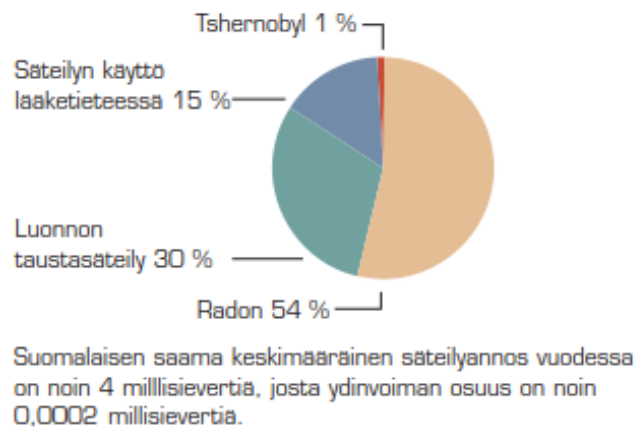
ST-ohjeen 7.2 liitteestä B (Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, ST 7.2. 2014) löytyy lisää tietoa taulukosta puuttuvien kudosten ja elinten painotuskertoimista.

Sievert on erittäin suuri yksikkö, joten on käytännöllisempää käyttää pienempiä yksiköitä, kuten millisievertejä (mSv) tai mikrosievertejä (μ Sv). Säteilyn määrän (annoksen) lisäksi on usein hyödyllistä ilmaista nopeus, jolla tämä annos annetaan (annosnopeus) kuten mikrosievertit tunnissa (μ Sv / tunti) tai millisievertit vuodessa (mSv / vuosi).

Tiettyjen kynnsarvojen lisäksi säteily voi heikentää kudosten sekä elinten toimintaa ja aiheuttaa akuutteja vaikutuksia, kuten ihon punoitusta, hiustenlähtöä, säteilypalo-
vammoja tai akuuttia säteilyoireyhtymää. Nämä vaikutukset ovat vakavampia suurilla annosnopeuksilla. Esimerkiksi akuutin säteilyoireyhtymän annosraja on noin 1 Sv (1000 mSv).

Jos säteilyannos on alhainen tai se annetaan pitkän ajanjakson aikana (pieni annosnopeus), riski on huomattavasti pienempi, koska on todennäköisempää, että vahinko korjaantuu. Pitkäaikaisilla vaikutuksilla on kuitenkin riski aiheuttaa syöpää, joka voi esiintyä vasta vuosia tai jopa vuosikymmeniä myöhemmin. Tämän tyyppisiä vaikutuksia ei aina esiinny, mutta niiden todennäköisyys on verrannollinen säteilyannokseen. Tämä riski on suurempi lapsille ja nuorille, koska he ovat huomattavasti herkempiä

säteilyaltistukselle kuin aikuiset. (Ionizing radiation, health effects and protective measures 2016). Kuviosta 10 näkee suomalaisen saaman keskimääräisen säteilyannoksen vuodessa ja liitteestä 1 näkee säteilyannoksia, jota henkilöön voi absorboitua eri säteilylähteistä.



Kuvio 10. Suomalaisen saama keskimääräinen säteilyannos vuodessa (Hyvä tietää säteilystä 2017).

Säteilyaltistuksen suurimmat haitalliset terveysvaikutukset voidaan ryhmitellä kahteen yleiseen luokkaan: deterministiset vaikutukset (haitalliset kudosreaktiot), jotka johtuvat suurelta osin solujen toimintahäiriöstä suurten annosten jälkeen. (Valentin 2007).

Ionisoivan säteilyn deterministiset vaikutukset (tai kudosreaktiot) liittyvät suoraan absorboituneeseen säteilyannokseen ja vaikutuksen vakavuus lisääntyy annoksen suurentuessa. Deterministisellä vaikutuksella on tyypillisesti kynnys (suuruusluokkaa 0,1 Gy tai suurempi), jonka alapuolella vaikutusta ei tapahdu. Deterministiset vaikutukset perustuvat kudosvaurioihin. (European Commission 2012.)

Tai stokastisiin vaikutuksiin eli satunnaisesti kutsuttua haittaa, joka syntyy geneettisestä muutoksesta yhdessä solussa. Jotta haitta tulisi ilmi, tulee solun jakautua klooniksi, ja kloonin jokaisessa solussa esiintyä sama muutos. Kun muutokset tapahtuvat

somaattisessa solussa, ne voivat aiheuttaa kloonissa syövän. Vaurion ollessa sukusolussa, josta kehittyy elinkelpoinen lapsi, saattaa haitta ilmetä lapsessa tai lapsen jälkeläisissä (geneettinen haitta). (Paile 2000.)

Ionisoivan säteilyn stokastiset vaikutukset ovat sattumanvaraisia tapahtumia, joiden todennäköisyys on suoraan verrannollinen säteilymäärään. Ensisijaisesti riskinä on syöpä, mutta myös perinnölliset häiriöt ovat stokastisia vaikutuksia, joiden haitta on $\sim 5\%/Sv$. (Valentin 2007.)

2.5 Keskussairaala Novan säteilylähteet

Tässä kappaleessa kuvataan pääpiirteittäin keskussairaala Novan keskeisimpiä säteilylähteitä, joiden vuoksi säteilysuojarakenteita täytyy rakentaa sekä tässä tutkimuksessa kehittää läpivientien osalta.

Perusteiltaan radiologiset menetelmät poikkeavat suuresti. Ne voivat perustua röntgensäteilyyn (röntgenkuvaus, tietokonetomografia), sähkömagneettiseen säteilyyn, joita on esimerkiksi magneettikuvaus, kaikukuvauksiin, jotka ovat ääniaaltoja tai muuhun ionisoivaan säteilyyn. (Sequeiros ym. 2017.)

Röntgenkuvaus, josta käytetään myös nimeä natiivikuvaus, on yleisin radiologinen tutkimus sisältäen 80 % kaikista tutkimusmenetelmistä radiologisissa tutkimuksissa. Röntgenkuva muodostuu, kun röntgenputken tuottama röntgensäteily ohjataan kuvattavan kohteen lävitse kultalevyille. Säteilystä absorboituu suurin osa kudokseen. Kuvalevyn tunnistaessa kohteen läpi kulkeutuneen säteilymäärän sekä paikan, voidaan tämä tieto muuttaa kuvaksi.

Tietokonetomografia (TT, computed tomography, CT) on röntgensäteilyä hyödynnettävä tutkimusmuoto. Potilasta kiertävä röntgenputki lähettää röntgensädekeilan lävistäen kehon. Läpi kulkeutunut säteily mitataan putkea vastapäätä olevalla puolijohdinanturilla. Poikkileikekuva muodostetaan kehon läpäisseen säteilyn määrän muu-

toksen mukaan eli absorboituneen määrän mukaisesti. Haittapuolena tietokonetomografiassa on se, että säderasitus tutkittavaan on selvästi suurempi kuin tavanomaisissa röntgentutkimuksissa nostaan myös säteilysuojien vahvuusvaatimuksia. (Sequeiros ym. 2017.)

Isotooppikuvaus perustuu gammasäteilyn havaitsemiseen, jota potilas emittoi (säteilee) poiketen merkittävästi fysikaalisilta periaatteiltaan muhin röntgensäteilyynperustuviin kuvantamismenetelmiin. Peruseriaate isotooppikuvauksessa on, että potilaalle annetaan radioaktiivista ainetta (ns. radiolääke). Radiolääkkeen ottamisen jälkeen lääke hakeutuu kohdekudokseen. Potilaan kohdekudoksesta emittoituu gammasäteilyä isotoopin hajoamisen seurauksena, jota mitataan gamma- tai PET-kameralla. Kuvaukseen käytettävät laitteet eivät siis tuota lainkaan säteilyä vaan potilas itse toimii säteilylähteenä. (Saarakkala 2017.)

Radioaktiivisella jätteellä tarkoitetaan materiaalia, esinettä tai rakennetta, joka sisältää radioaktiivista ainetta ja radioaktiivisuutensa vuoksi on tehtävä vaarattomaksi. Tyypillistä radioaktiivisille jätteille on, että ne eristetään luotettavasti elinympäristöstämme sillä niitä ei voida hävittää. Aktiivisuus jätteissä voi kuitenkin vähentyä itsestään radioaktiivisen hajoamisen kautta. Eristetyiden jätteiden asetetut vaatimukset ovat kuitenkin riippuvaisia aktiivisuustasojen lisäksi myös radionuklidien puoliintumisajoista. Keskussairaala Novassa huolehditaan radioaktiivisista jätteistä ”viivästä ja vähennä- periaatteella”. Toisin sanoen jätteet varastoidaan, kunnes sen aktiivisuus vähenee alle vapaarajojen. Suurin osa sairaalan radioaktiivisista jätteistä tehdään tällä tavoin vaarattomiksi. Tämä on käytännöllistä kuitenkin vain silloin, kun jätteiden sisältämä radionuklidien puoliintumisaika on noin sata päivää. (Mitä ydinjäte on 2015.)

Sädehoitolaite. Sädehoitoa annetaan yleisimmin suurilla lineaarikiihdyttimillä. Niiden korkeaanerginen syväälle tunkeutuva säteily keskitetään kasvaimeen elimistön ulkopuolelta eri suunnista. Syöpäkasvaimeen saadaan näin suuri annos säteilyä ja samalla ympäröiviin kudoksiin kohdistuva säteily määrä on selvästi pienempi. (Johanson 2018.) Sädehoidossa kiihdytysjännitteet ovat yleensä 4-18 MV:a, ja efektiivinen energia karkeasti 30 % - 40 % tästä, kuten röntgenkuvantamislaitteilla. Keskussairaalaan

sädehoitobunkkeriin tulee kaksi Varian Truebeam laitteita ja yksi tällä hetkellä käytössä oleva Truebeam IX. (Kärnä 2019). Sädehoitolaitteet sijaitsevat paksurakenteisissa tiloissa (kuten keskussairaala Novan sädehoitobunkkerissa), josta säteily ei pääse ulkopuolisiin tiloihin. (Johanson 2018.)

Fotonisäteilyä tuottaessa, raskasmetallikohtioon ohjataan kiihdytettyjä elektroneja ohuena suihkuna, tämä aiheuttaa jarrutussäteilyn syntymisen. Kohtiossa säteilyä syntyy kaikkiin suuntiin, kuitenkin suurin läpätunkeutuva säteily kohdistuu eteenpäin. Hoitopää voidaan suojata esimerkiksi raskasbetoniharkoilla, sivuille ja taakse suuntautuvan säteilyn poistamiseksi. Säteilyn määrä on siis huomattavasti suurempi kuin muissa tavanomaisissa säteilyä aiheuttavissa lähteissä. (Jussila, Kangas & Haltamo 2010.)

Radioaktiivista jodia (I^{131}), joka on β^- säteilyä emittoiva jodin isotooppi, käytetään lääketieteellisiin tarkoituksiin. Pieninä määrinä sitä voidaan käyttää myös hyväksi kilpirauhassyövän hoitoon. (Radiologyinfo 2018.) I^{131} tuottaa enimmäkseen 364 keV gammasäteilyä. (Kärnä 2019)

2.6 Säteilysuojelulaki

International Commission on Radiological Protection (kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta, ICRP) perustettiin vuonna 1928 ja on voittoa tavoittelematon yhdistys. (International Commission on Radiological Protection 2019). ICRP julkaisee parhaaseen tieteelliseen näyttöön perustuvia suosituksia säteilysuojelun toteutuksesta. EU:n ja Suomen säteilysuojelusäädöksissä on otettu huomioon kansainvälisen hyväksynnän saaneet ICRP:n suositukset. Säteilysuojelutoiminnan periaatteet perustuvat ICRP; suosituksiin. (Paile n.d.)

Uusi säteilylaki tuli voimaan 15.12.2018. Suomen kansallisissa säädöksissä pantiin käytäntöön EU:n vuonna 2013 uudistaman säteilyturvallisuusdirektiivin vaatimukset. Säteilylainsäädäntö uudistetaan samalla kokonaan. Uudistus koskee säteilylakia, asetuksia sekä säteilyturvakeskuksen ST-ohjeita. Säteilylain lisäksi säädöksiin sisältyvät

valtioneuvoston asetus, kaksi STM:n asetusta ja arviolta yhdeksän säteilyturvakeskuksen määräystä. Laki koskee terveydenhuollossa ja teollisuudessa käytettävää säteilyä sekä muuta säteilytoimintaa. Uudistus lisäsi muun muassa toiminnanharjoittajan vastuuta ja säteilyturvakeskuksen valvonta muuttuu entisestään riskiperusteiseksi lisäen sen valtuuksia puuttua laiminlyön-teihin. (Säteilylainsäädännön uudistus 2019.)

Tavoitteena säteilysuojelulla on suojella säteilyn haittavaikutuksilta ihmisiä, yhteiskuntaa, ympäristöä sekä tulevia sukupolvia. Jotta säteilyn käyttö olisi hyväksyttävää, on sen täytettävä muun muassa seuraavat peruseriaatteen: saavutettava hyöty toiminnalla on oltava suurempi kuin siitä aiheutuva haitta, sekä sen on noudatettava ALARA optimointiperiaatetta. (Säteilysuojelun periaatteet 2018.) ALARA optimointiperiaate on lyhenne sanoista "niin alhainen kuin on kohtuudella saavutettavissa", mikä tarkoittaa, että pyritään kohtuullisuuden rajoissa tekemään kaikki mahdollinen, jotta ionisoivalle säteilylle altistuminen säilyy käytännön rajoissa katsoen annosrajojen alapuolella. (Protecting People and the Environment 2019.)

Lisäksi Maankäyttö- ja rakennuslaissa (L 5.2.1999/132) säädetään säteilyaltistuksen huomioon ottamisesta uudis- ja korjausrakentamisessa.

2.7 Säteilyturvakeskus

Tässä kappaleessa kerrotaan lakiin kirjattu kuvaus säteilyturvakeskuksesta. Säteilyturvakeskuksen toiminta ja vaatimukset ovat keskeisesti mukana säteilytiloja sekä niiden suojauksia suunniteltaessa.

”Säteilyturvakeskus toimii Euroopan atomienergiayhteisön perustamissopimuksen 35 artiklassa tarkoitettuna valvontalaitoksena sekä huolehtii sopimuksen nojalla toteutettavan säteilyturvallisuusvalvonnan toimeenpanoon kuuluvista viranomaistehtävistä, yhteystehtävistä ja raportointitehtävistä, jollei muualla toisin säädetä.”

”Säteilyturvakeskus toimii radioaktiivisen jätteen ja käytetyn ydinpolttoaineen siirtojen valvonnasta ja tarkkailusta annetussa neuvoston direktiivissä

2006/117/Euratom, jäljempänä jätesiertodirektiivi, tarkoitettuna toimivaltaisena viranomaisena.”

”Säteilyturvakeskus laatii ja toteuttaa koko väestöä edustavan ympäristön säteilyvalvontaohjelman ympäristössä olevien radioaktiivisten aineiden määrien ja niistä aiheutuvan väestön altistuksen suuruuden seuraamiseksi.”

”Säteilyturvakeskus kokoaa ja julkaisee valtakunnalliset arviot säteilyn lääketieteellisestä käytöstä aiheutuneista säteilyaltistuksista ja niiden kehittymisestä.”

”Säteilyturvakeskus ylläpitää säteilymittausten luotettavuuden varmistamiseksi tarpeellisia kansallisia mittanormaaleja.”

”Säteilyturvakeskus toimii ammattipätevyden tunnustamisesta annetussa laissa (1384/2015) tarkoitettuna toimivaltaisena viranomaisena säteilyturvallisuusasiantuntijan ja säteilyturvallisuusvastaavan kelpoisuudesta päättämistä varten. Terveystieteiden ammattihenkilön pätevyden tunnustamisesta säädetään terveydenhuollon ammattihenkilöistä annetussa laissa.”
(L 9.11.2018/859, 14 §.)

3 Säteilysuojien rakenne

3.1 Säteilysuojarakenteiden suunnittelu

Tässä kappaleessa käsitellään säteilytilojen suunnittelun kannalta yleiset periaatteet sekä asioita, jotka on säteilytiloja suunniteltaessa otettava huomioon. Osa kuvioista on esitetty työn lopussa myös liitteinä, joista yksityiskohdat ovat helpommin havaittavissa.

Uusia tiloja suunnitellessa on hyvä muistaa, että tiloja käytetään usein kymmeniä vuosia ja laitteita saatetaan joutua uusimaan tasaisin väliajoin. Suunnittelun alkuvaiheessa suojat kannattaa mitoittaa hieman paksummaksi, tai varata tilaa, jotta suojuuksia voidaan lisätä jälkeenpäin. Sädehoituhuoneen viereiset tilat kannattaa varata huolto- ja varastotarkoituksiin. (Sädehoidon suojalaskelmat 2015.) Vuorelan (2019) mukaan säteilytilat kannattaisi sijoittaa maan alle, ylätiloihin tai eristettyihin nurkkatiloihin, jolloin sekä säteilyn haitta viereisiin tiloihin että tarvittavien suojusten määrä vähenisi. Jos esimerkiksi eristyskabinot ja odotustilat potilaille sijoitettaisiin erilleen

muista jatkuvassa käytössä olevista tiloista, isotooppilääketieteessä käytettävien positronimetrien sekä ^{131}I -isotoopin lähettämän gammasäteilyn edellyttämä suojaus-tarve vähenisi. (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.)

Materiaalikerrosten järjestyksen optimoinnilla on myös suuri merkitys rakenteiden suunnitteluun. Jos suojuksiin käytetään esimerkiksi terästä ja betonia, on teräs suositeltavaa sijoittaa ensin säteilyn tulosuuntaan nähden ja betoni vasta tämän jälkeen. Tällä tavoin 20 MeV:n kiihdytysenergialla voidaan betonin suojauspuutta vähentää noin 40 millimetrillä. Rakennepaksuuksia voidaan myös pienentää keilan käyttösuunnan suunnittelulla siten, että primäärikeila suuntautuu vain tiloihin, joissa ei jatkuvasti oleskella, kuitenkin ALARA-periaatetta noudattaen. (Sipilä n.d.)

Säteilytoiminnasta aiheutuva annos ei saa tarkkailualueella ylittää arvoa 120 μSv viikossa ja muilla alueilla arvoa 6 μSv viikossa. Hetkellinen annosnopeus ei myöskään saa ylittää arvoa 20 $\mu\text{Sv/h}$ kohdissa, joissa jatkuvasti työskennellään tai oleskellaan. Laskelmissa on käytettävä hoitolaitteen suurinta kiihdytysenergiaa ja kenttäkokoarvoa, ellei poikkeuksellisista syistä ole perusteltua poiketa niistä. Pääsääntöisesti suurimman käyttöön tulevan arvon perusteella valitaan annosnopeus. Jos etukäteen ei laitteen käyttö määrää tiedetä, käytetään vähintään arvoa 800 Gy/viikko. (Sädehoidon suojalaskelmat 2015.)

