

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Hando Tohver

**EHITUSMATERJALIDEST TINGITUD VÄLISKIIRITUSE
ANALÜÜS MONTE CARLO MEETODIGA**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja:
Siiri Salupere, PhD

Tartu 2022

Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiirituse doosi analüüs Monte Carlo meetodiga

Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiiritust reguleeritakse Euroopa riikides konservatiivse aktiivsuskontsentratsiooni indeksiga. Liialt konservatiivsele doosihindamise meetodile toetuv I-indeks piirab põhjendamatult nii ehitusmaterjalide kasutamist kui ka tööstusjäätike taaskasutamist ehitusmaterjalide koostisosana. Käesoleva töö raames analüüsiti ehitusmaterjalidest tingitud γ - ja β -kiirguse väliskiirituse doosikiirusi vähem konservatiivsemates geomeetrites, mis vastavad paremini ehitusmaterjalide tegelikule kasutusviisile. Töö väljundina pakuti välja alternatiivne ehitusmaterjalide reguleerimise meetod, mis võimaldab realistlikumalt hinnata ja optimeerida ehitusmaterjalidest tingitud väliskiirguse efektiivdoosi.

Märksõnad: Monte Carlo, I-indeks, Doos, Ehitusmaterjalid, Tööstusjäätike taaskasutamine

CERCS kood: P220 — Tuumafüüsika, P170 — Arvutusmeetodid

Analysis of external exposure from building materials using the Monte Carlo method

In European countries, the external exposure from building materials is regulated by a conservative activity concentration index. The I-index, which is based on the excessively conservative method of dose evaluation unjustifiably restricts the use of building materials and the recycling of industrial residue as a component of building materials. In the present work, the building material-induced external exposure from γ - and β -radiation was analysed using less conservative geometries, where the materials were represented more realistically in their application. The result of the work was an alternative method for regulating the building materials, which allows for a more realistic evaluation and optimization of the building material-induced external exposure.

Keywords: Monte Carlo, I-index, Dose, Building materials, Industrial residue recycling

CERCS code: P220 — Nuclear Physics, P170 — Numerical Analysis

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Teoreetiline taust	6
1.1 Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiiritus	6
1.2 Ioniseeriva kiirguse mõõtühikud ja doos	6
1.3 Analüütilised doosi arvutamise mudelid	8
1.4 Monte Carlo meetod ja kiirguslevi	9
1.5 Ehitusmaterjalidest pärineva väliskiirituse reguleerimine ja I-indeks	11
1.6 Ehitusmaterjalide radioloogiliste parameetrite mõõtmine ja mudeldamine Eestis	13
1.7 Tööstuslik jääk ja meetod konservatiivsuse vähendamiseks	13
2 Metoodika	15
2.1 Kiirguslevi tarkvara valik	15
2.2 Kiirgusallikate mudeldamine	16
2.2.1 Radionukliidid	16
2.2.2 Kiirgusallikad	18
2.3 Geomeetria ja materjalid	19
2.4 Doosi hindamine	20
2.5 Mudeli seadistamine	21
2.5.1 Mudeli vastastikmõjud	21
2.5.2 Läviväärtuse valik	22

2.6	Mudeli defineerimine	24
2.6.1	Mudeli failide koostamine	24
2.7	Modelleerimistarkvara verifitseerimine: EGSnrc mudeli võrdlus näidisülesandega	26
3	Tulemused ja arutelu	29
3.1	Looduslikest radionukliididest tingitud väliskiiritus	29
3.1.1	γ -kiirguse doosijaotus ruumis ja inimeses	29
3.1.2	Ehitusmaterjali paksuse ja tiheduse mõju γ -kiirguse doosile	31
3.1.3	Pinnase γ -kiirguse doosi mõju siseruumis	33
3.1.4	β -kiirguse doosi jaotus ruumis ja inimeses	34
3.2	Ehitusmaterjali kasutusviisi mõju γ -kiirgusest tingitud doosile	36
3.2.1	Seinaplokk	36
3.2.2	Telliskivi	37
3.2.3	Kipsplaat ja soojustusmaterjal	38
3.2.4	Katteplaadid	38
3.2.5	Ahi ja köögi tööpind	40
3.2.6	Eesti turul müüdavate ehitusmaterjalide kiirgusdoosid	41
3.3	EGSnrc võrdlus analüütilise mudeliga	42
3.4	I-indeksi kasutamine ehitusmaterjalide kiirgusohutuse hindamisel	44
3.5	Ehitusmaterjalidest tingitud doosikiiruse terviklik käsitus	46
3.6	Tööstusjäätmete taaskasutamiseks sobilikud ehitusmaterjalid	50
	Kasutatud kirjandus	54
	Tänuavaldused	64
	Lihtlitsents	65

Sissejuhatus

Ehitusmaterjalid võivad sisaldada pikaealisi looduslikku päritoluga radioaktiivseid elemente ehk radionukliide. Radionukliidide lagunemisel vabanev kiirgus on võimeline ioniseerima ümbritsevas keskkonnas molekule, mistõttu tuleb kiirgust käsitleda inimese tervist mõjutava tegurina. Madala intensiivsusega kiirguse mõju inimese tervisele saab kirjeldada läbi stohhaistlike efektide, mis väljenduvad peamiselt pahaloomulise kasvaja tekketõenäosuse kasvu kaudu.

Radionukliidide sisaldust ehitusmaterjalides reguleeritakse Euroopa riikides aktiivsuskontsentratsiooni indeksi arvutamise abil. I-indeks ei võta arvesse ehitusmaterjali omadusi ega võimalikku rakendust, vaid annab konservatiivse hinnangu siseruumis viibiva inimese aastasele doosile, kui kiirgavat materjali kasutatakse standardruumi konfiguratsioonis. Standardruum, mis kujutab endast 4×5 m suurust betoonkasti, ei kirjelda realistlikult enamike ehitusmaterjalide kasutusviisi. Liiga konservatiivne lähenemine piirab põhjendamatult nii kõrgema radionukliidide sisaldusega ehitusmaterjalide kasutamist kui ka tööstusjäätmete taaskasutamist ehitusmaterjalide tootmisel.

Eestis teostatud mõõtmiste käigus on täheldatud mitmeid materjale, mille radionukliidide kontsentratsioon on seadusandlusega vastuolus [1]. Kuigi sellest võib jääda mulje, et tegemist on kiirgusohtlike materjalidega, on nende ehitusmaterjalide realistlikku kasutusviisi arvesse võttes alust arvata, et elaniku doosipiirmäär siiski ei ületata ning regulatiivne lähenemine on liiga konservatiivne.