Toiminnanharjoittajan tulee rajoittaa väestön altistumista huolehtimalla säteilylähteiden käytönaikaisesta säteilyturvallisuudesta 66 §:n 1 momentissa säädetyllä tavalla, kuten estämällä radioaktiivisen aineen pääsyn toiminnan harjoittaman paikan ulkopuolelle ja laajemmin ympäristöön riittävän tehokkaasti. Tarvittaessa on myös rajoitettava väestön pääsy toiminnan harjoittamispaikalle. (L 9.11.2018/859, 126 §.)

”Säteily suojaukset ja toiminta on suunniteltava ja toteutettava siten, että toiminnanharjoittajan valvonnassa ja hallinnassa olevan tilan ja alueen ympäristössä ei ole tarpeen tehdä toimia väestön säteilyturvallisuuden varmistamiseksi.” (L 9.11.2018/859, 126 §.)

Tarkkailualueena säteilysuojusten vaimennusvaikutusta arvioitaessa on luokittelemattomalla alueella oleskelevien tai työskentelevien henkilöiden etäisyyksille käytettävä seuraavia arvoja: säteilysuojuksen takana tai niiden yläpuolella 300 mm ja 1500 mm säteilysuojuksen alapuolella, suojuksen alapuolisen tilan lattiasta mitattuna. Perustana näille arvoille on se, että on oletettavaa, ettei yleensä kukaan oleskele 300 mm lähempänä seiniä, eikä keskimääräisesti kenenkään keho ole 1500 mm ylempänä lattianpinnasta. Huomioitava kuitenkin on, että sironnut säteily tai useamman säteilylähteen yhteisvaikutus voi aiheuttaa tilanteen, jossa annosnopeus on voinut kasvaa suuremmaksi muualla, kuin edellä mainituilla suojaetäisyyksillä (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.)

Terveystieteiden röntgenlaitetilojen suojauksia ei yleensä ole tarpeellista määrittää laskennallisesti. Suojukseksi riittää usein 3 mm lyijyä tai 300 mm betonia primäärisäteiden suunnassa. 2 mm lyijyä tai 200 mm betonia riittää suojaksi suunnassa, joihin kohdistuu vain vuotosäteilyä ja sironnutta säteilyä. Suojukset yltyvät usein vähintään 2 metrin korkeuteen, 1 mm lyijyä ja 100 mm betonia riittävät suojaksi yleensä tästä ylempänä. (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.)

On kuitenkin tärkeä muistaa, että erilaiset säteilytyypit ja -energiat vaimentuvat materiaalissa hyvinkin eri tavalla. Materiaalien säteilynvaimennuskyky on vahvasti riippuvainen säteilyn energiasta, joten eri energiat vaimentuvat eri tavalla. Siksi on tärkeää tietää minkä radionuklidin isotoopista on kysymys, jotta säteilynsuojariittävyydet voidaan mitoittaa oikein. (Kärnä 2019; Vuorela 2019.) Jarrutus säteily on myös tärkeä ottaa huomioon suunnitellessa säteilynsuojausta. Beetasäteily (β^-) on pyrittävä hidastamaan materiaalissa, jonka järjestysluku on mahdollisimman pieni. (Ikäheimonen 2002.)

Suunnitteluvaiheessa on jo huomioitava säteilylaitteiden käyttömäärä, tapa sekä tilojen käyttö (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011). Tilat täytyy olla suunniteltu siten, että jos potilas saapuu pyörätuolissa, paareissa tai sängyssä, käynti tiloihin täytyy olla mahdollinen ovesta tai sokkelon läpi (Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities 2006). Myös kaikki läpivientien paikat tulisi olla jo suunnitteluvaiheen alkupuolella selvillä. Vuorelan (2019) mukaan altaiden ja kaivojen

hajulukot eivät saa olla metallia. Säteily jää pintaan kiinni, eikä huuhtoudu pois. Puoliintumisaika (säteilylle) on riippuvainen käytetystä isotoopista. Esimerkiksi I^{131} :n puoliintumisaika on noin 8 vuorokautta.

Materiaalien ja komponenttien on vastattava spesifikaatioita. Esimerkiksi betonin tiheyden on oltava tasalaatuista (2400kg/m^3). Mahdollisia ongelmatilanteita saattaa myös aiheuttaa tilojen todellinen nettopinta-ala laiteasennuksien jälkeen, laitteiden kuljetukset tiloihin (paino ja koko), sekä tilavaraukset tulevaisuutta ajatellen. On myös huomioitavaa, että primäärisäteen suuntaan tarvittavan säteilysuoja-alueen on katettava vähintään se alueen laajuus, jolle primäärisäteilyä voi kohdistua. (Report No. 151 – Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities 2005.)

Välipohjat rakennuksissa tehdään usein ontelolaatoista tai profiloiduista betonilautoista. Tällöin betonin paksuus ei ole kauttaaltaan sama kuin suojuksen nimellinen paksuus. Säteilysuojusta on siksi lisättävä rakenteeseen, jotta se olisi kauttaaltaan riittävä. Sama menettelytapa koskee myös esimerkiksi reikätiileistä muurattuja seiniä. (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.) Keskussairaala Novassa on tästä syystä käytetty välipohjarakenteena paikallavalulaattoja kuumasairaan puolella, jotta betonipaksuus olisi kauttaaltaan sama.

Suojuksissa käytettävät lyijylevyt on limitettävä päällekkäin tai liitettävä toisiinsa tiiviillä puskuliitoksella. Levyjen saumakohtat on syytä peittää puskuliitosta käytettäessä ylimääräisellä lyijylevykaistalla, jolloin suojaamatonta rakoa ei jää levyjen väliin.

Huomioitava on myös suojuksissa olevat reiät ja ohennukset, kuten sähkörsiat ja katkaisijat sekä seiniin upotetut putket. Huomiota on myös kiinnitettävä ovien, ikkunoiden sekä karmien asianmukaiseen suojauskykyyn. Säteilysuojusten on oltava kauttaaltaan riittävät. (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.)

3.2 Sädehoitobunkkeri

Keskussairaala Novan sädehoitobunkkeriin kuuluu muun muassa kolme sädehoitotilaa. Tilat ovat sijoitettu vierekkäin, jolloin voidaan hyödyntää kunkin tilan seinämäpaksuuksia.

Sädehoitotilat koostuvat primääri- ja sekundäärisuojista. Silloin, kun primäärisäde kohdistuu seiniin ja kattoon, tarvitaan primäärisuojia. Jos tilat sijaitsevat kaikkien käytettävissä olevien alueiden yläpuolella, lattian on myös oltava primäärisuojattu. Primäärisuojat ovat paljon paksumpia kuin muut tilan rakenteet, joita kutsutaan sekundäärisuojiksi. (Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities 2006.) Sekundäärisuojat on suunniteltava siten, että ne suojaavat riittävästi kiihdytinhuoneen ulkopuolelle pääsevältä vuoto- ja sirontasäteilyltä. Koska vuoto- ja sirontasäteily ovat erilaisia energioita, jokainen sekundäärisuoja lasketaan tyypillisesti erikseen, jotta saavutettaisiin lopullinen suositeltu rakennepaksuus. (Report No. 151 – Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities 2005.)

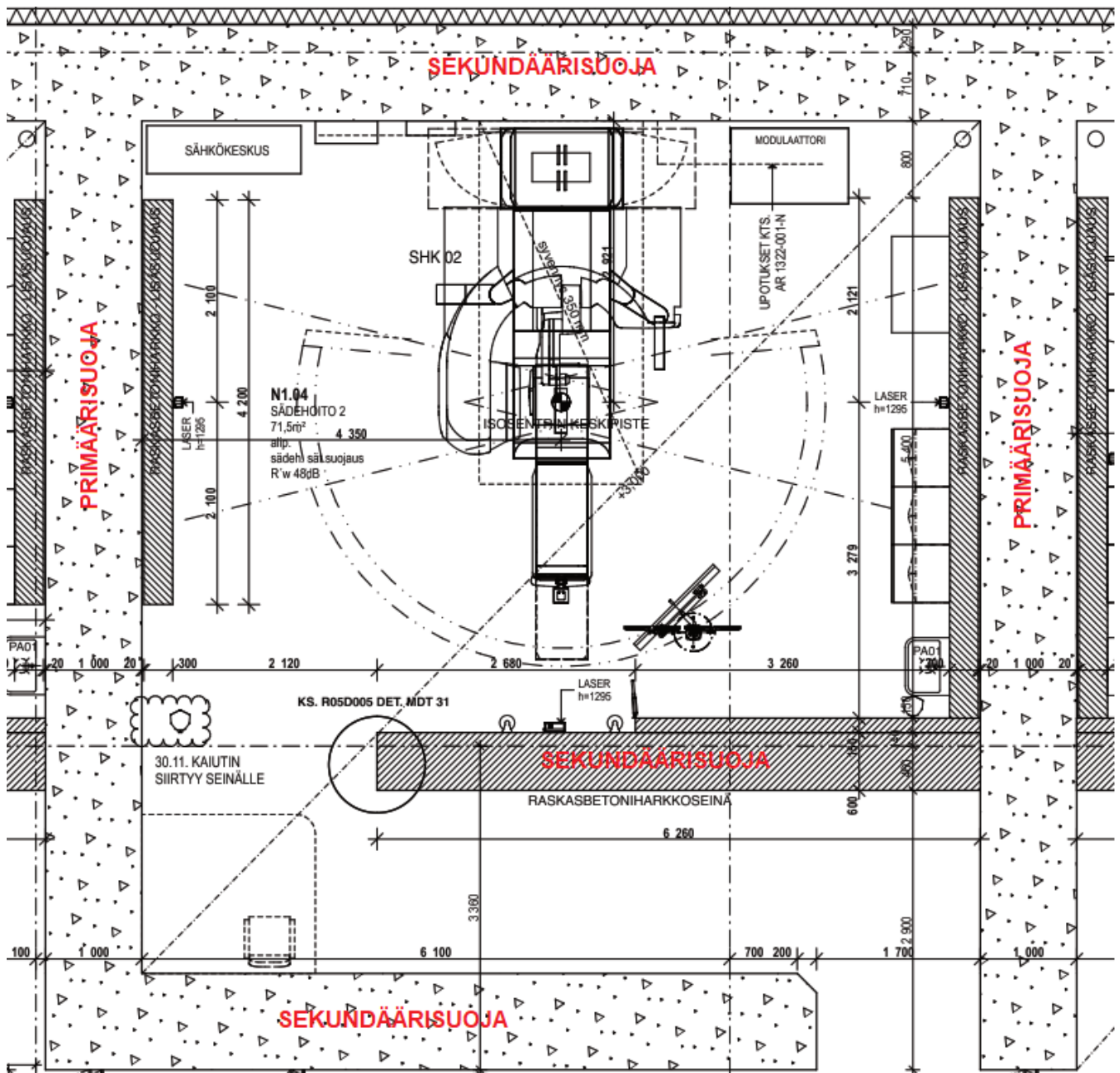
Tavanomaiset säteilysuojausmateriaalit ovat tavallinen betoni tai raskasbetoni, sekä teräs ja lyijy. Betoni on yleensä näistä edullisin materiaali, mutta betonin tiheys ei kuitenkaan ole yhtä suuri tai tasalaatuinen kuin teräksellä ja lyijyllä. (Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities 2006.)

Kun sädehoitokiihdyttimen toiminta ylittää 10 MV:n kiihdytinjännitteen, laitteessa syntyy myös neutronisäteilyä. Neutronisäteilylle parhaat suojamateriaalit ovat aiheet, jotka ovat vetypitoisia. Sädehoitokiihdyttimen suojukset yleensä rakennetaan betonista, joka sisältämänsä veden vuoksi sisältää myös vetyä. Kun suunnitellut betonisuojukset ovat mitoitettu riittäviksi fotonisäteilylle, ovat ne myös yleensä riittävät neutronisäteilylle. Ainoa paikka, jossa neutronisäteily pitää erikseen huomioida, on huoneeseen johtavan sisäänkäynnin oviaukko, johon hoituhuoneessa syntyvät neutronit pääsevät siroamaan kulkukäytävää pitkin. (Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011.)

Suunnitelmaan voidaan sisällyttää huoneeseen johtava rajoitettu pääsy säteilyannoksen vähentämiseksi sisäänkäynnin läheisyydessä. Tätä kulkureittiä kutsutaan sokkeloksi. Ihannetapauksessa sokkelon pitäisi olla mahdollisimman pitkä ja samalla poikkeileikkaukseltaan mahdollisimman pieni. Minimileveys määritetään niin, että potilaan kuljetus on esteetön. Sokkelo varmistaa, että fotonisäteily voi poistua huoneesta vain sen jälkeen, kun sironta on heikentänyt sitä. Sokkelo vähentää raskaan suojaoven tarvetta. Jos sokkelon pituus on riittävä tai se on tarpeeksi mutkikas, ei sokkelon sisäänkäynnissä ole välttämättä tarvetta säteilysuojaovelle annosnopeuksien vähentämiseksi. On kuitenkin suositeltavaa, että jonkinlainen fyysinen este, kuten normaali kulkuovi tai portti, estää tällöin pääsyn tiloihin. Toinen sokkelon etu on ilmanvaihtokanavien ja sähköjohtojen reitti ilman läpivientejä, jotka aiheuttaisivat suuria toimenpiteitä suojauksen kannalta. Suojaovea puoltavat tekijät sen sijaan ovat tilan säästäminen, sillä sokkelo vie suhteellisen paljon tilaa ja hankaloittaa tilaan pääsyä. (Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities 2006.) Keskussairaala Novaan harkittiin vaihtoehtoa säteilysuojaovelle, mutta suojaovien suuret kustannukset sekä ristiriitaiset käyttökokemukset sekä asennuksen että käyttöönoton osalta Kuopion yliopistollisessa keskussairaalassa sulki pois tämän vaihtoehdon. Bunkkerin rakenteesta suunniteltiin vahvasti sokkeloinen, joten säteily oviaukon kohdalla jää minimaaliseksi. (Kärnä 2019.)

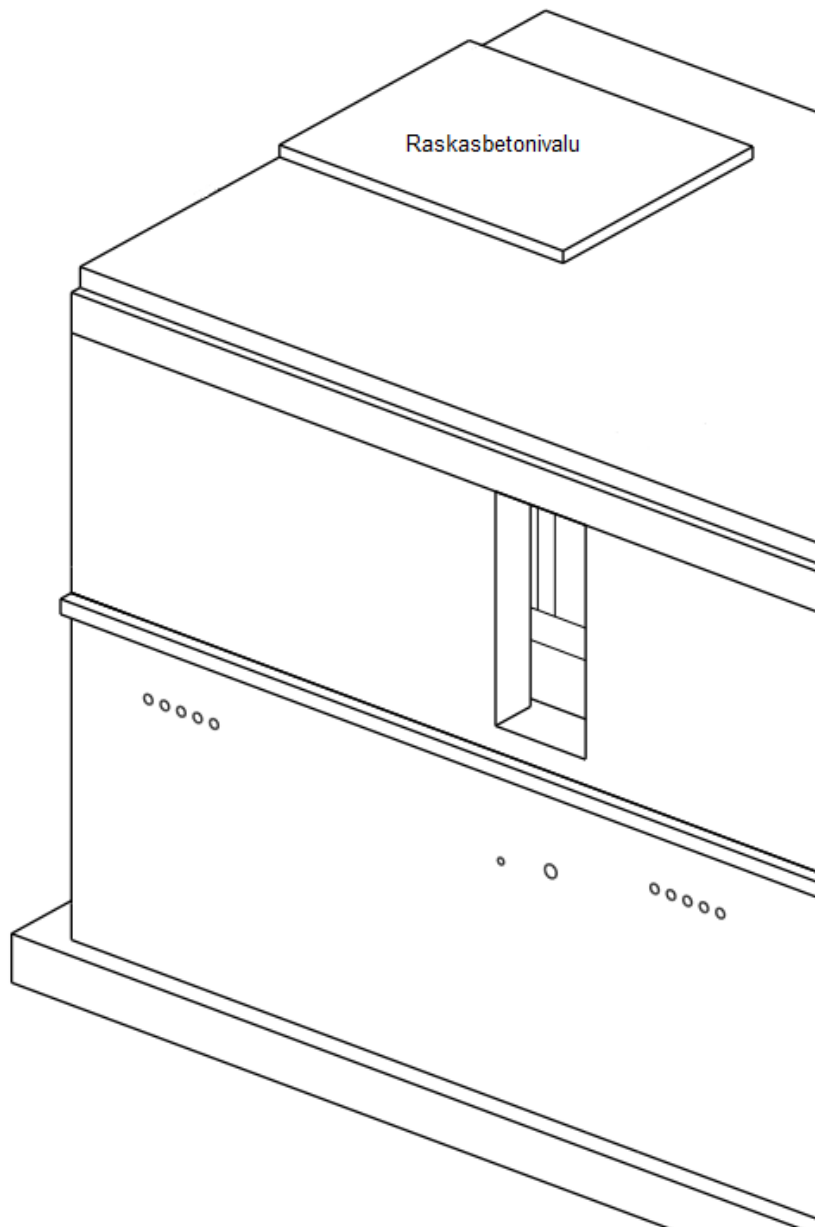
Katon suunniteltu annosraja riippuu bunkkerin sijainnista. Jos rakennus on yksikerroksinen, ainoa rajoite säteilyttämislle voi olla katolle pääsyn estäminen. Jos rakennuksen yksikerroksisuutta ei oteta huomioon, tulee huomioida taivassironnan vaikutus, joka saattaa johtaa läheisten rakennusten säteilyttämiseen. Jos lähellä on ydinlääketieteen osasto, myös gammakamerat ja mahdollisesti muut kuvantamislaitteet ovat erityisen herkkiä alhaisillekin säteilyn tasoille, jotka voivat vaikuttaa potilastutkimuksiin. Jos bunkkerin alapuolella on toimitiloja, on syytä harkita niiden käyttötarkoitusta esimerkiksi varastotilaksi. (Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities 2006.)

Keskussairaala Novan sädehoitobunkkeri valettiin kokonaan raskasbetonilla. Kuten kuvioista 11 näkyy, sädehoitobunkkerin seinämävahvuus on kauttaaltaan 1000 mm paksua raskasbetonia.



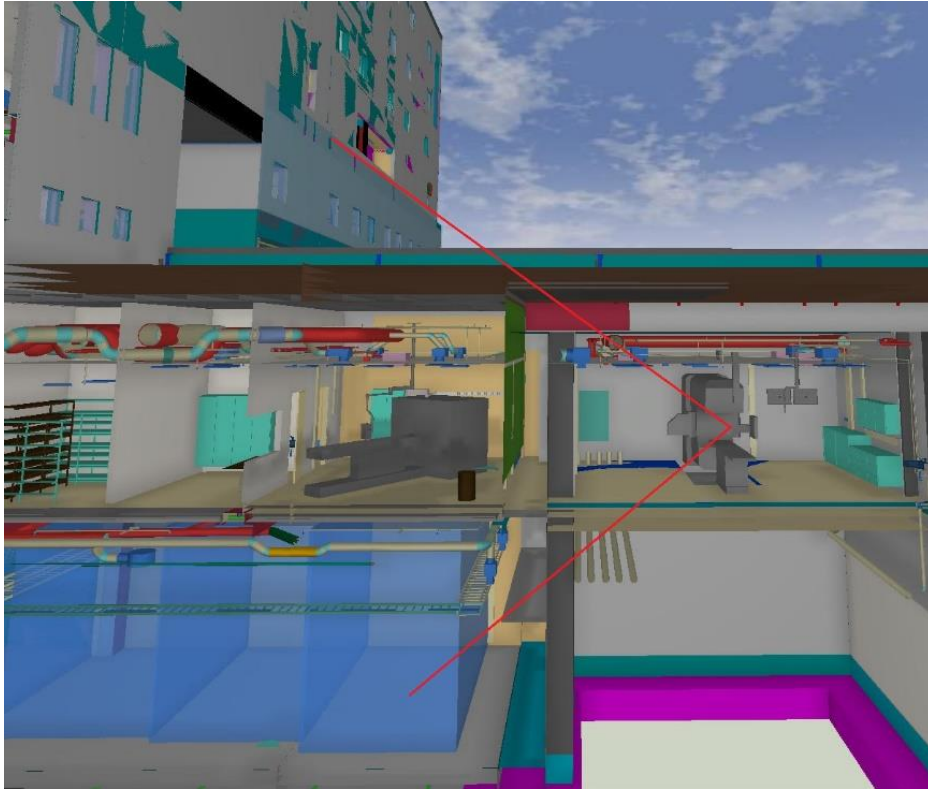
Kuvio 11. Sädehoitotila.

Primäärisäteen alueella on kummallakin puolella raskasbetoniharkkoista muurattu 300 mm:n lisäsuoja, tehden yhteensä 1600 mm:n raskasbetoniseinävahvuuden. Myös bunkkerin kattoon valettiin raskasbetonista lisäsuoja (ks. kuvio 12), koska oli mahdollista, että viereisen rakennuksen ylemmät kerrokset olisivat altistuneet säteilylle. Taivassironnan vaaraa ei laskelmissa todettu (Kärnä 2019).



Kuvio 12. Sädehoitobunkkerin raskasbetonista valettu katon lisäsuoja.

Myös sädehoitobunkkerin alemman kerroksen seinän betonipaksuutta vahvistettiin, (ks. kuvio 13), sillä biopankkihuoneen säteily määrä olisi saattanut kasvaa liian suureksi maksimiannosnopeuksilla.



Kuvio 13. Lisäsuojausta tarvinneet alueet.

3.3 Kuumasairaala

Kuumasairaalan säteilytilat koostuvat muun muassa tiloista PET- ja SPECT-laitteille sekä luuntiheysmittauslaitteille, kahdesta eristyshuoneesta ^{131}I -potilaille, radioaktiivisten jätteiden säilytyshuoneesta sekä leikkaussaleista.

Eristyshuoneet ovat kuumasairaalan keskeinen osa, ja katselmuksessa sairaalafyysikko oli huolissaan sängyn paikasta. Sairaalafyysikko halusi, että sänkyä siirrettäisiin keskemmäksi huonetta tai että sänky käännettäisiin ympäri. Tällöin potilaan säteilyä emittoiva kilpirauhanen ei sijoittuisi niin lähelle seinää, jolloin säteilyn vaikutus olisi pienempi viereisessä tilassa (ks. luku 2.3). Arkkitehti ei nähnyt tätä muutosta sopivaksi, sillä yöpöydän sijainti ei olisi ollut enää hyvä. Arkkitehtuuriset näkökulmat sekä käytännön toteutus eivät kohdanneet tässä asiassa. Sänky kuitenkin sovittiin käännettäväksi ympäri, sillä säteilyturvallisuus nähtiin tärkeämmäksi tekijäksi. Katselmuksessa ehdotettiin myös, että sängyn paikka rajattaisiin erillisellä lattiamatolla, jolloin

henkilökunnan olisi helpompi hahmottaa sängyn sijainti, eikä sänky siirtyisi liian lähelle seinää aiheuttaen tilanteen, jossa säteily määrä kasvaisi liian suureksi seinän toisella puolella.

Alla oleva laskuesimerkki on PET-tilan suojaustarpeesta (isotooppikuvaus). Vastavaanlainen tila on myös keskussairaala Novassa, jossa läpivientisuojaus kehitettiin. Laskussa otetaan huomioon missä huoneessa säteilylähde sijaitsee, alueen tyyppi (kontrolloitu, kontrolloimaton), etäisyys säteilylähteestä (kuvaushuone, lepohuone), oleskelutekijä ja suunniteltu suojaus. Arviointilaskussa on käytetty ^{18}F -isotooppia, koska sillä on käytettäväksi suunnitelluista isotoopeista pisin puoliintumisaika.

PET-laitteiston vaatimat säteilysuojaukset on laskettu Madsenin ym. (2006) tutkimuksen mukaisesti. Väestön vuosiansio on korkeintaan 1 mSv, josta annosrajoitus yhdestä säteilylähteestä aiheutuvalle altistukselle on 0.3 mSv (ST-ohje 6.3, kpl 11.1). Lisäksi betonin tiheyden oletetaan laskussa olevan 2350 kg/m^3 ja annosnopeutena F-18 tapauksessa käytetään $0,092 \mu\text{Sv m}^2 / \text{MBqh}$.

Madsen et al.: AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding

TABLE VI. Summary of dose parameters.

Parameter	Definition	Formulation
A_0	Administered activity (MBq)	
t	Time (h)	
t_U	Uptake time (h)	
t_I	Imaging time (h)	
$D(t)$	Total dose for time t (μSv)	
$D(0)$	Initial dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)	
$T_{1/2}$	Radionuclide half-life (h)	
R_t	Dose reduction factor over time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t) \times [1 - \exp(-0.693t/T_{1/2})]$
R_{tU}	Dose reduction factor over uptake time time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t_U) \times (1 - \exp(-0.693t_U/T_{1/2}))$
R_{tI}	Dose reduction factor over imaging time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t_I) \times [1 - \exp(-0.693t_I/T_{1/2})]$
N_w	Number of patients per week	
d	Distance from source to barrier (m)	
F_U	Uptake time decay factor (μSv)	$=\exp[-0.693t_U/T_{1/2}]$
T	Occupancy factor	
P	Weekly dose limit	
	Transmission factor (uptake room)	$=10.9 \times P \times d^2 / [T \times N_w \times A_0 \times t_U(h) \times R_{tU}]$
	Transmission factor (scanner room)	$=12.8 \times P \times d^2 / [T \times N_w \times A_0 \times F_U \times t_I(h) \times R_{tI}]$

Kuvio 14. Annosparametrit (Madsen ym. 2006).

Potilaat, joille tehdään PET-skannauksia, tulee olla lepohuoneessa levossa ennen kuvantamista. Ajatus on, että merkkiaine F-18 FDG (fluorodeoksiglukoosi) hakeutuisi mahdollisimman vähän luurankolihaasiin samalla, kun se saavuttaa halutun kohteen, kuten syöpäkasvaimen. Merkkiaineen imeytymisaika (uptake time) vaihtelee, mutta se on tavallisesti 30-90 min. Kokonaisannos imeytymisajalla t_U pisteessä, joka on d metrin päässä potilaasta, on

$$D(t_U) = \frac{0,092\mu Sv m^2 / MBqh \cdot AoMBq \cdot t_U h \cdot R_{t_U}}{(dm)^2}.$$

Jos N_W potilasta skannataan viikossa, niin viikon kokonaisannos on

$$\frac{0,092\mu Sv m^2 / MBqh \cdot N_W \cdot AoMBq \cdot t_U h \cdot R_{t_U}}{(dm)^2}.$$

Täten tarvittava läpäisykerroin (transmission factor) B on

$$B = \frac{10,9MBqh / \mu Sv m^2 \cdot P \cdot (dm)^2}{T \cdot N_W \cdot AoMBq \cdot t_U h \cdot R_{t_U}},$$

missä T on oleskelutekijä (occupancy factor) ja P on viikoittainen annosraja (μSv).

Huomaa lisäksi, että $(0,092\mu Sv m^2 / MBqh)^{-1} = 10,9MBqh / \mu Sv m^2$.

Yhdysvalloissa kontrolloimattomien alueiden viikoittainen annosraja on $P = 20\mu Sv$ (ALARA -tasoilla), mikä vastaa väestön 1 mSv vuosirajoitusta. Tämä raja on sama Suomessa. Täten läpäisykerroin on kontrolloimattomille alueille

$$B = \frac{218MBqh / m^2 \cdot (dm)^2}{T \cdot N_W \cdot AoMBq \cdot t_U h \cdot R_{t_U}}.$$

Vastaava raja kontrolloiduille alueille on $P = 100\mu Sv$ (ALARA-tasoilla). Täten läpäisykerroin on kontrolloiduille alueille

$$B = \frac{1090MBqh / m^2 \cdot (dm)^2}{T \cdot N_W \cdot AoMBq \cdot t_U h \cdot R_{t_U}}.$$

Esimerkiksi: Mikä on läpäisykerroin, jota tarvitaan kontrolloimattomalle alueelle [oleskelutekijä $T = 1$] 3m päässä potilaan tuolista lepoahuoneessa? Oletetaan, että potilaalle annetaan 500 MBq vastaava annos F-18 FDG:tä, potilaita on 35 per viikko ja imeytymisaika t_U on 1h eli 60min. Lisäksi kuvioista 14 saadaan kaava, jolla voidaan laskea R_{t_U} F-18 puoliintumisajan ollessa 109,8min. Tällöin saadaan

$$R_{t_U} = 1,443 \cdot (109,8\text{min}/60\text{min}) \cdot (1 - e^{-0,693 \cdot 60\text{min}/109,8\text{min}}) = 0,83.$$

Tällöin läpäisykerroimeksi saadaan

$$\frac{218\text{MBqh}/\text{m}^2 \cdot (3\text{m})^2}{1 \cdot 35 \cdot 500\text{MBq} \cdot 1\text{h} \cdot 0,83} = 0,135.$$

Käyttäen kuvion 15 arvoja, tarvitaan suojaksi 14mm lyijyä tai 170 mm betonia.

TABLE IV. Broadbeam transmission factors at 511 keV in lead, concrete, iron.

Thickness ^{a, b}	Transmission Factors		
	Lead	Concrete ^c	Iron
0	1.0000	1.0000	1.0000
1	0.8912	0.9583	0.7484
2	0.7873	0.9088	0.5325
3	0.6905	0.8519	0.3614
4	0.6021	0.7889	0.2353
5	0.5227	0.7218	0.1479
6	0.4522	0.6528	0.0905
7	0.3903	0.5842	0.0542
8	0.3362	0.5180	0.0319
9	0.2892	0.4558	0.0186
10	0.2485	0.3987	0.0107
12	0.1831	0.3008	0.0035
14	0.1347	0.2243	0.0011
16	0.0990	0.1662	0.0004
18	0.0728	0.1227	0.0001
20	0.0535	0.0904	
25	0.0247	0.0419	
30	0.0114	0.0194	
40	0.0024	0.0042	
50	0.0005	0.0009	

^aThickness in mm for lead.

^bThickness in cm for concrete and iron.

^cConcrete density=2.35 g/cm³.

The Monte Carlo transmission data have been fitted to the model proposed by Archer *et al.* (Ref. 10): $\mathbf{B} = \{(1 + (\beta/\alpha))e^{\alpha x} - (\beta/\alpha)\}^{(1/\gamma)}$. This can be inverted to obtain x (material thickness) as a function of transmission (B): $x = (1/\alpha\gamma) \ln\{[B^{-\gamma} + (\beta/\alpha)]/[1 + (\beta/\alpha)]\}$.

Kuvio 15. Väliytiskertoimet (Madsen ym. 2006).

On kuitenkin tärkeä muistaa, että ei ole olemassa yhtä sääntöä tarvittaville materiaalipaksuuksille suojaamaan tietyltä säteilymäärältä (ks. luku 3.1). Kaikki tilat on mitoitettava siten, että jokaisen tilan materiaalipaksuudet voivat muuttua käyttötarkoituksesta ja käytettävistä säteilylähteistä riippuen. Esimerkiksi PET-tilan laskuesimerkissä lyijyä on käytetty suhteessa betoniin noin 1:10, kun taas röntgentiloissa usein käytetään samoja materiaaleja siten, että 1 mm lyijyä vastaisi noin 100 mm betonia. On todella kallista pitää vakiona sääntöä, että 1 mm lyijyä vastaisi 100 mm betonia tilanteesta riippumatta. Tällainen käsitys on tullut rakennustyömaalla vastaan. Vastavasti aliarviointi on vaarallista, joten säteilysuojien optimoinnissa on tärkeää, että tarvittavat lähtötiedot ovat kunnossa.

3.4 Säteilysuojamateriaalit

Tässä kappaleessa kuvataan säteilysuojauksessa usein käytettäviä materiaaleja sekä niiden käyttöominaisuuksia. Keskussairaala Novassa säteilysuojaukseen käytettiin lyijyä, tavallista betonia, raskasbetonia ja terästä.

Lyijy on fotonisäteilylle hyvä suojamateriaali, ellei energia ylitä 0,5 MeV:a. Valosähköinen absorptio on merkittävin vuorovaikutus tällä energia-alueella, massavaimennuskertoimen ollessa lähes verrannollinen aineen järjestysluvun Z kolmanteen potenssiin. Energian ylittäessä viisi megaelektronivoltia, on merkittävin absorptioprosessi parinmuodostus, massavaimennuskertoimen ollessa lähes verrannollinen Z :aan. Elektronisäteilylle lyijy on huono suojamateriaali, koska lyijyyn törmätessään elektronit synnyttävät runsaasti jarrutussäteilyä. Esimerkiksi alumiinia voidaan käyttää elektronisuojaukseen. (Sipilä n.d.)

Beetasäteily (β^-) on pyrittävä hidastamaan materiaalissa, jonka järjestysluku on mahdollisimman pieni (Ikäheimonen 2002). Esimerkiksi radioaktiivisen ^{32}P -isotoopin suojauksessa tulee käyttää pienitiheysisiä materiaaleja, kuten muovia, puuta tai jotakin vetypitoista materiaalia, koska toisin kuin lyijyllä, atomien lukumäärä on näillä

materiaaleilla alhaisempi, jolloin jarrutussäteilyn voimakkuus pienenee merkittävästi (Phosphorus – 32 2018).

Lyijylevyä käytettäessä lyijy on tuettava kiinteää seinää vasten, tai laminoitava puu, teräs tai kipsilevyjen väliin, sillä rakennusteknisesti lyijy on pehmeä materiaali ja valuu suuren painonsa takia (ks. kuvio 16) (Sipilä n.d.).

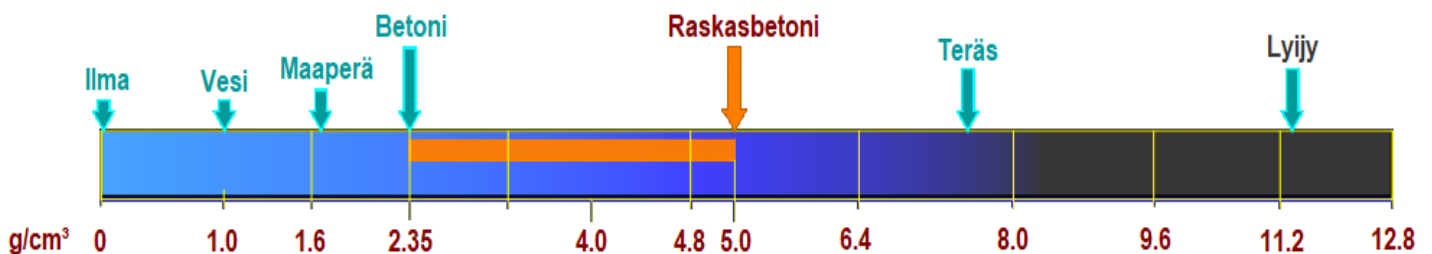


Kuvio 16. Lyijyn valuminen.