Käesoleva töö eesmärgiks on arendada potentsiaalselt problemaatiliste ehitusmaterjalide kiirgusohtlikkust hindav meetod, toetudes Monte Carlo meetodit kasutava kiirguslevi tarkvara EGSnrc abil tehtavatele doosihinnangutele. Lõputöö raames analüüsitakse laialdaselt levinud doosiarvutusmudeleid ning võrreldakse seadusandluses kirjeldatud meetodit detailsema lähenemisega. Doosihinnangute teostamiseks jaotatakse ehitusmaterjalid rühmadesse, millele koostatakse materjali realistlikku kasutusviisi arvesse võtlev geomeetriline mudel. See võimaldab hinnata ehitusmaterjalist tingitud ioniseeriva kiirguse mõju nii siseruumi õhus kui inimkeha kujutavas ICRP 110 [2] referentsfantoomis.

Peatükk 1

Teoreetiline taust

1.1 Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiiritus

Ehitusmaterjalides võib leiduda väheses koguses loodusliku päritoluga pikaealisi radioaktiivseid elemente. Peamiselt on tegemist nn primordiaalsete radionukliididega, mis eksisteerisid enne Maakera teket ja need on tänapäevani looduses säilinud tänu oma äärmiselt pikale poolestusajale (10^9 - 10^{10} aastat). Radioaktiivse lagunemise tulemusena tekkiv laetud ja neutraalsete osakeste voog on võimeline lõhkuma keemilisi sidemeid. Enamasti on looduslike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid ehitusmaterjalides madalad ja seega on ka radioaktiivsest lagunemisest tingitud osakeste voog väike. Siiski annab see panuse inimest igapäevaselt ümbritsevasse kiirgusfooni. Ioniseerivast kiirgusest tingitud riske käsitletakse analoogselt teiste industriaalühiskonna riskifaktoritega. Kiirgusriski reguleerimine põhineb ehitusmaterjalides leiduvate radionukliidide aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmisel ja väliskiirituse efektiivdoosi hindamisel. Aktiivsuskontsentratsiooni piirväärtuste tuletamisel on lähtutud radionukliidi γ -kiirgusest, kuna α - ja β -osakeste sumbumisvõime keskkonna materjalides on märkimisväärselt kõrgem ja seetõttu ka osakeste vood läbi inimese palju väiksemad.

1.2 Ioniseeriva kiirguse mõõtühikud ja doos

Nii ioniseerivat kiiritust kui ioniseeriva kiirguse mõju inimese tervisele saab kvantifitseerida doosi kaudu. Ainega vastastikmõjusse astuv ioniseerivate osakeste voog kutsub esile ergastus-seisundeid ja elektron-ioon paare, mis on aine ja kiirgusvoo vahelise energia ülekande vahendajateks. Ülekantud energia kvantifitseerimisel kasutatakse neeldumisdoosi D , mida kirjeldatakse SI-süsteemis ühikuga grei ($Gy = J/kg$). Kui neeldumisdoos on otseselt mõõdetav

füüsikaline suurus, siis kiirguskaitstes on levinud ka otseselt mittemõõdetava efektiivdoosi kasutamine. Efektiivdoos seob ioniseeriva kiirguse poolt ainele ülekantud energia stohhastiliste terviseriskide tekkimise tõenäosusega võttes arvesse nii ioniseeriva kiirguse liiki kui kiiritada saanud koe või elundi kiirgustundlikkust. Viimaseid väljendatakse üldlevinud koefitsientidena, mille väärtused on välja töötanud rahvusvahelised organisatsioonid nagu Rahvusvaheline Kiirguskaitsekomisjon (ICRP) ja Rahvusvaheline Kiirgusühikute Komisjon (ICRU) [3]. Efektiivdoosi saab formuleerida kui

$$E = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot \bar{D}_{T,R}, \quad (1.1)$$

kus efektiivdoosi arvutamiseks tuleb kiiritada saanud koe R neeldumisdoos läbi korrutada kiirguse liiki arvestava kiirgusfaktoriga W_R ning koe või elundi kiirgustundlikkust arvestava koefaktoriga W_T . Kui kude asub samaaegselt mitme ioniseeriva kiirguse liigi mõjuraadiuses või saab kiiritada mitu kude/organit, tuleb efektiivdoos summeerida üle mitme kiirguse ja koe indeksi.

Efektiivdoosi SI-süsteemi ühikuks on siivert (Sv), kus 1 Sv vastab viimaste hinnangute kohaselt 5,7 %-lisele stohhastiliste tervisekahjude tõenäosuse kasvule [3]. Stohhastilised tervisekahjud jagunevad omakorda vähkkasvaja tekkimiseks ning geneetilise defekti tekkeks järgmises põlvkonnas. Efektiivdoos 1 Sv suurendab neid riske vastavalt 5,5% ja 0,2% [3]. Efektiivdoos kui suurus võeti esmalt kasutusse doosipiirmäärade sätestamiseks. Tänapäeval on siiverti kasutus laienenud stihhastiliste terviseriskide hindamiseks kiirgustegevuste planeerimisel ja optimeerimisel. Oluline on aga rõhutada, et efektiivdoos on peamiselt optimeerimisvahend, mida ei ole korrektne rakendada konkreetse indiviidi vähkkasvaja riski hinnanguks [4].

Efektiivdoosi definitsioonikohane kasutusviis näeb ette inimeste keskmistatud omaduste põhjal konstrueeritud matemaatiliste mudelite ehk fantoomide rakendamist [2]. Mudeldatud organite kiirgustundlikkuse iseloomustamiseks on leitud koefitsiendid, mis põhinevad peamiselt kõrge neeldumisdoosi saanud inimeste eksperimentaalsetel mõõteandmetel [4]. Igas olukorras pole ehitusmaterjalist tingitud efektiivdoosi arvutamiseks siiski ressursinõudlikku fantoomi vaja. Teatud eelduste korral piisab lihtsatest koefitsientidest, mis võimaldavad teisendada õhus neeldunud doosi efektiivdoosiks. Lähenduse kehtimiseks peab olema tagatud allika geomeetriast tingituna piisavalt homogeenne ioniseeriva kiirguse voog läbi sihtmärgi (antud juhul ruumi õhk) ja suhteliselt kõrge γ -footoni energia (> 100 keV). Kuigi teisenduskoefitsientide väärtus sõltub γ -kiirguse energiast, mistõttu erinevatele radionukliididele vastab erinev väärtus, on looduslike radionukliidide korral levinud kasutada keskmistatud tegurit väärtusega 0,7 Sv/Gy. [5]