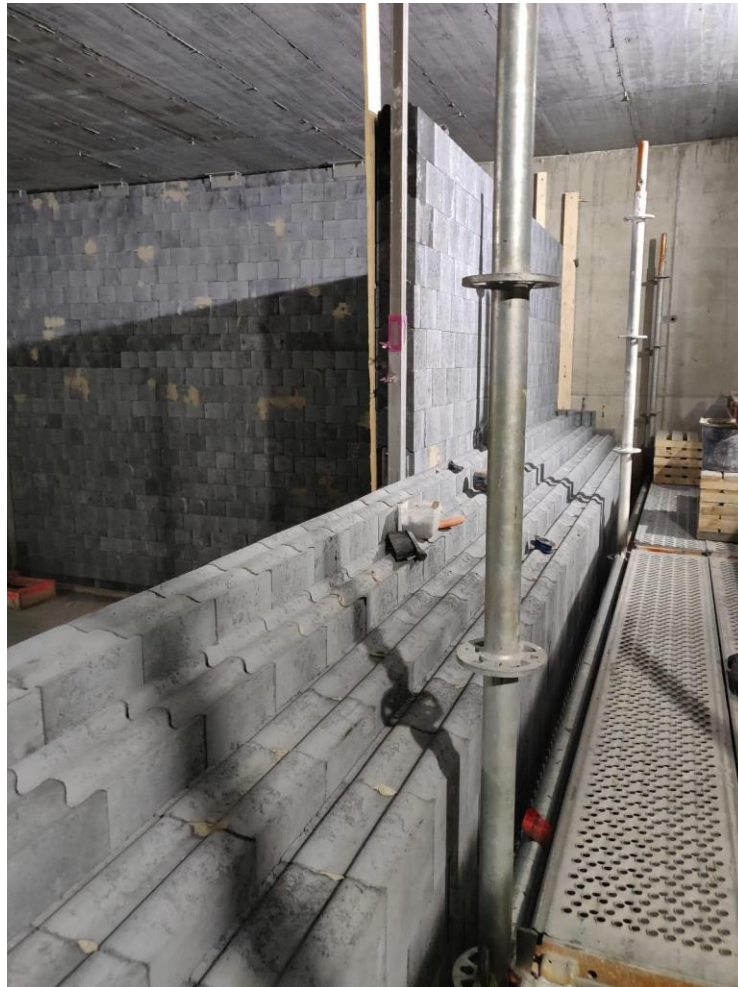
Betoni on eniten käytetty suojamateriaali fotonisäteilylle. Se on suhteellisen edullista ja kestävä, mikä tekee siitä erinomaisen rakennusmateriaalin, josta on helppo valaa paksujakin säteilysuojia. Betoni sisältää vetyä, jonka vuoksi se soveltuu myös neutronisuojaukseen. Vesi kuitenkin vähenee betonissa ajan kuluessa, mikä heikentää sen neutronisuojausominaisuuksia. Betoni ei myöskään ole homogeeninen materiaali ja siksi sen koostumus ei ole vakio. Yleensä betoni jaetaan tavalliseen betoniin sekä raskabetoniin. Raskasbetonissa käytetään raskaita luonnollisia aggregaatteja, kuten bariumsulfaattia, magnetiittia tai valmistettuja aggregaatteja, kuten rautaa tai muita lisäaineita. Näiden lisäaineiden seurauksena raskaalla betonilla on suurempi tiheys kuin tavallisella betonilla (noin 2300 kg/m^3). Raskasbetoni voi saavuttaa jopa $5\,900$

kg/m³:n tiheyden raudan lisäaineilla, tai jopa 8900 kg/m³:n lyijyn lisäaineilla. Raskasbetoni suojaa tehokkaasti neutroneja vastaan. (Shielding of Neutron Radiation n.d.)

Raskasbetonia saa myös harkkoina. Keskussairaala Novassa ne todettiin hyväksi ja toimivaksi ratkaisuksi, ja niillä muurattiin bunkkerin primäärisäteilyn keilan ala sekä sekundäärisuojat. Raskasbetoniharkon betonimassan ominaispaino on noin 3800 kg/m³. Harkkomassan suuren tiheyden ansiosta harkot suojaavat säteilyltä paremmin kuin tavallinen betoni. Rakenteista voidaan näin tehdä ohuempia, jolloin saadaan lisää huonetilaa. Etuna on myös rakenteiden lyhyempi kuivumisaika. Harkot valmistetaan valvotuissa olosuhteissa sarjatuotantona maakosteasta betonimassasta valumuottiin tiivistämällä. Tämä takaa harkkojen mittatarkkuuden ja tasalaatuisuuden. Teollisesti valmistettuina raskasbetoniharkon betonimassan vedenmäärä saadaan optimoitua. Lopullinen rakenteen kuivumisaika on lyhyempi verrattuna paikallavalurakenteisiin. Ponttien muoto on suunniteltu niin, että harkkojen saumat vaimentavat säteilyä mahdollisimman tehokkaasti. Säteilysuojarakenteissa vierekkäiset harkkosaumut voidaan limittää, jotta suoja saadaan kokonaisuudessaan optimoitua. (Hurri 2019.) Raskasbetoniharkot ovat Suomessa uusi tuote, ja säteilyvaimennuskyvyn varmistamiseksi sairaalafyysikot mittasivat harkkojen säteilyvaimennuskykyä. Harkkoja säteilytettiin kiihdyttimillä ja kokeiden perusteella saatiin säteilyvaimennuksen kymmenpaksuudet selville. Harkot ovat hyödyllisyysmallisuojuuttu, ja Lakan Betoni Oy toimii harkoille ainoana toimittajana Suomessa. Kuviossa 17 on esitetty yleisesti käytettävien säteilysuojamateriaalien tiheydet.



Kuvio 17. Ainetiheydet (suomennettu) (Harrell 2010).

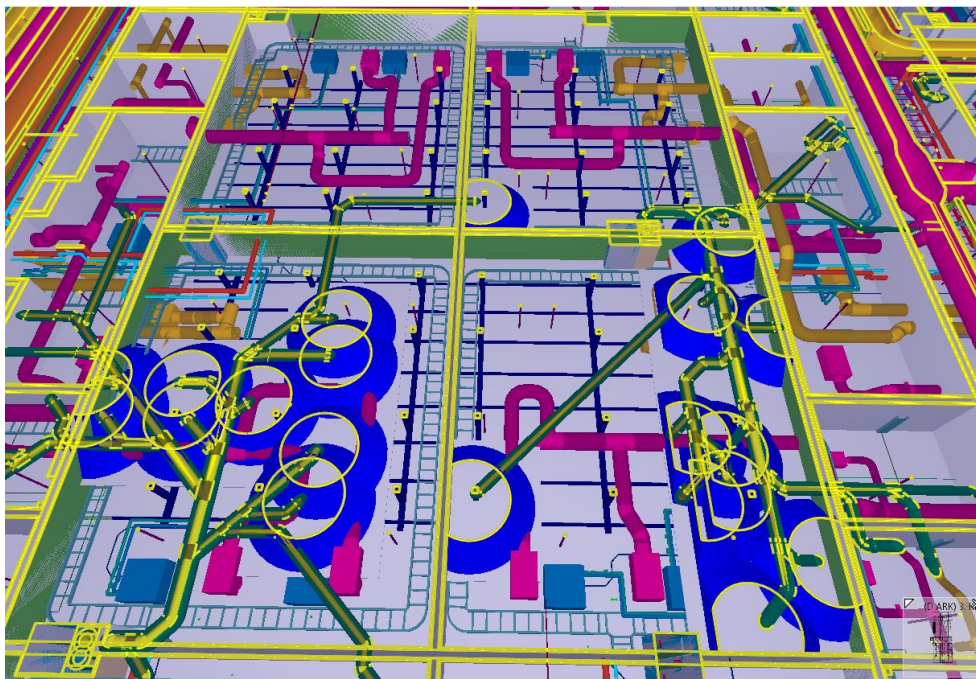


Kuvio 18. Raskasbetoniharkot, sädehoitobunkkeri.

Teräs on yleinen lisäsuojamateriaali kiihdyttimien primäärikeilan suojauksessa sen mekaanisen kestävyuden sekä edullisuuden vuoksi. Teräs ei kuitenkaan ole hyvä vaihtamaan neutronisäteilyä, joten ainoaksi suojamateriaaliksi se ei kelpaa. (Sipilä n.d.) Suojamateriaalina neutronisäteilyyn voidaan käyttää esimerkiksi polyeteeniä. Polyeteenin tiheys on noin 920 kg/m^3 , ja sillä on suuri vetypitoisuus, joka on noin 5 % painosta. Terminen neutronien talteenotto polyeteenissä voi kuitenkin johtaa 2,2 MeV:n fotonien muodostumiseen, jota voidaan lieventää lisäämällä booriyhdistettä. (Sayden, Rokni & James n.d.) Boratoitua polyeteeniä on helppo käsitellä, valmistaa ja asentaa, joten se sopii erinomaisesti erilaisiin suojauskohteisiin, kuten korkean intensiteetin röntgensäteilytiloihin, sädehoitobunkkereihin tai ydinenergiatiloihin. (Radiation Protection Products n.d.)

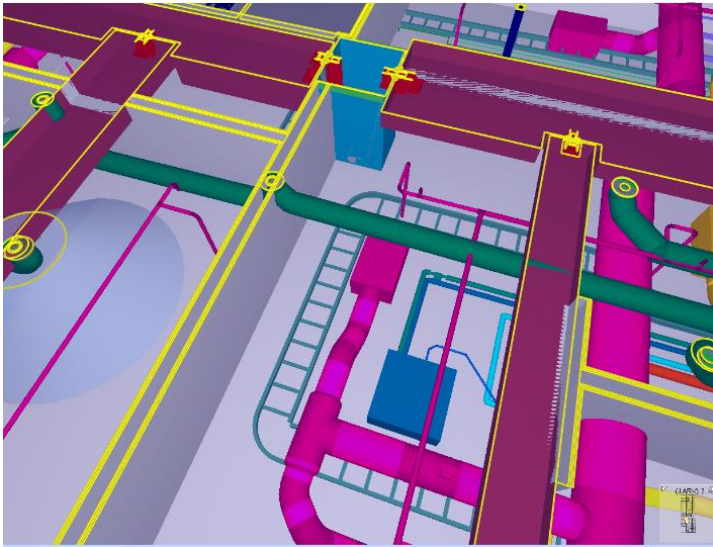
3.5 Lämpiviennit

Opinnäytetyön keskeisin tavoite oli toimivien läpivientisuojausten suunnittelu ja toteutus. Suunnittelijoita pyydettiin mallintamaan läpiviennit, jotka olivat säteilytilojen välittömässä läheisyydessä, eli ala- ja yläpuolisissa kerroksissa sekä viereisissä huoneissa. Mallinnetuista läpivienneistä pystyi helpommin hahmottamaan läpivientien vaatiman säteilyltä suojattavan alueen. Tämä helpotti vaikeiden läpivientien kartoittamista (ks. kuvio 19).

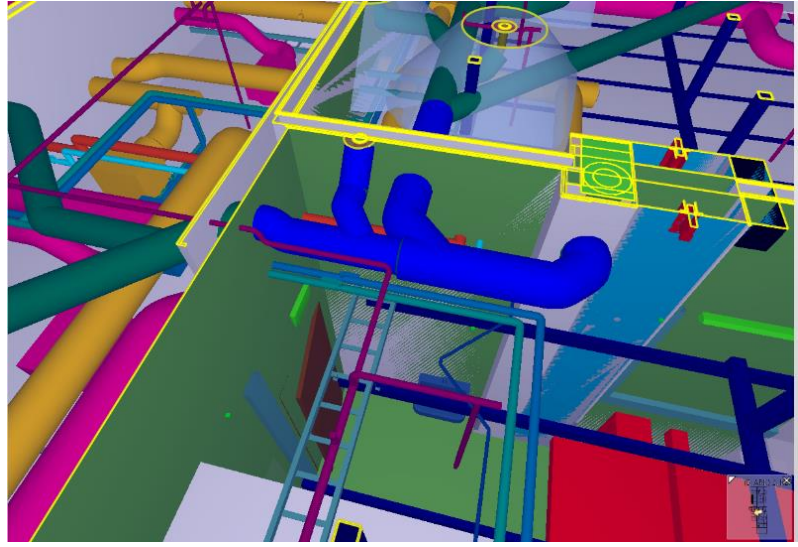


Kuvio 19. Mallinnetut läpiviennit.

Parhaimmillaan lyijyä oli 6 mm:n paksuudelta (3 mm molemmissa laminoituissa levyissä) tekniikan ja alakaton välissä painaen yhteensä 88 kg/m^2 , tehden kokonaisten levyjen painoksi $137,3 \text{ kg}$ (X-Ray Protect n.d.) Tilannetta vaikeutti se, että alakaton päällä oli paljon tekniikkaa pienessä tilassa. Vaikeita paikkoja olivat myös sellaiset, joissa läpivienti tuli ylemmästä kerroksesta alemman kerroksen seinän keskelle, tai samanaikaisesti piti suojata sekä pysty- että vaakalämpiviennit (ks. kuviot 20 ja 21).



Kuvio 20. Läpivienni seinän sisässä.



Kuvio 21. Läpiviennit suojattava samanaikaisesti pysty- ja vaakasuuntaisesti.

Suojauksia toteuttaessa myös tarkastusluukut piti huomioida, sillä ne olisivat muuten jääneet käyttökelvottomiksi suojausten väliin (ks. kuvat 22 ja 23).

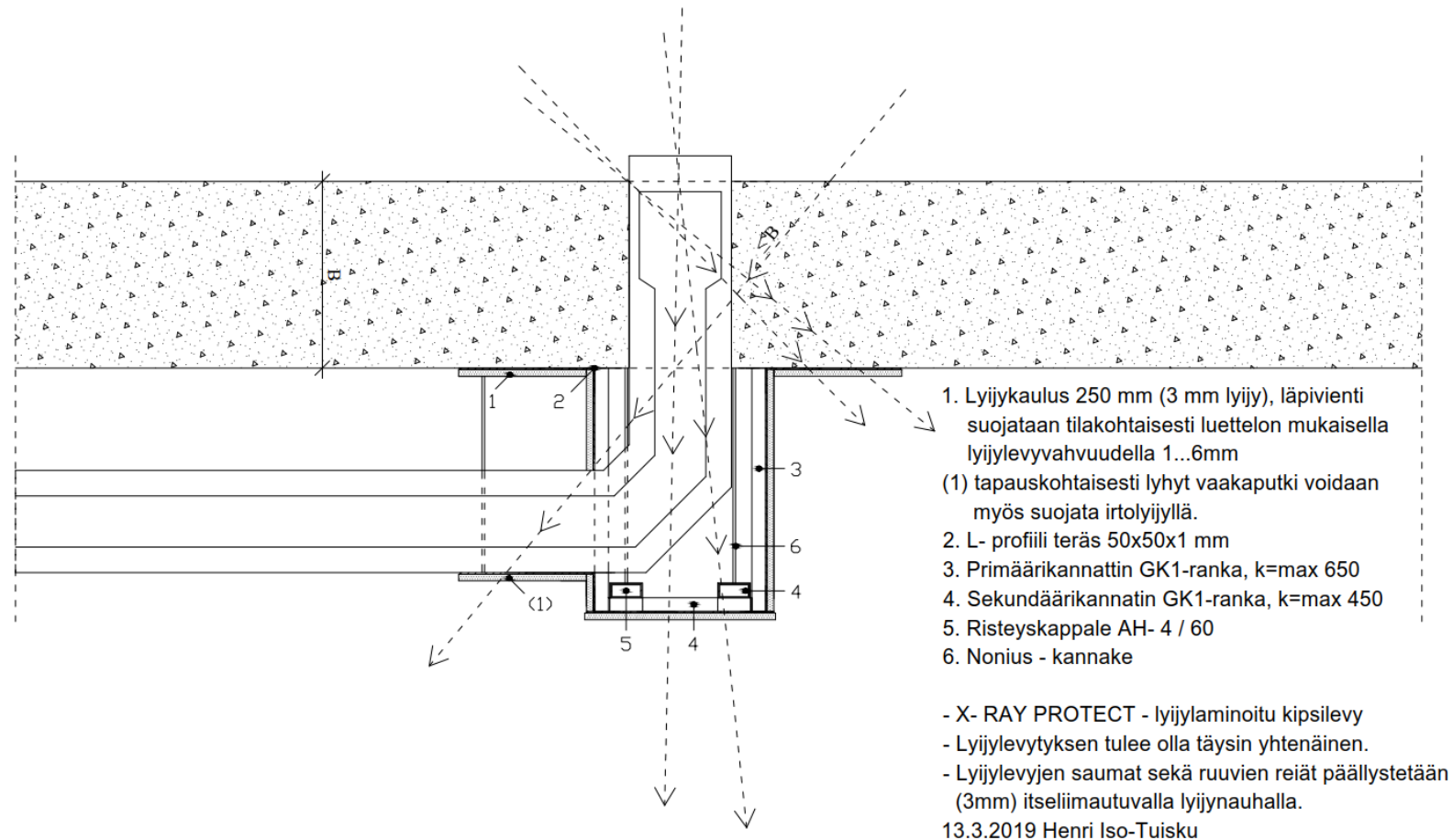


Kuvio 22. Tarkastusluukku



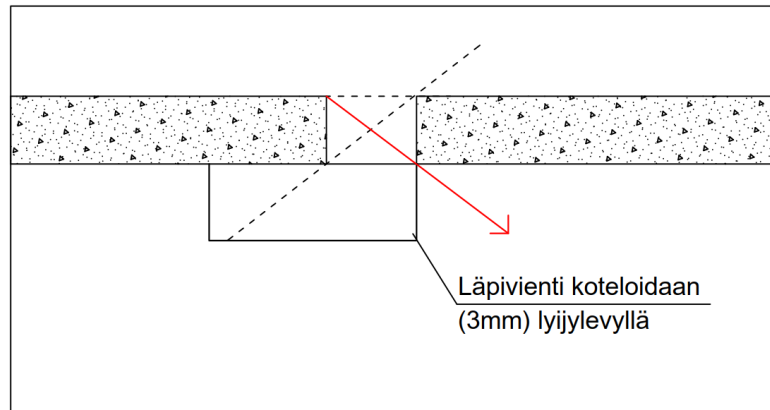
Kuvio 23. Tarkastusluukun suojaus toteutettuna.

Läpivienneille täytyi suunnitella uusi toteutustapa, sillä tilaaja hylkysi alkuperäisen arkkitehtien tekemän suunnitelman. Kuviossa 24 on esitetty uusittu suunnitelma. Kun lyijylevy asennetaan betonilaatan alapintaan (läpiviennin juureen), poistetaan te-
kijä, joka kasvattaisi säteilyn leviämisen kulmaa. Tämä pienentää suojuksen leveyden tarvetta. Kotelomainen ratkaisu on hyvä myös sellaisissa paikoissa, joissa tarvitaan samalla läpivientien vaakasuuntaista suojausta.



Kuvio 24. Uusittu läpivientisuunnitelma.

Kompaktisti koteloitu läpivienti säästää tilaa ja lyijyä, sillä suojausaluetta ei tarvitse kasvattaa. Se myös estää virheellisen toteutustavan, jolla säteily on suojattu vain läpiviennin toiselta puolelta, jättäen toisen puolen suojaamattomaksi (ks. kuvio 25).



Kuvio 25. Virheellinen toteutustapa.

Uusi suunnitelma (ks. kuvio 24) ratkaisee myös sen, että jos irtolyijyä lisättäisiin läpivientiputken ympärille, paksujen lyijykerrosten asennus olisi vaikeaa. Esimerkiksi vaativimmissa paikoissa 6 mm:n irtolyijyn laadukas asennus olisi käytännössä mahdotonta. Lyijy myös valuu ajan kuluessa (ks. kuvio 16), joten ei olisi varmuutta, että irtolyijy pysyisi täysin paikoillaan (ks. kuvio 26). Lyijy on lisäksi hyvin raskasta, joten kiinnitettynä läpivientiputken ympärille lyijy kuormittaisi kannakkeita, joita ei ole suunniteltu sitä kestävään.