1.3 Analüütilised doosi arvutamise mudelid

Teisenduskoefitsiendid võimaldavad fantoomarvutused asendada lihtsustatud analüütiliste mudelitega. Neeldumiskoosi teisendamise läbi saab siseruumi efektiivdoosi hindamisel kasutada analüütilisi kiirekimbu ehk punkt-kerneli mudeleid. Analüütilised mudelid toetuvad reeglina akumulatsioonimeetodile, mis võimaldab eksperimentaalseid koefitsiente ehk akumulatsioonifaktoreid teades mudeldada ka kiirguse ja aine vastastikmõju tulemusena tekkivat hajunud kiirgust. Üheks populaarsemaks kiirekimbu meetodiks on saanud Markkaneni mudel [6], mis lihtsustab varasemalt välja töötatud Strandeni [7] mudelit. Markkanen näitas, et mitmesaja eri energiaga γ -footoni mudeldamise asemel saab kasutada footoni emiteerimise tõenäosusega kaalutud keskmist energiat. Mudel võimaldab hinnata risttahuka kujulise allika lähedal õhus neeldunud doosi. Punkti/ala õhus, kus neeldumiskoos välja arvutatakse, nimetatakse doosipiirkonnaks. Risttahukat võimaldab mudel kirjeldada kahekihilisena, kus üks kiht on kiirgusallikas ja teine kiht varjestusmaterjal. Markkaneni doosiarvutusmudeli saab formuleerida kui

$$\frac{D}{C} = \frac{F\rho}{4\pi} \sum_i \gamma_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i E_i \int B_{2i} \frac{e^{-s_1\mu_{1i} - s_2\mu_{2i}}}{l^2} dV, \quad (1.2)$$

$$B_{1i} = 1 + C(E_i) s_1 \mu_{1i} e^{D(E_i) \mu_{1i} s_1} \quad (1.3)$$

$$B_{2i} = B_{1i} \left[1 + \frac{s_2 \mu_{2i}}{s_1 \mu_{1i} + s_2 \mu_{2i}} s_2 \mu_{2i} e^{D(E_i) s_2 \mu_{2i}} \right] \quad (1.4)$$

$$s_1 = \left| \frac{h_1}{z_p - z} \right| l, \quad s_2 = \left| \frac{z}{z_p - z} \right| l - s_1, \quad l = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (z_p - z)^2}, \quad (1.5)$$

kus D/C on neeldumiskoosi kiirus õhus ühikulise aktiivsuskontentratsiooni kohta ($\text{Gy h}^{-1} \text{ kg Bq}^{-1}$). F on aja, energia ja massi ühikute teisendusfaktor väärtusega $5.77 \cdot 10^{-7}$. ρ on allika tihedus, $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i$ on γ -footonite, mille energia on E_i , neeldumise massikoefitsient. γ -footonite emissioonitõenäosus on kirjeldatud parameetriga γ_i . B_{2i} , B_{1i} on akumulatsioonifaktorid, mis võtavad arvesse hajunud kiirguse teket allika (alumises) ja varjestuse (ülemises) kihis. Akumulatsioonifaktorite arvutamiseks on vaja teada koefitsientide C ja D väärtusi, mis sõltuvad γ -footoni energiast. μ_{2i} , μ_{1i} on alumise ja ülemise kihi lineaarsed nõrgenemiskoefitsiendid. Kui l on kiirgusallikaks oleva tükeldatud kihi alajao ja doosipiirkonna (x_p, y_p, z_p) vaheline kaugus (materjalide ja õhukihi paksus), mis kirjeldab kiirguse pöördruutsõltuvusele vastavat intensiivsuse vähenemist, siis s_2 ja s_1 on kahe vaheline materjali paksus. [6]

Materjali paksusi kasutatakse koos eksponentsiaalse mudeliga, et mudeldada kiirguse neeldumist aines. Hajunud kiirguse tekkimist materjali sees kirjeldatakse akumulatsiooni meetodiga. Ristahukas jagatakse punktallikateks, mille mõju doosipiirkonnale summeeritakse integreerides üle risttahuka mõõtmete.

Üldiselt jaotatakse Markkaneni meetodi kasutamisel ruum kuueks risttahukaks ja hinnatakse iga tahu panust doosikiirusele (Gy/h) ruumi keskpunktis. Meetod võimaldab varieeruva paksuse ja tihedusega materjale hinnata, kuid konkreetsete materjalide akumulatsioonifaktorite määramine osutub keeruliseks. Kui meetod võimaldab arvesse võtta hajunud kiirguse teket läbi allika- ja varjestuskihi, siis kirjeldades allikat erinevate ruumitahkude summamana jääb arvestamata allikate omavaheline vastastikmõju näiteks tagasihajumise näol. Lisaks ei võimalda mudeldada kiirguse levi keerulistemates geometriates. [6]

Siseruumi doosihinnangute aluseks on kasutusele võetud fikseeritud mõõtemetega standardruum, mille seinad, põrand ja lagi koosevad 20 cm paksusest homogeenest materjalist [8]. Kuigi standardruumi kasutamine on laialdaselt levinud paljude ehitusmaterjalide kiirgusohutuse hindamisel, siis realselt sellises rakenduses kasutatud materjale on vähe. Seetõttu on Markkaneni meetodit kasutades enamik ehitusmaterjalide doosihinnangud oma olemuselt liiga konservatiivsed. Samuti osutub probleemseks doosikiiruse arvutamine vaid ruumi keskel. Varasemalt on näidatud, et standardruumi geometria korral on doosi varieeruvus ruumis alla 4% [9]. Tegelikult ei kasutata paljusid ehitustooteid nii seinte, põrandate kui lae ehitamisel kogu konstruktsiooni ulatuses. Seetõttu ei pruugi nii madal doosikiiruse varieeruvus realistliku ruumigeomeetria puhul tõele vastata.

1.4 Monte Carlo meetod ja kiirguslevi

Keerulisemate geometriate korral saab õhus neeldunud doosi hindamiseks kasutada numbrilisi meetodeid, mis kompenseerivad paljusid analüütilise mudeli puudujääke. Realistliku levi mudeldamine osutub aga keeruliseks arvutusülesandeks, kuna osakeste vastastikmõju tulemusena on footonite väli sügavalt põimitud elektronide väljaga, levimise käigus indutseerib footonite voog elektronvoo ja vastupidi. Laetud ja neutraalsete osakeste dünaamikat kirjeldavad aga erinevad vastastikmõjud, mis sõltuvad nii osakeste kui ka ümbritseva keskkonna omadustest. [10]

Kõige üldisema teooriana kirjeldab kiirguse levi Boltzmanni kineetiline võrrand. Boltzmanni võrrand on rakendatav mitte-tasakaalulistest süsteemides, kus üksikute osakeste asemel vaadeldakse süsteemi olekut statistilise tervikuna. Boltzmanni lähenemise aluseks on ülesande püstistamine läbi süsteemi kirjeldavate tihedusfunktsioonide. Skemaatiliselt saab Boltzmanni

võrrandi formuleerida mitmedimensionaalse integraalse diferentsiaalvõrrandina

$$f_{doos}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \int d^3 \mathbf{r}_0 \int d^3 \mathbf{p}_0 \int dt_0 G(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t; \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_0, t_0) f_{all}(\mathbf{r}_0, \mathbf{p}_0, t_0). \quad (1.6)$$