Kuvio 26. Irtolyijyllä vuorattu läpivientiputki.

4 Tutkimuksen toteutus

4.1 Tutkimusmenetelmät

Tässä kappaleessa kuvataan keskeisimmät tutkimusmenetelmät, joita tässä tutkimuksessa käytettiin. Tutkimus koostui pääasiassa kvalitatiivisista tutkimusmenetelmistä, ja kvantitatiivista tutkimusmenetelmää tullaan käyttämään säteilytilojen mitauksissa.

Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus rajoittuu yleensä pieneen tutkittavien määrään. Tavoitteena on siis ymmärtäminen, ei määrien selvittäminen. Kvalitatiivinen tutkimus sopii hyvin esimerkiksi toiminnan kehittämiseen, vaihtoehtojen etsimiseen ja sosiaalisten ongelmien tutkimiseen. Tietoja kerätään usein syvähaastatteluilla tai ryhmäkeskusteluilla. (Heikkilä 2014.) Tässä opinnäytetyössä aineiston keräämiseen käytettiin saatavilla olevia rakennussuunnitelmia, joiden pohjalta alettiin kehittää toimivaa ratkaisua läpivienteihin. Tutkimuksessa käytettiin avuksi Keski-Suomen sairaanhoitopiirin sädesairaalamafysikoiden ja arkkitehdin haastatteluja sekä heidän luovuttamia aineistoja. Kerättyjen tietojen perusteella suunniteltiin ja toteutettiin läpivientisuojamalli, joka otettiin käyttöön keskussairaala Novassa.

Kvantitatiivisen eli määrällisen tutkimuksen avulla selvitetään lukumääriin liittyviä kysymyksiä. Asioita kuvataan numeeristen suureiden avulla ja usein selvitetään myös eri asioiden välisiä riippuvuuksia tai tutkittavassa ilmiössä tapahtuneita muutoksia. Kvantitatiivisen tutkimuksen avulla saadaan yleensä kartoitettua olemassa oleva tilanne, mutta ei pystytä riittävästi selvittämään asioiden syitä. (Heikkilä 2014.) Tässä opinnäytetyössä kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä tullaan käyttämään, kun valmiiden säteilytilojen säteilynvaimennuskykyä mitataan.

Mixed methods -lähestymistavalla tarkoitetaan laadullisen ja määrällisen tutkimuksen yhdistämistä. Sen peruseriaatteen mukaan laadullisen ja määrällisen tutkimuksen yhdistäminen luo parempaa ymmärrystä tutkimusongelmiin kuin jompikumpi yksinään. Ajatukseen sisältyy huomio, jonka mukaan se paikkaa niitä heikkouksia, joita

niin laadullinen kuin määrällinen tutkimus yksinään pitää sisällään. Lisäksi mixed methods -lähestymistapa mahdollistaa sellaisten tutkimusongelmien asettamisen, mihin laadullinen tai määrällinen lähestymistapa yksinään ei kykene vastaamaan. (Tuomi & Sarajärvi 2018.) Opinnäytetyö on luonteeltaan mixed methods -lähestymistavan mukainen, sillä tutkimuksessa käytettiin pääosin kvalitatiivista tutkimusmenetelmää lähtötietojen kartoittamiseen, ongelmien havainnointiin sekä kenttätutkimuksiin. Kvalitatiivisia menetelmiä tullaan täydentämään kvantitatiivisilla mittauksilla, joilla varmistetaan säteilytilojen suojausten riittävyys. Opinnäytetyö on luonteeltaan myös kehittävää tutkimusta, sillä puutteellisiin suunnitelmiin kehitettiin toimivat ratkaisut, joita kyetään hyödyntämään myös tulevaisuudessa.

4.2 Haastattelujen toteutus

Tutkimuksen haastattelut toteutettiin vuoden 2019 helmikuun ja maaliskuun välisellä ajalla. Haastattelun ajankohdasta sekä rauhallisesta haastattelutilasta sovittiin kunkin haastateltavan kanssa erikseen. Haastattelussa käytettiin avoimia sekä suljettuja kysymyksiä. Avoimia kysymyksiä käytettiin, jotta saatiin laajempia sekä avoimempia vastauksia. Näin haastattelutilanteesta saatiin myös luontevampi tilanne.

Perinteisesti haastattelut on jaettu kysymysten valmiuden ja sitovuuden mukaan strukturoituihin sekä strukturoimattomiin haastatteluihin. Standardoitu ja standardoimaton ovat myös näistä käytettyjä nimityksiä.

Lomakehaastattelu on strukturoitujen haastattelujen ääripäässä valmiine kysymyksiineen ja vaihtoehtoineen, jotka kaikille haastateltaville esitetään samassa järjestyksessä ja samanlaisina. Valmiilla kysymyksillä on pyrkimys varmistaa, ettei haastateltavan vastauksiin vaikuta haastattelijan mielipiteet.

Strukturoimattomassa haastattelussa sen sijaan rakenne muodostuu täysin haastateltavan ehdoilla. Se ei ole tiukasti sidottu kysymysten ja vastausten vuorotteluun, vaan muistuttaa enemmän vapaata keskustelua, johon osapuolet nostavat vapaasti puheenaiheita ja kuljettavat sitä haluamaansa suuntaan. (Ruusuvoori & Tiittula

2015.) Kirjallisuudessa strukturoimattomista haastatteluista on käytetty erilaisia nimityksiä, kuten avoin haastattelu. Tuskin mikään tutkimushaastattelu käytännössä on kuitenkaan täysin strukturoimaton, sillä tutkijan tarvitsee vähintäänkin tietää, mikä aihe häntä kiinnostaa. Laadullisen tutkimuksen haastattelut ovat usein siksi enemmän tai vähemmän puolistrukturoituja. (Hyvärinen, Nikander & Ruusuvuori 2017.)

Puolistrukturoidut haastattelut ovat strukturoitujen ja strukturoimattomien haastattelujen välimaastossa, joille luonteenomaista on, että joitain haastattelun näkökohdista on lyöty lukkoon (Hirsijärvi & Hurme 2001, 47). Yksi tunnetuimpia puolistrukturoiduista haastattelumuodoista on teemahaastattelu, jota tämän opinnäytetyön haastatteluissa käytettiin (ks. liite 17). Läpikäytävät teemat sekä aihepiirit ovat teemahaastattelussa samoja, vaihtelua voi kuitenkin syntyä kysymysten järjestyksen ja muotoilun perusteella (Ruusuvuori & Tiittula 2015).

Tässä tutkimuksessa haastattelut nauhoitettiin, jos haastateltava siihen antoi luvan. Tilanteen nauhoittaminen antaa mahdollisuuden palata tilanteeseen uudelleen, jolloin nauhoitus toimii sekä muistiapuna, että tulkintojen tarkistamisen välineenä (Ruusuvuori & Tiittula 2015). Haastattelun kulkua sekä vastauksia pystyttiin tarkastelemaan sekä analysoimaan nauhoittamisen ansiosta. Nauhoitus mahdollisti myös haastattelun tarkemman raportoimisen.

Tutkimusta varten haastateltiin eri alan asiantuntijoita, jotta tietoa sekä näkemystä tulisi eri näkökulmista. Haastateltavat henkilöt olivat kaksi sairaalafysikkoa sekä arkitekhti.

Haastattelut toivat esiin myös hiljaista tietoa. Hiljaista tietoa on esimerkiksi työn tekijälle käytännön kokemuksen myötä syntynyt tieto, jota ei ole kirjattu ylös tai dokumentoitu. Hiljaisen tiedon taustalla on ajatus, että tiedämme enemmän kuin osaamme ääneen lausua. Tekijä ei aina osaa puhua ratkaisuksistaan eikä kuvata niiden perusteita ulkopuolisille. (Nuuttinen n.d.)

4.3 Haastattelut

Tätä opinnäytetyötä varten haastateltiin kahta sairaalafysikkoa sekä arkkitehtiä puolistrukturoiduin haastattelumenetelmin. Tässä kappaleessa tuodaan esiin haastatteluissa ilmi tulleita seikkoja, jotka olivat säteilytilojen suunnittelun kannalta tärkeitä.

Haastattelut sairaalafysikoiden kanssa toivat ilmi, että säteilytilojen sijoittelua voisi parantaa sijoittamalla ne mahdollisimman eristetyksi muista tiloista. Fysikoiden mukaan läpivientien määrä olisi hyvä minimoida, ja suunnittelun tulisi olla täysin valmiista ennen toteutusta, jottei yllätyksiä syntyisi.

Sädehoitobunkkeriin oli alun perin tarkoitus tulla paksut, säteilyä eristävät ovet (ks. Liite 16), mutta Kuopion yliopistollisen keskussairaalan taholta oli saatu ristiriitaisia kokemuksia ovien asennuksesta ja käyttöön otosta. Ovet olisivat olleet myöskin erittäin kalliit, joten päädyttiin sokkeloratkaisuun. Kuitenkin ovet olisivat helpottaneet tilan logistiikkaa, eikä siksi tarvitsisi kiertää sokkeloa. Työskentelytilaa olisi fysikoiden mukaan myös voinut olla enemmän ja muutos siihen, että henkilökunnalla ei ole omia työhuoneita, on arveluttavaa.

Arkkitehdin mielestä suunnittelun lähtöarvoja olisi voinut parantaa, sillä hänen mielestään ne olivat vajavaisia. Puutteellista tietoa oli tullut esimerkiksi eri materiaalien säteilyn vaimennuskyvyistä. Hänen mukaansa säteilytilojen suunnittelussa tuntui, että kohde olisi ensimmäinen, jota rakennetaan. Tarjolla ei siis ollut valmiita malleja tai hyviä esimerkkejä jo toteutuneista kohteista. Läpivientisuunnittelu tuli yllätyksenä, joten siihen lähdettiin myöhässä mukaan. Lisäksi läpiviennit pitäisi suunnitella jo talotekniikkasuunnitteluvaiheessa niin, että ne kulkisivat ”helppoissa” paikoissa eikä vastaan sattuisi tilannetta, jossa läpivienti on esimerkiksi seinän sisässä. Arkkitehdin koulutukseen ei myöskään kuulu säteilytilojen suunnittelu, joten koulutusta kyseiseen työhön heillä ei ollut. Aluksi työtehtävä yritettiin siirtää jollekin toiselle suunnittelutaholle, sillä heistä tuntui, ettei säteilytilojen suunnittelu kuulunut arkkitehdeille.

Sairaalafysikoiden mukaan säteilytiloissa huolestutti eniten se, ettei tiloja olisi rakennettu suunnitelmien mukaisesti. Heitä huolestutti myös se, ettei esimerkiksi raskasbetoni olisi kauttaaltaan tasalaatuista, jos raskasbetonimassan malmit olisivat valuneet valumuotin pohjalle. Luottamusta olivat laskeneet julkisuudessa olleet virheet rakennusteollisuudessa.

Sairaalafysikoiden mukaan rakennusalalla tulisi toimia ammattilainen, joka toimisi yhteyshenkilönä fyysikoiden, suunnittelijoiden sekä työmaan välillä, ja jolla olisi tietoa säteilystä sekä ymmärtäisi käytännön toteutukset. Nykyisellään toiminta ei ole niin yhtenäistä ja tehokasta kuin se voisi olla tämän puuttuvan toimijan kanssa. Arkkitehti puolestaan toivoi, että läpivienteihin kehitettäisiin talotekniikan puolesta jonkinlainen toimiva osa, joka helpottaisi läpivientisuunnittelua.

Kysyttäessä tilojen toimivuudesta, kaikki olivat kuitenkin yhtä mieltä siitä, että suunniteltujen tilojen pitäisi olla säteilysuojauksen kannalta riittävät, mutta lopulliset tulokset saataisiin kuitenkin vasta säteilyturvakeskuksen mittauksista. Puutteita tilasuunnitelmissa ei nähty läpivientien lisäksi olevan. Tilojen suunnitteluun oli käytetty paljon aikaa henkilökunnan, arkkitehdin ja teknisen henkilökunnan toimesta, joten uskottiin, että siinä oli päästy hyvään lopputulokseen.

4.4 Mittausmenetelmät

Säteilysuojienmittauksissa tulee huomioida säteilylaki ja sen vaatimat toimenpiteet. Tutkimuskohteessa säteilymittaukset suoritetaan seuraavien toimenpiteiden sekä lain edellyttämien vaatimusten mukaisesti.

”Säteilyaltistuksen arvioimiseksi ja turvallisuuden varmistamiseksi tehtävät mittaukset on tehtävä tarkoitukseen sopivalla ja luotettavaksi todetulla menetelmällä. Mittaustulosten on oltava metrologisesti jäljitettäviä kansainväliseen mittayksikköjärjestelmään. Mittaukseen käytettävän säteilymittarin tai mittauslaitteiston on oltava asianmukaisesti kalibroitu. Säteilyturvakeskus antaa tarkemmat määräykset mittausten luotettavuuden toteutamisesta sekä säteilymittareiden ja mittauslaitteistojen kalibroinnista, mittaus tarkkuudesta, käytöstä ja sopivuudesta tiettyyn käyttötarkoitukseen.” (L 9.11.2018/859, 59 §.)

Säteilyturvakeskus saa käyttää apunaan ulkopuolista asiantuntijaa säteilymittausten suorittamiseen. Keskussairaala Novassa työn toteutuksen arvioinnin kannalta tärkeän välimittauksen suorittaa Keski-Suomen sairaanhoitopiirin osastonyliffysikko Juha Vuorela.

Välimittauksessa tarkastellaan eristystilan säteilyn vaimentavuutta. Mittaustilanteesta pyritään tehdä mahdollisimman autenttinen. Säteilylähteenä käytetään jodi ¹³¹:a, joka viedään oletetun potilaan kilpirauhasen kohdalle, jolloin etäisyys seinään ja muihin tiloihin olisi realistinen. Jodi ¹³¹-kapselille rakennetaan puusta koroke, joka vastasi tulevan sängyn korkeutta. Materiaalina käytetään puuta, jotta säteily ei siroisi sen pinnasta yhtä vahvasti kuten esimerkiksi metallista. Ennen säteilymittausta on määriteltävä tarkat mittauspisteet, jotta tulos olisi mahdollisimman tarkka. Mittaustulosten voidaan lähtökohtaisesti olettaa olevan noin 30 % liian suuria, sillä todellisuudessa potilas, jolle jodi¹³¹ annetaan, vaimentaa säteilyä tämän verran. (Vuorela 2019.) Lopulliset mittaukset suorittaa säteilyturvakeskus, kun tilat ovat täysin valmiita.

5 Säteilymittausten tulokset

Säteilymittaukset olivat aikataulun mukaisesti tarkoitus suorittaa hyvissä ajoin helmimaaliskuussa. Säteilymittauksia kuitenkin hidasti suunnittelematon tekijä, kun eristystilojen tiiveysvaatimukset kiristyivät suuresti alkukevästä, ja eristystiloihin jouduttiin tekemään suuria muutoksia tiiveysarvojen parantamiseksi. Tiiveysarvon kiristyminen johtui siitä, että tilaaja halusi varautua tulevaan standardiin, joka vaatii eristystilojen suurempaa tiiveyttä. Näin ollen säteilymittauksia ei kyetty suorittamaan opinnäytetyön aikataulun puitteissa, vaan mittaukset suoritettaisiin myöhemmin. Kun säteilymittaukset on suoritettu, tulokset julkaistaan linkissä, jossa niitä tullaan erikseen analysoimaan.

<https://docs.google.com/document/d/10ntz6fg53cJHZmVqf7-WNSFdMnom1YY3-Ak-BLeQxPx8>

6 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää säteilytilojen säteilysuojausmenetelmiä, erityisesti läpivientien osalta. Läpivientisuojausille tehtiin uudet suunnitelmat, jotka otettiin käyttöön keskussairaala Novassa. Toteutuksen toimivuutta mitataan luvun 4.4 mukaisesti sairaalafysikoiden kanssa, ja lopputuloksena pyritään saavuttamaan säteilynvaimennuskyvyltään riittävät säteilysuojat. Tässä opinnäytetyössä tuotiin esille säteilytilojen suojauksen sekä suunnittelun kannalta keskeisiä huomioita otettavia tekijöitä toimivan lopputuloksen saavuttamiseksi. Tutkimuksessa tuotiin myös esille ongelmia ja epäkohtia säteilytilojen suunnitteluun sekä niiden suojauksiin liittyen.

Tutkimuksessa korostui, että lähtötietojen ja suunnitelmien tarkkuus sekä saatavuus ovat tärkeitä tekijöitä, joilla vältettäisiin mahdollisia suunnitelmapuutteita. Oikeilla materiaalivalinnoilla sekä optimoiduilla materiaalipaksuuksilla päästään hyvään ja turvalliseen lopputulokseen, jolloin myös kustannuksissa voidaan säästää suuresti. Esimerkiksi lyijyn optimoidulla käyttömäärällä voidaan säästää kustannuksissa, kun tiedetään eri radionuklidien isotooppien vaatimat suojapaksuudet, jolloin ero materiaalipaksuuksilla voi olla moninkertainen. Tutkimuksessa korostui siis asiantuntijuiden, suunnitelmien lähtötietojen saatavuuden sekä lähtötietojen oikeellisuuden tarpeellisuus.

7 Pohdinta

Tutkimuksessa onnistuttiin saavuttamaan sille asetetut tavoitteet. Sairaalafysikoiden toteuttamaa säteilymittausta, joka suunnitelmamuutosten takia viivästyi alkupe- räisestä aikataulustaan, ei kuitenkaan pystytty suorittamaan. Opinnäytetyön luotettavuuden kannalta on kuitenkin tärkeää, että tulokset saadaan myöhemmin julkais- tua vapaasti luettavaksi. Tutkimuksen laajasta aiheesta huolimatta työn rajaus onnis- tui hyvin. Haasteellista tutkimuksessa oli se, että säteilysuojarakenteista oli vain vä- hän suomenkielistä tietoa, valmiita malleja ei ollut olemassa, ja lähdetiedot sekä

suunnittelu olivat työn alkaessa puutteellisia. Tutkimuksessa käytettiin useita eri lähteitä tiedon keräämiseksi. Tutkimuksen luotettavuutta ja kattavuutta vahvisti menetelmätriangulaatio, eli tutkimuksessa käytettiin useita tiedonkeruusekä analyysimenetelmiä.

Luotettavuutta heikentävänä tekijänä voidaan pitää tulevien välimittausten täydellisen autenttisuuden puutetta, sillä tilat eivät tule mittauksen aikana olemaan täysin valmiita, eikä mittaustuloksia saada mitattua suoraan potilaista, vaan mittauksissa on käytettävä mahdollisimman aitoa tilannetta jäljittelevää menetelmää. Lopulliset mitaukset tulee kuitenkin suorittamaan säteilyturvakeskus tilojen ollessa täysin valmiita.

Säteilysuojarakenteiden suunnittelu ei mielestäni pitäisi kuulua pelkästään arkkitehteille, sillä heillä ei ole tarvittavia tietoja säteilytilojen suunnitteluun. Yhtenäisempi työskentely eri suunnittelevien tahojen kesken parantaisi sekä suunnittelua että toteutusta.

Sairaalfyysikoilla on paljon arvokasta tietoa säteilystä, ja suurempi osa tästä tiedosta täytyisi saada välitettyä rakennussuunnitteluun, ja sieltä taas jalkautettua toteutukseen. Fyysikot laskevat säteilynvaimentamiseen tarvittavat seinävahvuudet, mutta se ei vielä kerro rakennussuunnittelijalle eri materiaalien ainevahvuuksien suhteesta vaimentaa säteilyä tai sitä, mitä rakennussuunnittelijan olisi hyvä ottaa huomioon tai ymmärtää. Vastaava tilanne syntyy esimerkiksi säteilytilojen läpivientejä suunniteltaessa.

Tuloksien hyödyntäminen ja jatkotutkimukset

Tässä opinnäytetyössä tuotiin esiin useita keskeisiä asioita, jotka säteilytilojen suojauksessa ja suunnittelussa tulisi ottaa huomioon toimivan lopputuloksen saavuttamiseksi. Opinnäytetyöstä on hyötyä säteilytiloja sekä säteilysuojuksia suunnitteleville, sillä muita valmiita ja toimivia malleja ei tiedettävästi ole saatavilla. Jatkotutki-

muksena säteilysojien suunnittelua ja toteutusta voisi käydä läpi yksityiskohtaisemmin esimerkiksi RT-korttien tai standardien muodossa, jotta alalle saataisiin enemmän tietoa säteilysojarakenteiden suunnittelusta ja toteutuksesta.

Lähteet

Basic about Radiation. 2018. Radiation Effects Research Foundation. Viitattu 16.3.2019. <https://www.rerf.or.jp/en/>

Beiser, A. 2003. Concept of Modern Physics, Sixth Edition. New York: The McGraw-Hill Companies, inc.

Eisler, R. 2007. Eisler's Encyclopedia of Environmentally Hazardous Priority Chemicals. Elsevier.

European Commission. 2012. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. Viitattu 27.3.2019. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihro_036.pdf

Harrell, D. G. 2010. Radiation Shielding Design. ACMP. Viitattu 18.4.2019. <https://aapm.org/meetings/amos2/pdf/48-14607-32593-461.pdf>

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Hurri, J. 2019. Tuotepäällikkö. Lakan Betoni Oy. Viitattu 3.5.2019.

Hyvä tietää säteilystä. 2007. Helsinki: Energiateollisuus ry. Viitattu 30.11.2018. <http://users.abo.fi/tlonnrot/hyvaa-tietaa-sateilysta.pdf>.

Hyvärinen, M. Nikander, P. Ruusuvoori, J. (toim). 2017. Tutkimushaastattelun käsikirja. Tampere: Vastapaino.

Ikäheimonen, T. (toim). 2002. Säteily ja ydinturvallisuus. Hämeenlinna: Karisto Oy.

International Commission on Radiological Protection. 2019. ICRP. Viitattu 16.2.2019. <http://www.icrp.org/>

Ionisoiva säteily. 2015. STUK. Viitattu 24.2.2019. <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/ionisoiva-sateily>

Ionizing radiation, health effects and protective measures. 2016. World Health Organization. Viitattu 20.3.2019. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>

Johanson, R. 2018. Sädehoito. Duodecim Terveyskirjasto. Viitattu 28.3.2019. https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01078

Jussila, A-L. Kangas, A. Haltamo, M. 2010. Sädehoitotyö. Helsinki: WSOYpro Oy.

Keski-Suomen uusi sairaala Nova. N.d. Ramboll. <https://fi.ramboll.com/projektit/rfi/keski-suomen-keskussairaala>

Kärnä, A. 2019. Sairaalafysikko. Keski-Suomen sairaanhoitopiiri. Haastattelu 21.2.2019.

L 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki. Viitattu 16.2.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

L 9.11.2018/859. Säteilylaki. Viitattu 20.2.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180859>

Lammentausta, E. 2017. Ionisoivan säteilyn fysiikka. Oppiportti, Duodecim. Viitattu 20.4.2019. <https://www.oppiportti.fi/op/krd01402/do>

Madsen, M. T., Anderson, J. A., Halama, J. R., Kleck, J., Simpkin, D. J., Votaw, J. R., Wendt, R. E., Williams, L. E. & Yester, M. V. 2006. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirement. Medical Physics, 33(1). https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT_108.pdf

Meltti, S. (toim). 2009. Säteily- ja ydinturvallisuus. Helsinki: Edita

Mitä säteily on. 2019. STUK. Viitattu 15.2.2019. <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sa-teily-on>

Mitä ydinjäte on. 2015. STUK. Viitattu 24.2.2019. <https://www.stuk.fi/aiheet/ydin-jatteet/mita-ydinjate-on>

Nave, R. 2016. Inverse Square Law, Radiation. Georgia State University. Viitattu 29.1.2019. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Forces/isq.html>

Nuclear Radiation and Health effects. 2018. World Nuclear Association. Viitattu 10.3.2019. <http://www.world-nuclear.org/>

Nuuttinen, O. N.d. Hiljainen tieto. Viitattu 3.5.2019. <http://kans.jyu.fi/sanasto/sanat-kansio/hiljainen-tieto>.

Paile, W. N.d. ICRP:n Näkemys Säteilyn Riskeistä ja Suojeluperiaatteista. Viitattu 7.2.2019. https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja4_11.pdf/3b9cc43b-67ac-4ff9-979a-46068bb0ac04.

Paile, W. 2000. Ionisoivan säteilyn haitat. Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim 116(6): 660-663. <https://www-duodecimlehti-fi.ezproxy.jyu.fi/lehti/2000/6/duo91423>.

Phosphorus – 32. 2018. Radiological Safety Guidance. Environment Health & Safety, University of Michigan. Viitattu 8.5.2019. <https://ehs.umich.edu/wp-content/uploads/2016/04/Phosphorus-32.pdf>

Protecting People and the Environment. 2019. United States Nuclear Regulatory Commission. Viitattu 3.5.2019 <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/alara.html>

Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. 2006. International Atomic Energy Agency. Viitattu 27.4.2019. <https://www.iaea.org/publications/7197/radiation-protection-in-the-design-of-radiotherapy-facilities>

Radiation Protection Products, Inc. N.d. Borated Polyethylene. Viitattu 1.5.2019.

<https://www.radiationproducts.com/borated-polyethylene>

Radiation Shielding. N.d. Neutron Shielding Doors. Viitattu 3.3.2019. <https://pitts-little.com/neutron-sliding-doors.php>.

Radiologyinfo. 2018. Radioactive Iodine (I-311) Therapy. Viitattu 28.3.2019.

<https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=radioiodine>

Randall, M. N.d. Radiation Dose Chart. Viitattu 15.5.2019. <https://xkcd.com/radiation/>.

Report No. 151 – Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. 2005. National Council on Radiation Protection and Measurements. Viitattu 11.3.2019. <https://ncrponline.org/shop/reports/report-no-151-structural-shielding-design-and-evaluation-for-megavoltage-x-and-gamma-ray-radiotherapy-facilities-2005/>

Ruusuvuori, J. Tiittula, L. (toim). 2015. Haastattelututkimus, tilanteet ja vuorovaikutus. Tampere: Vastapaino.

Saarakkala, S. 2017. Isotooppikuvaus. Oppiportti, Duodecim. Viitattu 14.2.2019.

<https://www.oppiportti.fi/op/krd01404/do>

Sayden, H. Rokni, C. James, C. N.d. Radiation Shielding at High-Energy Electron and Proton Accelerators. Viitattu 1.5.2019.

http://hpschapters.org/sections/accelerator/PDS/6Shield_Rokni.pdf

Sequeiros, R.B., Koskinen, S., Aronen, H., Lundbom, N., Vanninen, R. & Tervonen, O. (toim.) 2017. Kliininen radiologia. Helsinki: Duodecim.

Shielding of Neutron Radiation. N.d. Nuclear Power. Viitattu 14.4.2019.

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/shielding-neutron-radiation/>.

Sipilä, P. N.d. Sädehoito. STUK. Viitattu 6.3.2019. <https://www.stuk.fi/> Sädehoito

SRV Intranet. N.d. SRV. Viitattu 23.11.2018. <https://intranet.srv.fi>

Strategia. N.d. SRV. Viitattu 23.11.2018. <https://www.srv.fi/srv-yhtiona/strategia/>

Suojatoimenpiteet säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa. 2012. STUK. Ohje VAL 1/5.10.2012. Helsinki. Viitattu 26.2.2019. <https://www.stuk.fi/documents/12547/103518/ohje-val1.pdf/7c9ef0ff-6a3a-47dd-b08d-d1fb5c197bd5>

Sädehoidon suojalaskelmat. 2015. STUK. Viitattu 5.3.2019. https://www.stuk.fi/documents/12547/718600/Sadehoidon_suojauslaskelmat-laskuesimerk-keja.pdf/319ba6ba-5373-4b81-8b2e-aa55a94cbcd4

Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperiaatteet, ST 7.2. 2014. Stuklex. Viitattu 26.2.2019. <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/ST7-2>

Säteilylainsäädännön uudistus. 2019. STUK. Viitattu 17.2.2019. <https://www.stuk.fi/saannosto/sateilylainsaadannon-uudistus>

Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, ST 1.10. 2011. Stuklex. Viitattu 13.4.2019. <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/ST1-10>

Säteilysuojelun periaatteet. 2018. STUK. Viitattu 20.4.2019. <https://www.stuk.fi/stuk-valvoo/sateilyn-kayttajalle/sateilytoiminnan-turvallisuus/sateilysuojelun-periaatteet>

Säteilytoiminta ja säteilymittaukset, ST 1.9. 2016. Stuklex. Viitattu 13.5.2019. <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/ST1-9>

Tuomi, J. & Sarajärvi, A. 2018 (2. painos). Laadullinen tutkimus ja sisältöanalyysi. Helsinki: Tammi.

Työmaan tilanne. 2019. KSSH. Viitattu 26.1.2019. http://www.ksshp.fi/fi-FI/Sairaanhoitopiiri/Uusi_sairaala_projekti/Rakentaminen/Seuraa_rakentamista.

United Nations Environment Programme. 2016. Radiation effects and sources. Viitattu 16.4.2019. <https://www.unenvironment.org/resources/report/radiation-effects-and-sources>

Uusi sairaala Nova. 2018. Keski-Suomi 2021. Viitattu 21.12.2018. <http://www.ks2021.fi/uudistuksen-karkihankkeet/uusi-sairaala-valmistuu-vuonna-2020/>

Valentin, J. (toim). 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Elsevier.

Vuorela, J. 2019. Osastonylityfysikko, kliininen fysiologia ja isotooppilääketiede. Keski-Suomen sairaanhoitopiiri. Haastattelu 13.2.2019.

X-Ray Protect. N.d. Siniat. Viitattu 7.5.2019. https://www.siniat.nu/en/products-and-systems/products/plasters_657ff8d8-81e9-4d2b-a037-e1bca79670ff/x-ray-protect

Liitteet

Liite 1. Eri säteilylähteistä absorboituvia säteilyannoksia (Randall n.d).

Radiation Dose Chart

This is a chart of the ionizing radiation dose a person can absorb from various sources. The unit for absorbed dose is "sievert" (Sv), and measures the effect a dose of radiation will have on the cells of the body. One sievert (all at once) will make you sick, and too many more will kill you, but we safely absorb small amounts of natural radiation daily. Note: The same number of sieverts absorbed in a shorter time will generally cause more damage, but your cumulative long-term dose plays a big role in things like cancer risk.

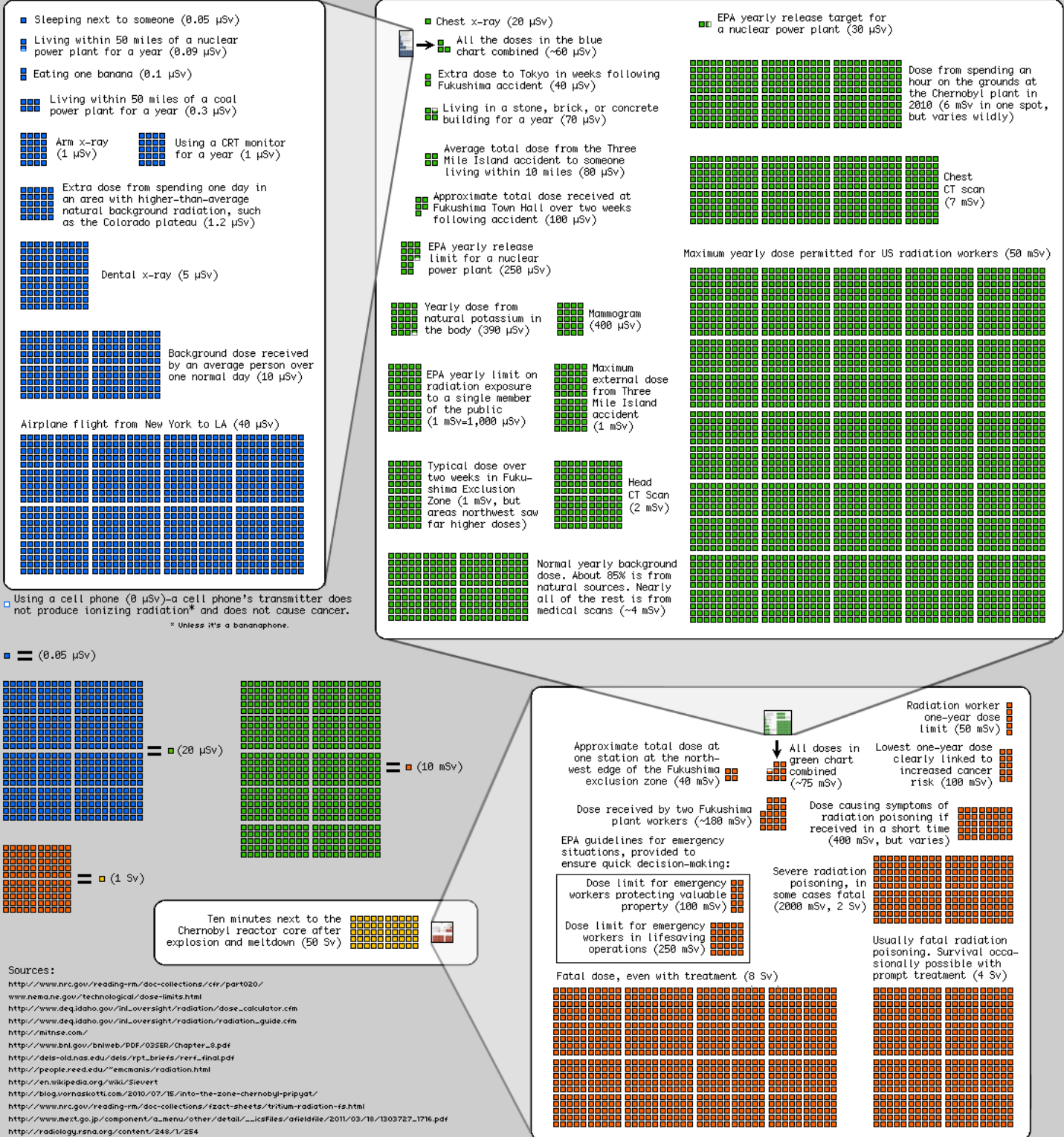
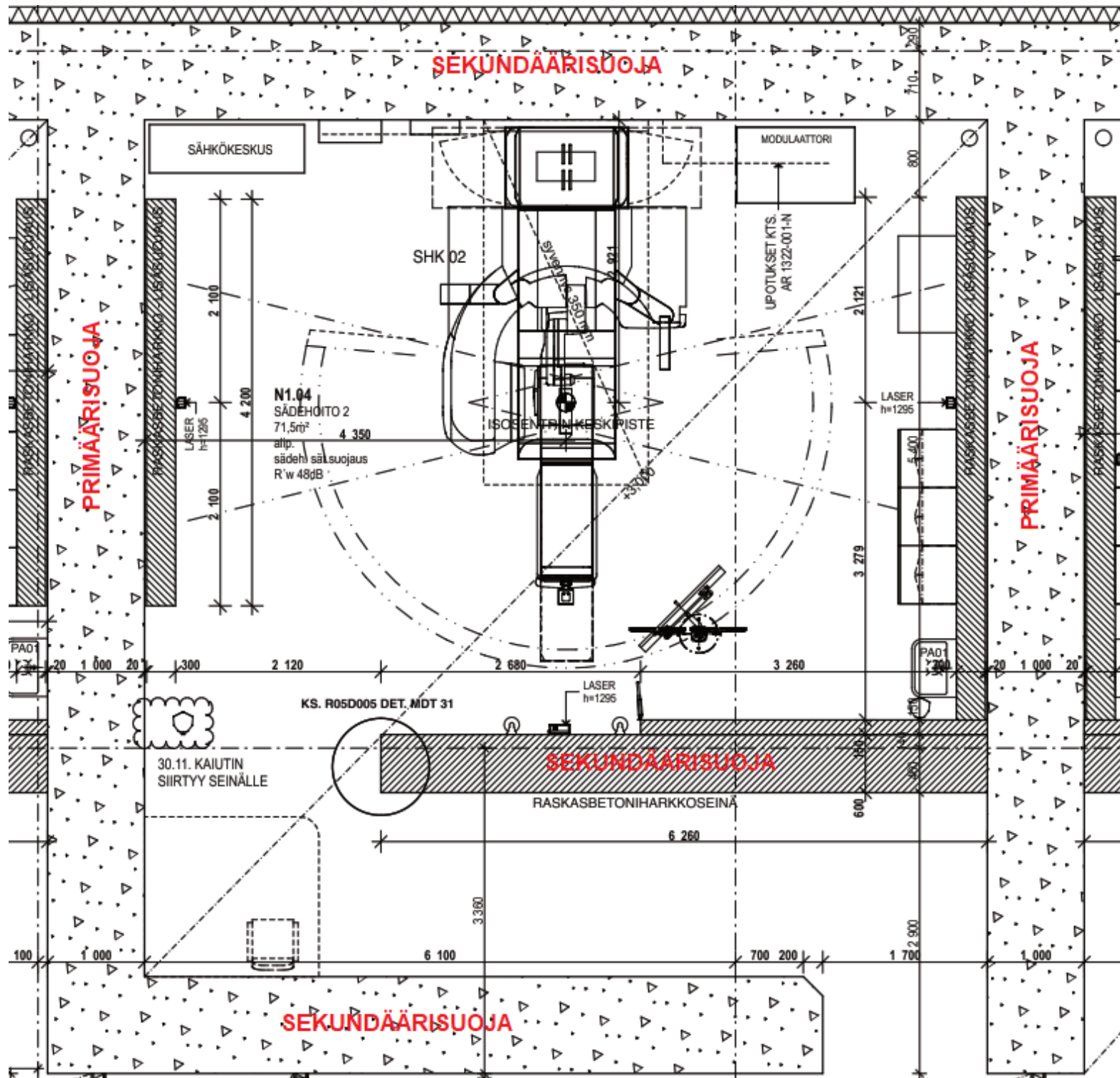
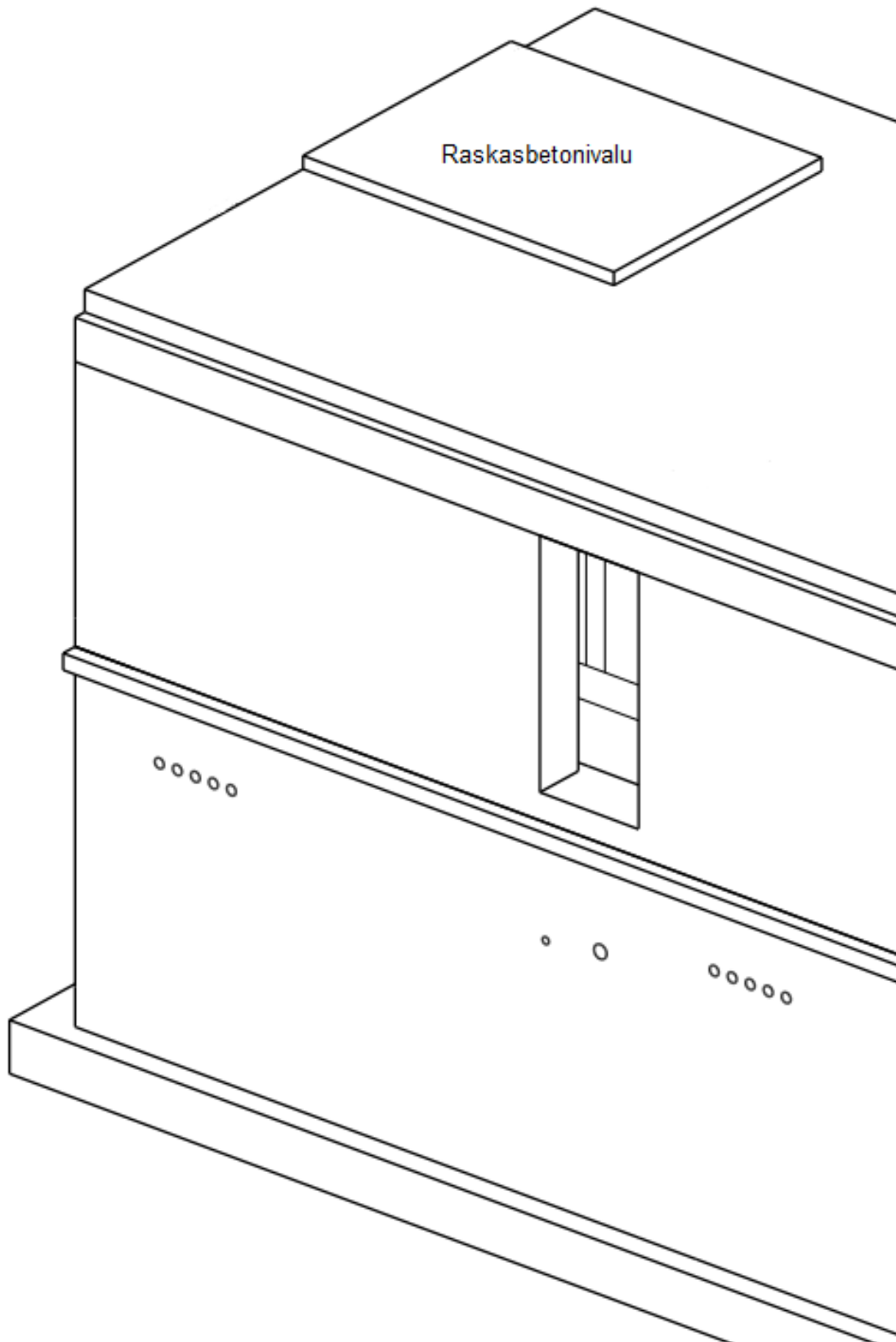