Allika defineerimisel täpsustatakse osakeste ruumi-, kiiruste- ja energiajaotusi kirjeldav tihedusfunktsioon f_{all} . Levinud on ühendada kiirusjaotus ja energiajaotus ühiseks impulsijaotuseks. Osakeste vastastikmõju süsteemiga kirjeldab levioperaator G , mis sisaldab endas mudeli geomeetriat, vastastikmõjust tingitud hajumisi, sekundaarsete osakeste teket ja väliste väljade mõju osakeste trajektooridele. Allika tihedusjaotusele mõjuvat levioperaatorit integreeritakse üle allika mõõtmete, osakeste impulsside ja aja, et määrata f_{doos} , ehk osakeste tihedusfunktsioon huvialuses doosipiirkonnas. [10]

Neeldumisdoosi arvutamise põhimõte on lahendada ülaltoodud integraalvõrrand footonite ja elektronide jaoks ja seejärel avaldada fikseeritud ristlõikepindalaga elementaarkeha läbivate osakeste arv ehk fluuens. Doosipiirkonna neeldumisdoosi saab hinnata läbi fluuensi ja pikkusühiku kohta ära antud energia ehk lineaarse energiasirde. Üheks võrrandite numbrilise lahendamise meetodiks on Monte Carlo meetod. Juhuslikust suuruselt sõltuva funktsiooni keskvaartust saab kirjeldada kui integraali üle tema kõikvõimalike väärtuste

$$\langle f(X) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) p(x) dx, \quad (1.7)$$

kus X tähistab juhuslikku suurust, $p(x)$ on jaotusfunktsioon ja $f(x)$ on suvaline juhuslikust suuruselt sõltuv funktsioon. Antud seost saab laiendada mitme-dimensionaalsele juhule, kus otsitav funktsioon sõltub mitmest sõltumatust juhuslikust suuruselt

$$\langle f(X_1, X_2, \dots) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots f(x_1, x_2, \dots) p(x_1, x_2, \dots) \quad (1.8)$$

Antud integraal on analoogne Boltzmanni võrrandiga. Võib järeldada, et Boltzmanni võrrandi lahendit saab formuleerida kui mitmest juhuslikust suuruselt sõltuva funktsiooni keskvaartust. Siiski ei ilmne antud formulatsioonist, kuidas mitmedimensionaalse integraali arvutust efektiivselt teostada. [10]

Mitmedimensionaalse integraali arvutamine osutub äärmiselt keeruliseks. Integreerimist saab aga asendada valimivõtuga jaotusfunktsioonidest, toetudes tsentraalsele piirteoreemile. Tsentraalse piirteoreemi kohaselt küllalt suure valimi mahu N korral alluvad valimite keskmised normaaljaotusele keskvaartusega $\langle f(X_1, X_2, \dots) \rangle$ ja standardhällbega σ_A / \sqrt{N} . Piisavalt paljude osaliselt stohhaistlike trajektooride mudeldamisel on võimalik üksikute osakeste keskmistatud

käitumisest tuletada terviku süsteemi dünaamika. Sellise arvutusmeetodi arvutusviga on pöördvõrdeline mudeldatud osakeste arvu ruutjuurega, ehk 10-kordsele arvutusaja kasvuga kaasneb vaid 3-kordne määramatuse vähenemine, mis vähendab Monte Carlo kasulikkust olukordades, kus suurem osa mudeldatud kiirgusest ei jõua doosipiirkonda. [10]

1.5 Ehitusmaterjalidest pärineva väliskiirituse reguleerimine ja I-indeks

Kuigi Monte Carlo meetod on täpsem kirjeldus reaalsusest, siis meetodi keerukuse ja rohke arvutusressursi vajaduse tõttu põhineb ehitusmaterjalide kiirgusohutuse reguleerimine lihtsustatud olukordadel, mida saab ka analüütiliste mudelitega kirjeldada. Ehitusmaterjalidest tingitud kiiritusolukorda hinnatakse püsikiiritusolukorra ja elanikukiirituse kontekstis. Euroopa Nõukogu kiirgusohutuse põhistandardite direktiiv sätestab ehitusmaterjalidest põhjustatud väliskiirituse efektiivdoosile viitetaseme 1 mSv/a [11]. Selle all peetakse silmas väliskiirituse doosi, mis saadakse nii välistingimustes toimuvale väliskiiritusele kui ka siseruumides viibimise tulemusena. Siinkohal kasutatakse elamisharjumuste arvestamiseks siseruumis viibimise tegurit, mille levinud väärtuseks on arenenud riikides 0,8 [12].

Kuna ehitusmaterjalidest tingitud doosi hindamine on suhteliselt keeruline ja ajakulukas protsess, siis kasutatakse materjalide kiirgusohutuse hindamisel aktiivsuskontsentratsiooni indeksit ehk I-indeksit. I-indeksi eesmärk on välja sõeluda potentsiaalselt ohtlikud materjalid, mis võiksid põhjustada aastase viitetaseme ületamist. I-indeks on defineeritud kui [11, 13]

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq/kg}}, \quad (1.9)$$

kus C_{Ra} on ^{226}Ra , C_{Th} on ^{232}Th ja C_K on ^{40}K aktiivsuskontsentratsioonid ehitusmaterjalis. Määruse kohaselt peavad kõikide ehitusmaterjalide väärtused olema 1-st madalamad. I-indeksit rakendatakse ehitusmaterjalide, mitte nende koostisosade suhtes. Kui koostisosa kasutatakse eraldiseisva ehitusmaterjalina, siis kasutatakse ka selle hindamisel I-indeksit. Oma loomult on aga I-indeks äärmiselt konservatiivne töövahend, kuna see ei võta arvesse ehitusmaterjali tihedust, kogust ega kasutusviisi siseruumis. [11]

Euroopa Nõukogu direktiiv 2013/59/EURATOM [11] kirjeldab ehitusmaterjalide radioloogiliste parameetrite kontrolli kui:

- ehitusmaterjalis mõõdetakse ^{232}Th , ^{226}Ra ja ^{40}K aktiivsuskontsentratsioonid;
- nende põhjal arvutatakse I-indeks;

- kui $I > 1$, tuleks teostada täpsem doosihinnang;
- kui doosihinnang kinnitab, et efektiivdoos on suurem kui 1 mSv/a, tunnistatakse materjal sobimatuks.

Täpsema doosihinnangu käigus tuleb arvesse võtta, et ehitusmaterjalide väliskiiritust ei reguleerita omaette, vaid vaadatakse osana taustkiirgusest. Kuna ehitusmaterjalid varjestavad suure osa pinnasekiirgusest, siis tehnilisest vaatepunktist pole selge, kuidas hinnata üksikute ehitusmaterjalide reguleerimisel nende varjestusvõimekust, kuna suurema osa varjestusest pakub vaid ehitise välimised kihid.

Teatud juhtudel võib probleeme valmistada ka asjaolu, et I-indeksit rakendatakse valmis ehitusmaterjali, mitte selle koostisosade suhtes. See tingimus lisati Euroopa Nõukogu direktiivi, et ehitusmaterjalide tööstuses oleks sisendina võimalik kasutada looduslikke radionukliide sisaldavaid tööstusjääke, nt kivisöe tuhk või fosforkips, mis võivad sisaldada piisavas koguses radionukliide, et nende I-indeks oleks probleemne, kuid teiste toormaterjalidega kokku segatuna kiirgusohklikku olukorda ei tekita. Valmis ehitusmaterjalide I-indeksi hindamine on teostatav poest ostetavate ehitusmaterjalide korral, kuid ehitusel kasutatavaid põhimaterjale, nagu näiteks valatud betoonseinu, põrandaid ja lage, ei osteta valmis kujul vaid valmistatakse ehitusplatsil toormaterjalidest. Kohapeal valmistatud ehitusmaterjalide aktiivsuskontsentratsiooni hindamine pole aga praktilistel kaalutlustel teostatav.

Klassikalise I-indeksi kasutamise kõrvale on välja pakutud ka mitmeid modifitseeritud lähenemisi. Ühte alternatiivset lähenemist on kirjeldanud Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur, mis on ka kasutusel Soomes, kus põhimaterjalide korral kasutatakse $I = 1$ ja pinnakattematerjalide korral vähem konservatiivsemat $I = 6$ [14]. Kuigi lähenemine vähendab I-indeksi konservatiivsust, ei ole ilmne, et see tagaks pinnakattematerjalidest põhjustatud doosi piiramist doosipiirmäära raames. Siiski, enamik modifikatsioone ei ole mõeldud γ -kiirguse poolt põhjustatud doosihinnangute konservatiivsuse vähendamiseks, vaid käsitlevad lisanduvaid tingimusi ehitusmaterjalidest tingitud radooni piiramiseks. [15]

Viimasena tasub tähelepanu juhtida I-indeksi sõnastusele Eesti Vabariigi seadusandluses [13]: „Ehitustoote aktiivsuskontsentratsiooni indeks peab olema väiksem kui 1, välja arvatud juhul, kui ehitustoote kavandatud kasutusotstarbest tulenevalt lubab Keskkonnaamet kõrgema kiirgustasemega toodet kasutada.” I-indeksi olemus kui viitetase, mille eesmärk on välja sõeluda potentsiaalselt ohtlikud ehitusmaterjalid, on tõlgendatud piirtasemeks, mille põhjal reguleeritakse potentsiaalselt ohtlikke ehitusmaterjale ilma täiendavate doosi hinnanguteta. [13]

1.6 Ehitusmaterjalide radioloogiliste parameetrite mõõtmine ja mudeldamine Eestis

Ehitusmaterjalide radioloogilisi parameetreid on Eestis vaadeldud mitme uuringu raames. 2012. aastal Merle Lusti ja Enn Realo poolt läbiviidud uuringu käigus ei tuvastatud 53-st mõõdetud materjalist ühtegi potentsiaalselt ohtlikku ehitusmaterjali. Samuti analüüsiti põhimaterjalide, nagu näiteks telliskivide ja tuhaplokkide, põhjustatud aastast doosi standardruumi konfiguratsioonis. Arvutustes kasutati Markanneni mudelit, kusjuures tulemused jäid alla 0,5 mSv/a ka kõige kõrgemate I-indeksite korral. [16]

Kui Euroopa Liidu siseselt on kehtestatud ehitusmaterjalide I-indeksile ühtsed nõuded, siis sama ei saa öelda Euroopa Liidu väliste riikide kohta, kust samuti ehitustooteid imporditakse. Kiirgusalane informatsioon Euroopa Liidu välistest riikidest imporditud ehitusmaterjalide kohta on sageli lünklik või puudub üldse. Eelmainitud põhjus ajendas 2020. aastal läbi viima uuringut, mille käigus mõõdeti Euroopa Liidu välise päritoluga ehitusmaterjalide aktiivsuskontentratsioone. Konservatiivse hinnangu kohaselt, võttes arvesse ka mõõtemääramatuse ülempiiri, ületas 42 mõõdetud materjalist 21,4% lubatud I-indeksi väärtust 1. Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrust nr 49 sõna-sõnalt võttes tuleks nende ehitusmaterjalide kasutamist piirata. Doosihinnanguid selle uuringu raames mõõdetud materjalidele ei teostatud. [1]

Kui 2012. aasta uuringu käigus mõõdeti suures mahus põhimaterjale, siis 2020. aasta uuringus vaadati rohkesti pinnakatte- ja detailmaterjale nagu näiteks keraamilised plaadid, šamottkivi ja -mört, kuid ka soojustusmaterjal. Eelnevalt nimetatud materjalide kiirgusohklikkuse hindamine I-indeksi kaudu osutub problemaatiliseks, kuna nende kasutusviisile vastav geomeetria ja tihedus on standardruumist märkimisväärselt erinev. [1]

1.7 Tööstuslik jääk ja meetod konservatiivsuse vähendamiseks

Suuremat ohtu I-indeksi väärtuse 1 ületamiseks võime oodata materjalide puhul, mille tootmiseks on kasutatud tööstuslikes protsessides tekkinud jääkmaterjale. Tänapäeval on populaarsust kogumas ringmajanduse mõtteviis, millega soovitakse tööstuslike protsesside jäätmevooge vähendada läbi jääkide taaskasutuse ja ümbertöötlemise. Jääkmaterjalide kasutamine ehitusmaterjalide tootmises võimaldab vähendada toote keskkonnajalajälge. Tänapäeval kasutatakse jääkmaterjale edukalt betooni, mördi, keraamika, kipsi kui ka kivivilla tootmisel [17]. Jääkmaterjalid leiavad rakendust ka innovaatiliste ehitusmaterjalide

valmistamisel, kus tööstusjäägi lisamine parandab materjali omadusi [18].

Osades jääkmaterjalides võib tööstuslike protsesside tulemusena aset leida looduslike radionukliidide kontsentreerumine [17]. Selliseid jääke sisaldavaid ehitusmaterjale võib iseloomustada kõrge I-indeks. Samas, lähtuvalt materjali kasutusviisist ei pruugi see kirjeldada reaalselt kiirgusohklikku olukorda. Sellegipoolest võivad liiga konservatiivsed doosihinnangud põhjendamatult piirata jääkmaterjalide taaskasutust ringmajanduse kontekstis.