Chart by Randall Munroe, with help from Ellen, Senior Reactor Operator at the Reed Research Reactor, who suggested the idea and provided a lot of the sources. I'm sure I've added in lots of mistakes; it's for general education only. If you're basing radiation safety procedures on an internet PNG image and things go wrong, you have no one to blame but yourself.

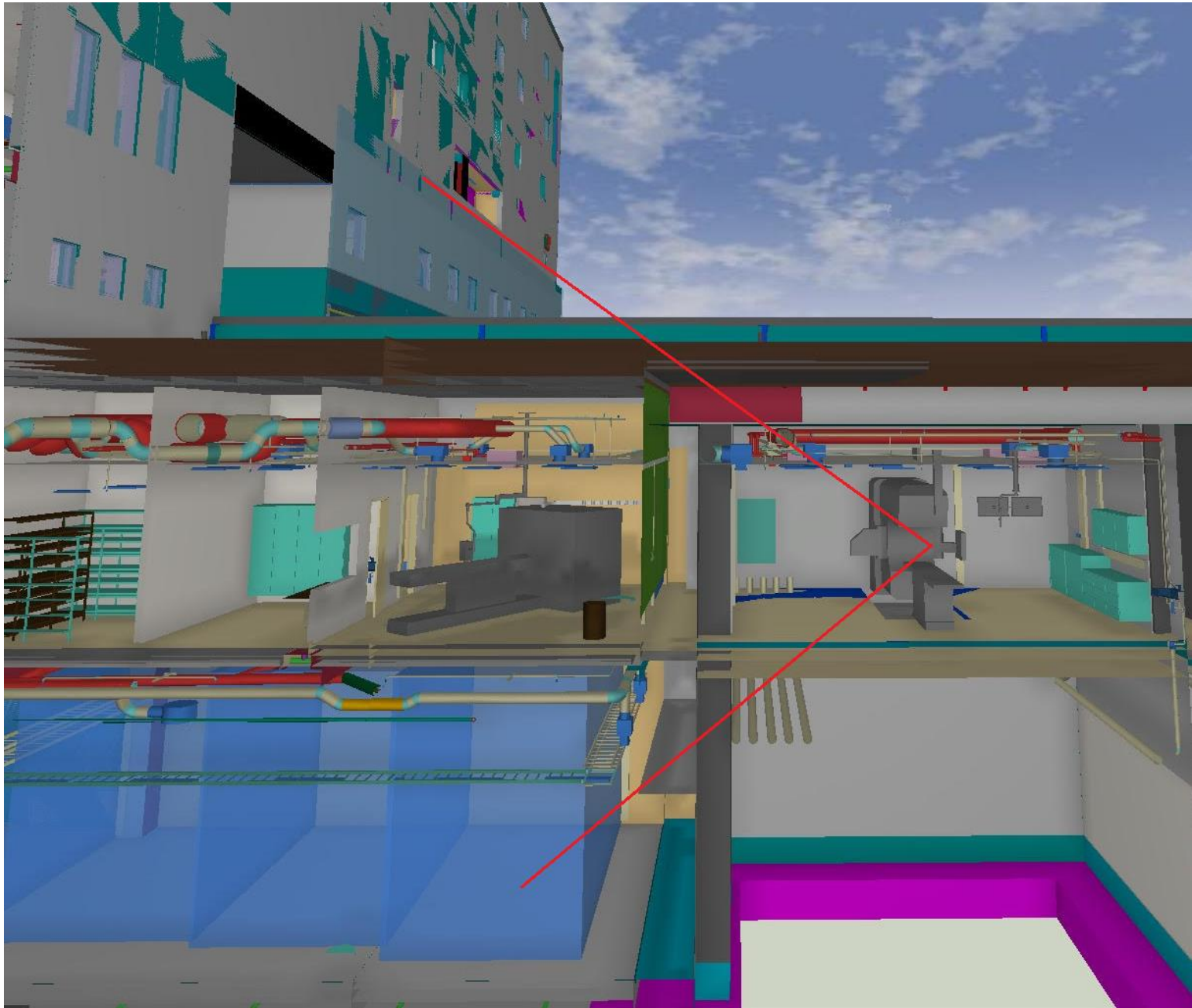
Liite 2. Sädehoitotila.



Liite 3. Sädehoitobunkkerin raskasbetonista valettu katon lisäsuoja.



Liite 4. Lisäsuojausta tarvinneet alueet.



Liite 5. Annosparametit (Madsen ym. 2006).

Madsen *et al.*: AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding

TABLE VI. Summary of dose parameters.

Parameter	Definition	Formulation
A_o	Administered activity (MBq)	
t	Time (h)	
t_U	Uptake time (h)	
t_I	Imaging time (h)	
$D(t)$	Total dose for time t (μSv)	
$D(0)$	Initial dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)	
$T_{1/2}$	Radionuclide half-life (h)	
R_t	Dose reduction factor over time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t) \times [1 - \exp(-0.693t/T_{1/2})]$
R_{tU}	Dose reduction factor over uptake time time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t_U) \times (1 - \exp(-0.693t_U/T_{1/2}))$
R_{tI}	Dose reduction factor over imaging time t	$=1.443 \times (T_{1/2}/t_I) \times [1 - \exp(-0.693t_I/T_{1/2})]$
N_w	Number of patients per week	
d	Distance from source to barrier (m)	
F_U	Uptake time decay factor (μSv)	$=\exp[-0.693t_U/T_{1/2}]$
T	Occupancy factor	
P	Weekly dose limit	
	Transmission factor (uptake room)	$=10.9 \times P \times d^2 / [T \times N_w \times A_o \times t_U(h) \times R_{tU}]$
	Transmission factor (scanner room)	$=12.8 \times P \times d^2 / [T \times N_w \times A_o \times F_U \times t_I(h) \times R_{tI}]$

Liite 6. Vältyskertoimet (Madsen ym. 2006).

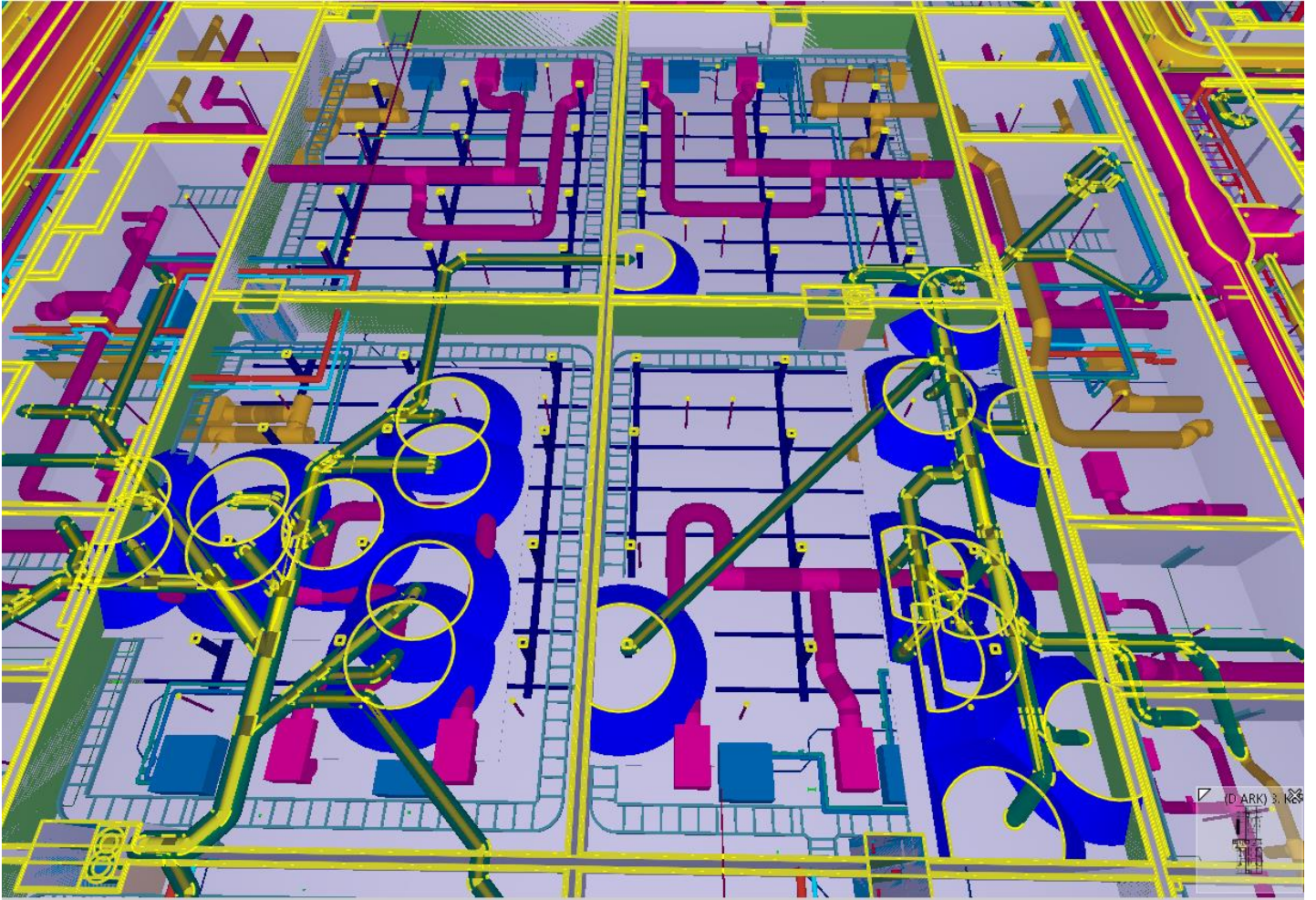
TABLE IV. Broadbeam transmission factors at 511 keV in lead, concrete, iron.

Thickness ^{a,b}	Transmission Factors		
	Lead	Concrete ^c	Iron
0	1.0000	1.0000	1.0000
1	0.8912	0.9583	0.7484
2	0.7873	0.9088	0.5325
3	0.6905	0.8519	0.3614
4	0.6021	0.7889	0.2353
5	0.5227	0.7218	0.1479
6	0.4522	0.6528	0.0905
7	0.3903	0.5842	0.0542
8	0.3362	0.5180	0.0319
9	0.2892	0.4558	0.0186
10	0.2485	0.3987	0.0107
12	0.1831	0.3008	0.0035
14	0.1347	0.2243	0.0011
16	0.0990	0.1662	0.0004
18	0.0728	0.1227	0.0001
20	0.0535	0.0904	
25	0.0247	0.0419	
30	0.0114	0.0194	
40	0.0024	0.0042	
50	0.0005	0.0009	

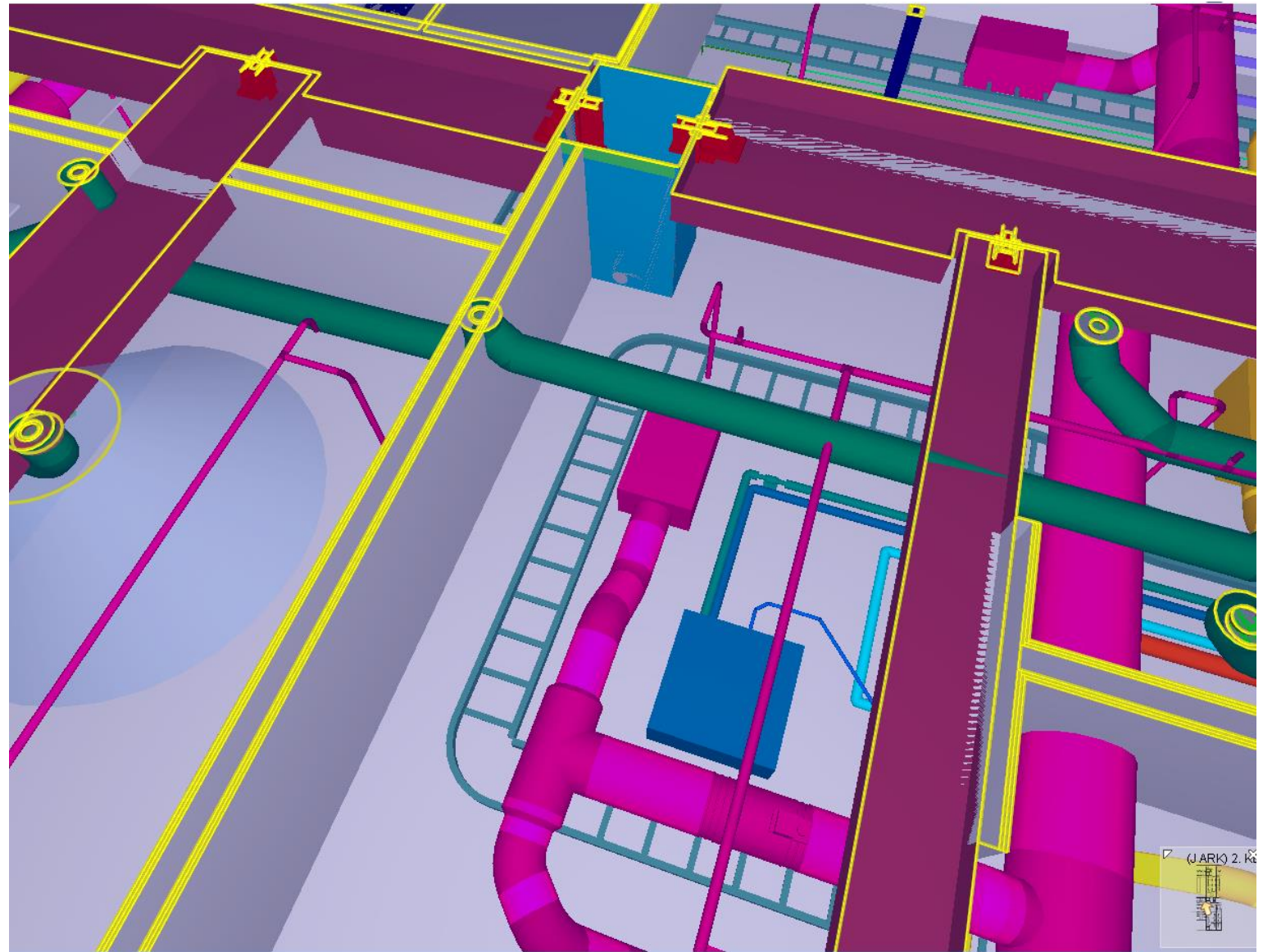
^aThickness in mm for lead.^bThickness in cm for concrete and iron.^cConcrete density=2.35 g/cm³.