Varasemalt on näidatud, et ehitusmaterjalide realistlikut kasutusviisi arvestades on materjalide doosihinnangud konservatiivsest standardruumi hinnangutest märgatavalt madalamad [19, 20]. Paraku ilmuvad tänapäevani standardruumi geometriat kasutavad artiklid [21, 22], kuna Monte Carlo meetodiga realistlike stsenaariumite mudeldamine üksikute materjalide jaoks on aeganõudev ja keeruline. Lihtsam on kasutada kas analüütilisi mudeleid või varasemalt välja arvutatud doosikoefitsiente [23]. Tegelikuses sõltub doos materjali paksusest, tihedusest ja materjali rakendamise viisist - kas tegu on põhilise ehitusmaterjali ehk nn põhimaterjaliga, pinnakattematerjaliga või üksnes detailides kasutatava materjaliga. Nendest tingimustest lähtuvalt saab konstrueerida realistliku geometria, kuidas materjali tegelikult ruumis kasutatakse.

Peatükk 2

Metoodika

2.1 Kiirguslevi tarkvara valik

Monte Carlo meetodil baseeruvaid kiirguslevi tarkvarasid on mitmeid. Kuna tööruhmil puudus varasem kogemus ehitusmaterjalide kiirguslevi mudeldamisega, siis lähtuti tarkvara valimisel praktilistest kaalutlustest. Esmalt hinnati tarkvara valideeritust sarnaste modelleerimisülesannete lahendamisel, mille puhul paistsid silma nii EGSnrc kui MCNP. MCNP on Ameerika Ühendriikides välja töötatud ekspordipiirangutega kood, mis tegi selle lähtekoodi omandamise keeruliseks. Alternatiivse valikuna oli vabavarana ka võimalik kasutada GEANT4, kuid erinevalt teistest tarkvaradest on GEANT4 kasutamine keerulisem ning arvutusmodelite püstitamine aeganõudvam. GEANT4 paindlikkus mudeldada nähtavast valgusest kuni kosmiliste osakesteni ei leiaks käesoleva töö raames rakendust.

Kuna ehitusmaterjalide kiirguslevi kirjeldamisel piisab vaid elektronide ja footonite mudeldamisest ning varasema kogemuse puudumise tõttu oli tarkvara paindlikkusest veelgi olulisem selle kasutamise lihtsus, siis kõiki kaalutlusi arvesse võttes osutati kasutusele võtta EGSnrc. Üldotstarbeline Monte Carlo tarkvara EGSnrc võimaldab simuleerida footoneid, elektrone ja positrone energiavahemikus 1 keV – 10 GeV ning on tihti kasutatusel meditsiini- ja tööstusrakendustes. Ühe suurima eelisena on tarkvaraga kaasas põhjalikud juhised algajale ning kergesti rakendatavad nädiskoodid.

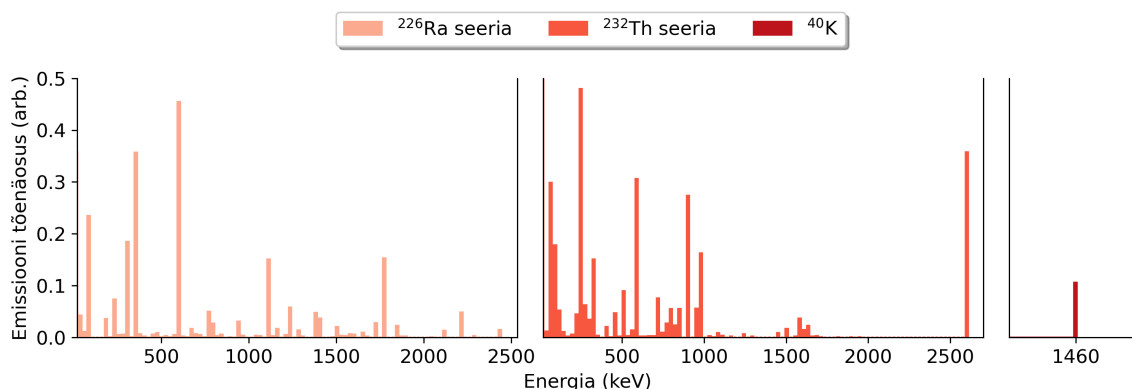
2.2 Kiirgusallikate mudeldamine

2.2.1 Radionukliidid

Käesoleva töö raames keskenduti loodusliku päritoluga ioniseerivale kiirgusele. Fookuse alla seati nii ^{238}U kui ^{232}Th lagunemisread koos ^{40}K radioisotoobiga [11]. Kui ^{238}U ja ^{232}Th lagunevad, siis ei moodustu koheselt stabiilne uus element, vaid uus radionukliid, mille poolestusaeg on emanukliidist märkimisväärselt lühem. Lühema poolestusaja tõttu saab tekkida emanukliidi ja tütar nukliidi vahel sekulaarne tasakaal, mille üheks tunnuseks on kahe isotoobi aktiivsuste võrdsustumine [24]. Mõlema nukliidi lagunemisread on välja toodud lisas C. Järgnevatel lagunemistel moodustuva ahela radionukliidid on rea emanukliidiga sekulaarses tasakaalus, mistõttu on lagunemisrea koguaktiivsus esialgse rea liikmete arvu ja emanukliidi aktiivsuse korrutis.

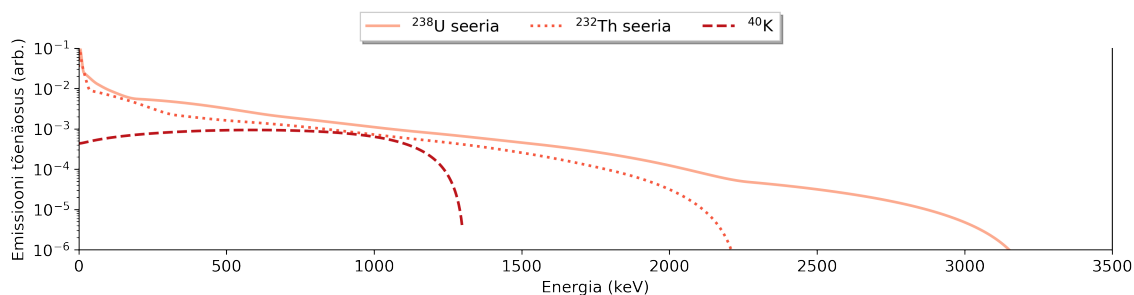
Ahela sekulaarne tasakaal võib olla aga murtud, kui materjali töödeldakse, näiteks proovi ettevalmistuse või ehitusmaterjali tootmise käigus. Nii ^{238}U kui ^{232}Th lagunemisreas tekib gaasiline radoon (^{222}Rn ja ^{220}Rn), mille väljumine ainest põhjustab sekulaarse tasakaalu rikkumise. Kuna ^{220}Rn poolestusaeg on vaid 55 sekundit ja talle järgnevad radionukliidid on samuti väga lühikese poolestusajaga, siis ^{232}Th reas seda probleemi ei teki. Ahela katkemisel regenereerub tasakaal ema- ja tütar nukliidi vahel ~7 poolestusaja möödumisel. ^{222}Rn poolestusaeg on aga 3,8 päeva, ehk tasakaalu taastumiseks kulub suurem osa kuust.

^{238}U rea nukliidide aktiivsuskontentratsiooni proovis mõõdetakse muuhulgas ^{222}Rn lühiealiste tütar nukliidide ^{214}Pb ja ^{214}Bi põhjal, mistõttu ahela katkemisel ei pruugi mõõdetud aktiivsuskontentratsioonid olla seotavad ei ^{226}Ra ega ^{238}U aktiivsuskontentratsioonidega. Samuti võib materjalis olla rikutud ^{238}U ja ^{226}Ra vaheline sekulaarne tasakaal, sest uraanil ja raadiumil on samades keskkonnatingimustes erinev keemiline käitumine [25]. Kuna ^{226}Ra -le eelnevad ^{238}U rea elemendid ei emiteeri olulisel määral γ -kiirgust ega panusta seetõttu märkimisväärselt väliskiirituse doosi, on ^{238}U rea kiirgusohutuse reguleerimine seostatud ^{226}Ra aktiivsuskontentratsiooniga. Kui γ -kiirguse doosi saab reeglina mudeldada vaid ^{226}Ra ja ta tütar nukliidide abil, siis β -kiirguse korral panustavad ^{238}U rea esimesed radionukliidid olulise osa lõplikust doosist, mistõttu tuleb β -kiirguse doosi hindamisel terve lagunemisreaga arvestada.



Joonis 2.1: ^{226}Ra , ^{232}Th lagunemisriidade ja ^{40}K lagunemisel kiirgatava γ -footonite diskreetne energiaspekter.

Kõnealuste radionukliidide poolt emiteeritavate γ -footonite diskreetne energiaspekter on välja toodud joonisel 2.1 ja β -kiirguse energiaspekter joonisel 2.2. Diskreetsete γ -emissioonide tõenäosused saadi Nucleide [26] andmebaasist. β -spektrite genereerimine osutus aga keerulisemaks. Kuna igale võimalikule tuumasiirdele, mille käigus kiiratakse elektron, vastab täpselt üks pidevspekter, siis ühe lagunemisahela kirjeldamiseks võib vaja minna kuni mitusadat pidevspektrit. Spektrite arvutamiseks kasutati *Laboratoire National Henri Becquerel* (LNHB) poolt väljatöötatud BetaShape tarkvara [27]. BetaShape võimaldas radionukliidide lagunemise tuumasiiretele genereerida vastava emissioonispektri, kui tuumasiirde parameetrid ja ülemineku tüüp on teada [27]. Lagunemisahela β -kiirguse emissioonispektri arvutamiseks hinnati esmalt iga radionukliidi kõikvõimalike tuumasiirete spektreid eraldi, ^{238}U lagunemise ahelale vastas 173 üleminekut, ^{232}Th ahelale 82 üleminekut ja ^{40}K lagunemisele 1 üleminek. Seejärel, arvestades siirde tõenäosust, kombineeriti need lagunemisahela kaupa summaarseteks pidevspektriteks.



Joonis 2.2: ^{238}U , ^{232}Th lagunemisriidade ja ^{40}K lagunemisel kiirgatava β -osakeste pidev energiaspekter.

2.2.2 Kiirgusallikad

Väliskiirituse analüüsimisel saab vaadata nii ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni poolt põhjustatud doosikiiruse ehk doosikoefitsiente kui ka anda doosihinnang teadaoleva aktiivsuskontsentratsiooniga allikale. Kuigi olukordade analüüsimisel on levinud doosikoefitsientide arvutamine, siis seadusandluses toodud nõuete kontrollimiseks on kasulik uurida doosikiiruse, mida põhjustavad teadaoleva radionukliidide aktiivsuskontsentratsiooniga allikad.

Toetudes varasemalt kirjeldatud spektritele (joonis 2.1 ja 2.2), loodi 3 erinevat allikat. Allikate radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid on välja toodud tabelis 2.1. Esimese allikana defineeriti Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis „Radiation Protection 112” [8] kirjeldatud referentsallikas. Allikat RP112 kasutati veendumaks, et modelleerimiskeskond on korrektselt installeeritud ja mudeli parameetrid õigesti seadistatud. Selle referentsallika aktiivsuskontsentratsioonid vastavad standardruumis 1 mSv/a doosikiirusele.

Tabel 2.1: Käesoleva töö raames kasutatud allikate aktiivsuskontsentratsioonid (Bq/kg).

C (Bq/kg)	RP112			I-indeks = 1			Eesti keskmine		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Betoon	80	70	800	100	67	1000	35,1	11,3	207
Pinnakatteplaat	-	-	-	100	67	1000	69,5	64,5	669,4
Kipsplaat	-	-	-	100	67	1000	4,4	0,8	7
Muu	-	-	-	100	67	1000	-	-	-

Lisaks referentsallikale konstrueeriti ka allikas, mille I-indeks on täpselt 1. Selleks kasutati I-indeksi definitsioonis välja toodud radionukliidide maksimaalseid aktiivsuskontsentratsioone ja jagati need 3-ga. Allikas vastab I-indeksi kui regulatsioonivahendi piirjuhule. Sellise I-indeksi väärtusega ehitusmaterjalide kasutamine on hetkel Eestis kehtiva seadusandluse raames lubatud ilma täiendavate piiranguteta [13]. Antud allikaga tehtud doosihinnangud annavad selgitust, mis olukordades (millise kasutusviisiga ehitusmaterjalide puhul) on I-indeksi kasutamine sobilik. Tabelis välja toodud kategooria „muu” alla kuuluvad materjalide rakenduste analüüsimise käigus kasutatud ülejäänud ühesele I-indeksile vastavat allikad.

Viimase allika defineerimiseks kasutati Eestis mõõdetud ehitusmaterjalide [16, 1] aktiivsuskontsentratsioonide andmeid, mis annavad hinnangu, milliste ehitusmaterjalidest tingitud doosikiirustega puutub kokku keskmine Eesti elanik. Siinkohal tasub mainida, et betooni ja kipsplaadi aktiivsuskontsentratsioonid võeti Lust et al. (2012) tööst, kus väljatoodud betooni aktiivsuskontsentratsioonid oli ligi kaks korda väiksemad Euroopa keskmisest [28]. Seda, kas tegemist on õigustatud hinnanguga Eesti keskmisele betoonile või statistilise

anomaaliaga, Lust et al. (2012) töö käigus ei hinnanud. Pinnakatteplaatide väärtuseks võeti Lust et al. (2012) ja Koch et al. (2020) uuringute keskmine.