The Monte Carlo transmission data have been fitted to the model proposed by Archer *et al.* (Ref. 10): $\mathbf{B}=\{(1+(\beta/\alpha))e^{\alpha\gamma x}-(\beta/\alpha)\}^{(1/\gamma)}$. This can be inverted to obtain x (material thickness) as a function of transmission (B): $x=(1/\alpha\gamma)\ln\{[B^{-\gamma}+(\beta/\alpha)]/[1+(\beta/\alpha)]\}$.

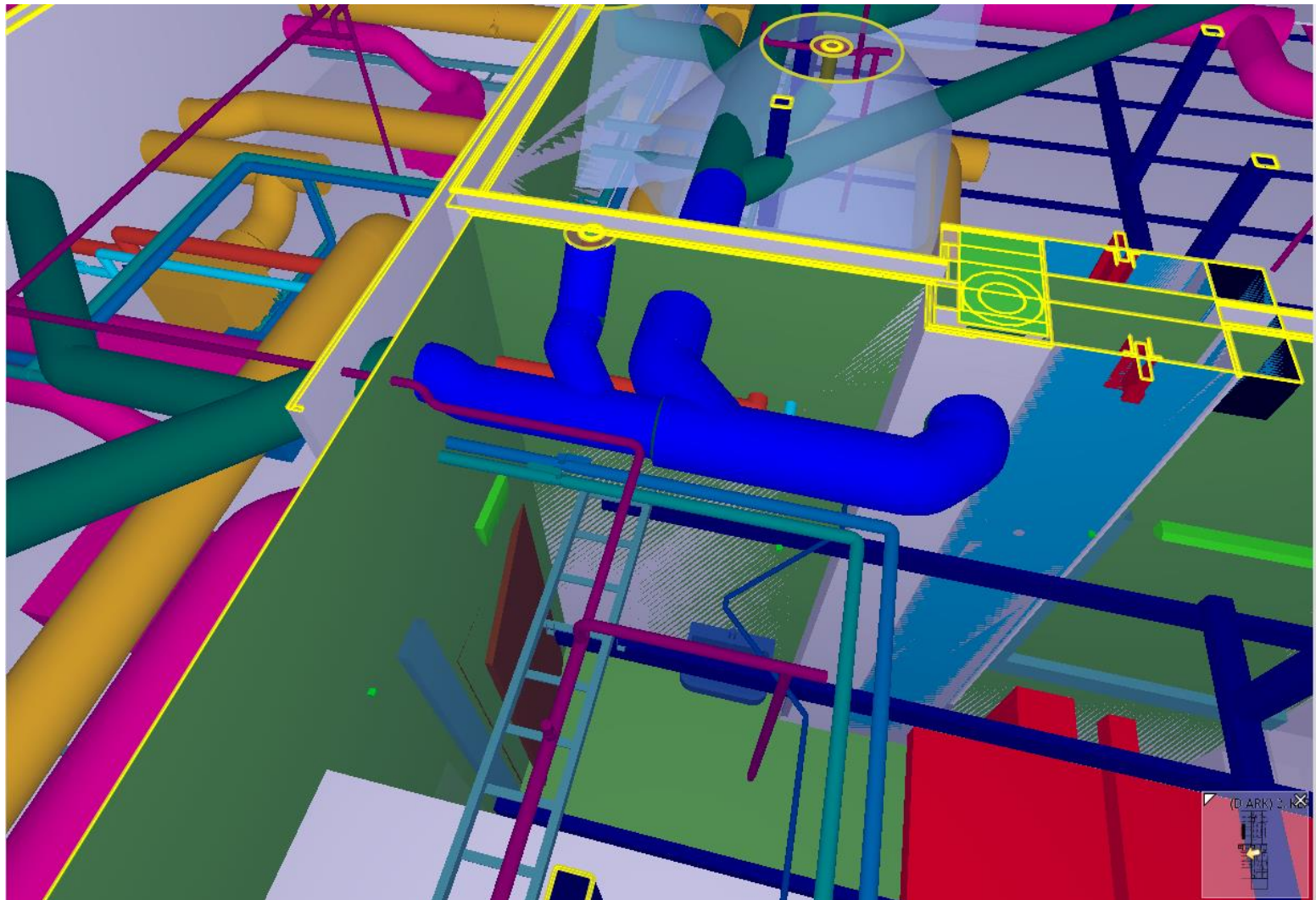
Liite 7. Mallinnetut läpiviennit.



Liite 8. Lämpivienti seinän sisässä.



Liite 9. Läpiviennit suojattava samanaikaisesti pysty- ja vaakasuuntaisesti.



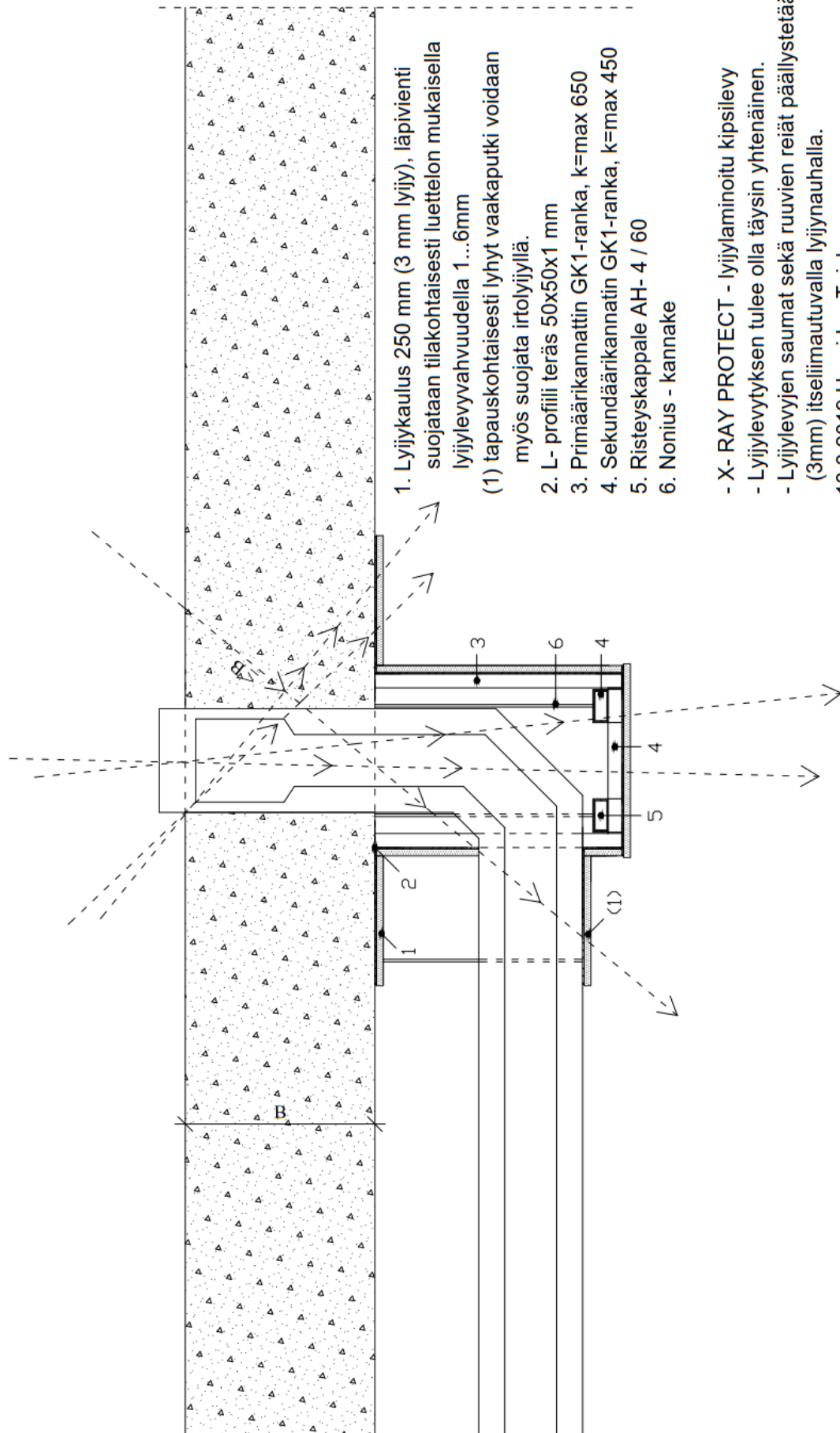
Liite 10. Tarkastusluukku.



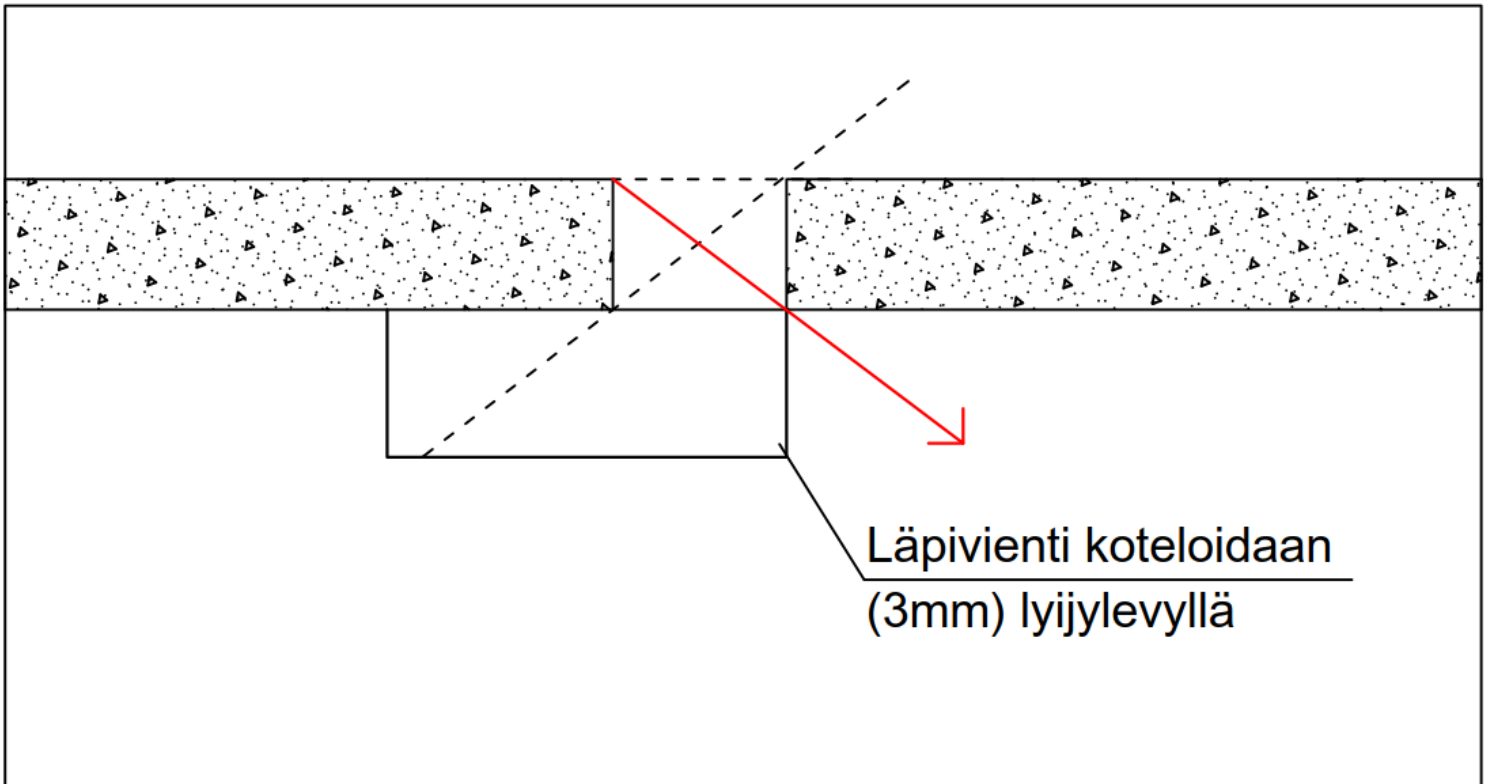
Liite 11. Tarkastusluukun suojaus toteutettuna.



Liite 12. Uusittu läpivientisuunnitelma.



Liite 13. Virheellinen toteutustapa.



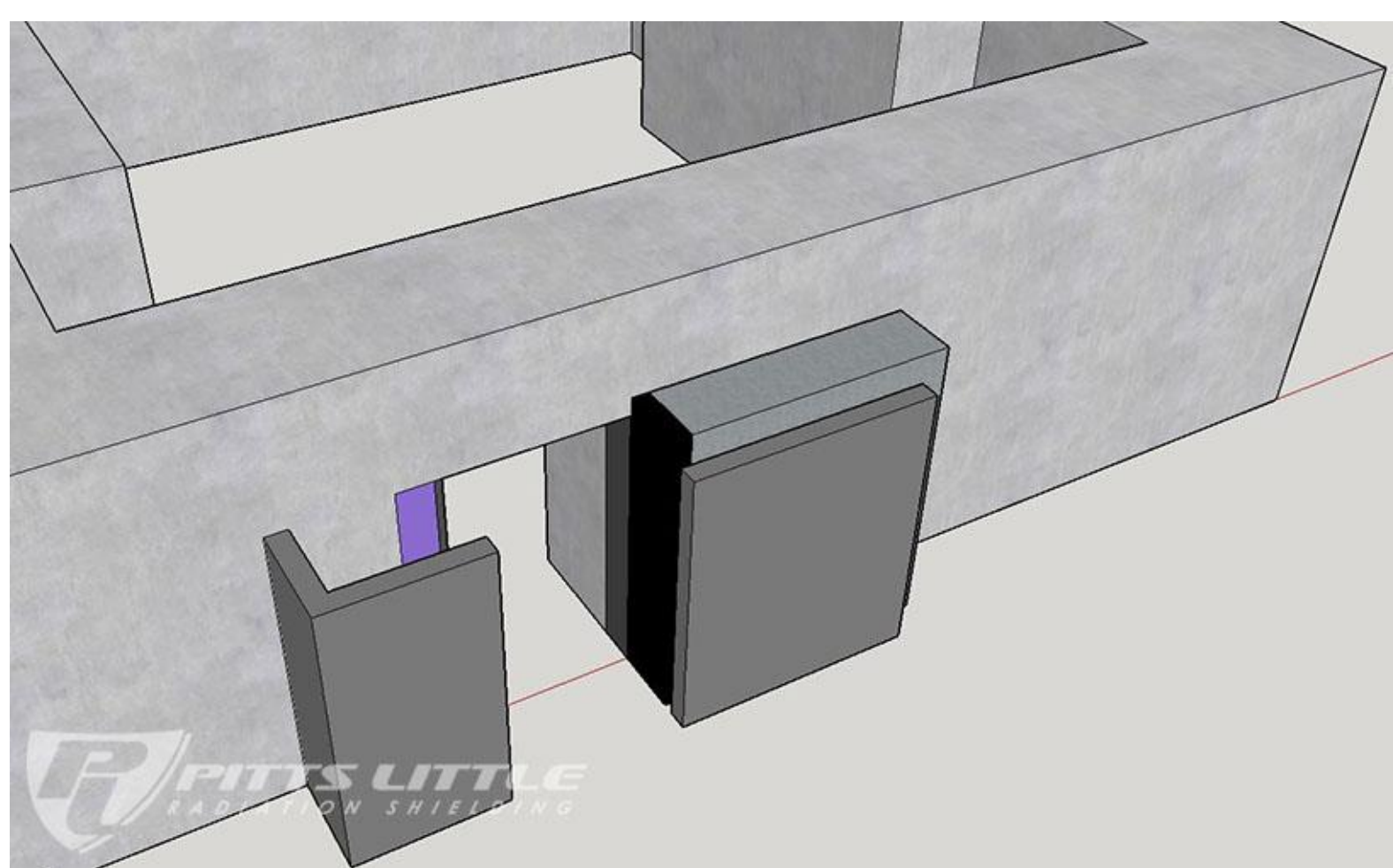
Liite 14. Lyijyn valuminen.



Liite 15. Irtolyijällä vuorattu läpivientiputki.



Liite 16. Säteilysuojaovi (Radiation Shielding n.d.)



Liite 17. Haastattelurunko

1. Jos jotain tulisi vielä parantaa, niin mitä?
2. Mikä on mielipiteenne suunnitelmista ja tilaratkaisuista?
3. Oletteko huomanneet suunnitelmissa jotain puutteita? Onko mahdollisesti jotain unohdettu?
4. Mitä tekisitte toisin, jos kustannuksia ei huomioitaisi?
5. Oletteko tyytyväinen tuleviin toimitiloihin?
6. Miten säteilylain uudistus mielestänne vaikutti toteutukseen?
7. Oletteko kuulleet, että vanhoista säteilytiloista olisi aiheutunut haittaa käyttäjille?
8. Mikä säteilytiloissa huolestuttaa eniten?
9. Mitä rakennusteollisuuden kannattaisi ottaa huomioon säteilysuojien suhteen?
10. Otetaanko säteilylaki tarpeeksi hyvin huomioon rakentamisessa?
11. Ovatko säädökset mielestänne liian tiukkoja vaiko liian väljiä?

Arkkitehdille esitettiin seuraavat lisäkysymykset:

12. Minkälaiset lähtötiedot saitte suunnitteluun?
13. Kuinka tuttu aihe säteilysuojien suunnittelu teille oli? Kuuluuko teidän mielestänne arkkitehdin osaamisalueeseen säteilysuojien suunnittelu?
14. Oliko suunnittelu aikataulutettu mielestänne hyvin? Oliko siihen varattu tarpeeksi resursseja?