2.3 Geomeetria ja materjalid

Kiirgusdoosi hindamisel on levinud standardiseeritud mõõtmetega eluruumi kasutamine. Kuigi ajalooliselt on kasutatud erinevate mõõtmetega ruume, siis tänapäeval on peamise tähelepanu all Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis "Radiation Protection 112" [8] kirjeldatud $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2,8\text{ m}$ suurune tuba, mille seinad, lagi ja põrand koosnevad ühest homogeenisest materjalist.

Käesolev töö ei piirdunud vaid standardruumi geomeetria. Mudeldamisel kasutati ka modifitseeritud geomeetria ruume, et vähendada doosihinnangute konservatiivsust. Lähtuti Eestis tavaks olevatest ehitusvõtetest, mis ei pruugi kirjeldada olukorda soojema kliimaga riikides, kus kõrge tihedusega põhimaterjalide kasutus on väiksem. Esimene samm realistlikumate hinnangute suunas oli lahutada standardruumi allikas põrandaks, laeks ja seinaks, mille ehitusel kasutatakse reeglina erinevaid ehitusmaterjale. Seejärel täpsustati individuaalsete ehitusmaterjalide geomeetriaid, kuhu alla kuuluvad materjali paksus, kuju ning ka asukoht teiste materjalide suhtes. Paksus ja kuju mõjutavad materjali võimet neelata iseenda kiiratud kiirgust ning asukoht teiste materjalide suhtes kirjeldab neeldumist ümbritsevas keskkonnas.

Välisseinte mudeldamisel kasutati nii valatud kui ka plokkbetooni. Plokkbetooniga analoogselt uuriti ka savist telliskivi. Plokkbetooni ja tellise korral arvestati mördi asetusega nii materjalide vahel kui ka augulise põhimaterjali sees täitematerjalina. Mört käitub varjestusena, kuid panustab samuti lõplikku kiirgusdoosi. Mittekandvate siseseinade rajamisel mudeldati puitkarkassi peale kinnitatud kipsplaati ja keraamilisi plaate olmeruumides. Viimase seinamaterjalina uuriti mineraalvilla kasutamist ruumi soojustamiseks nii ruumi sisemiselt kui välimiselt poolelt.

Põranda ja lae põhilise materjalina kasutati valatud betooni. Lisaks uuriti valatud põrandate katmisel kasutatavaid keraamilisi plaate. Sünteetilisi materjale ja puitu allikana ei mudeldatud, kuna reeglina on sellistes materjalides looduslike radionukliidide aktiivsuskontentratsioon madal.

Viimase ehitusmaterjalide rühmana käsitleti detailmaterjale. Detailmaterjalideks kategoriseeriti eraldiseisvad ruumidetailid nagu telliskiviahjud ja kõõgi tööpinnad. Materjalide keemilised koostised ja tihedused võeti NIST andmebaasist [29] või leiti kirjandusest. Käesolevas töös kasutatud materjalide tihedused, keemilised koostised ja ionisatsioonienergiad on välja toodud lisas A. Lisast B leiab geomeetria täpsed kirjeldused.

2.4 Doosi hindamine

Efektiivdoosi saab hinnata nii õhu needlumisdoosi kui fantoomide põhjal. Õhu neeldumisdoosi teisendamisel efektiivdoosiks on levinud kasutada teisendusfaktorit 0,7 Sv/Gy kohta [5]. Neeldumisdoosi hindamiskiirkonnaks võeti siseruumis 1 m kõrgusel paiknev õhukiht. Kiirekimbu mudeli korral saab hinnata doosikiirust ruumipunktis, Monte Carlo jaoks tuleb aga defineerida doosipiirkond. Kuigi doosikiiruse määramine ruumipunktis on kiirem (üldlevinult ruumi keskpunktis), siis punktarvutuse kasutamine terve ruumi doosi hindamisel võib seada kahtluse alla. Üle ruumi keskmistatud doosikiirust võib lugeda paremaks lähenduseks, kuna ei saa põhjendatult väita, et inimesed veedaksid rohkem aega ruumi keskel. Suur osa ajast siseruumides veedetakse arvutit kasutades ja/või magades. Ruumi kokkuhoiu eesmärgil ja elektrijuhtmete paiknemist arvestades paigutatakse arvutilauad ja voodid pigem seinäärde, mistõttu on realistliku pildi saamiseks oluline arvestada ka doosikiirustega seinte läheduses.

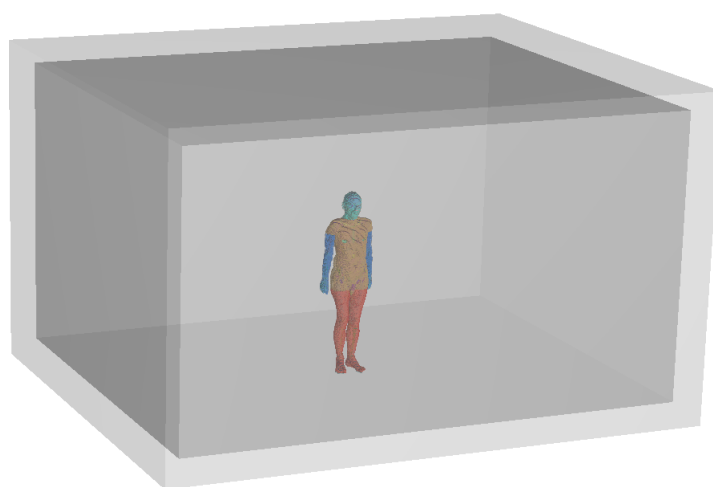
Mudeldamise tulemuse määramatus sõltub doosipiirkonda jõudnud osakeste arvust. Kuigi määramatust saab vähendada genereeritud osakeste arvu tõstes, kaasneb sellega võrdeline arvutusaja kasv. Teine meetod määramatuse vähendamiseks, mis ei tõsta arvutusaega, on keskmistada üle suurema doosipiirkonna. Käesolevas töös kasutati doosihinnanguteks 10 cm paksust õhuviilu, mille keskpunkt asus põrandast 1 m kõrgusel. Lõpptulemus väljendati keskmistatud doosikiirusena selles õhuviilus üle toa. Doosijaotuste uurimiseks tükeldati täiendavalt doosipiirkond 10 cm × 10 cm × 10 cm kuubikuteks, mis olid piisavalt väikesed ruumi üldise doosijaotuse mõistmiseks, kuid piisavalt suured, et olemasoleva arvutusressursiga saaks mõistliku aja jooksul arvutused teostatud.

Arvutuste eesmärgiks seati doosijaotuste korral laiendmääramatus ($k = 2$) kuni 10% ja üle ruumi keskmistatud doosikiiruste puhul kuni 5%. Kuna määramatus sõltub piirkonda jõudnud osakeste arvust, siis doosijaotuste korral võis määramatus varieeruda kuni ~5 korda. Sobivate määramatuste saavutamiseks oli tarvis üle ruumi keskmistatud tulemuste arvutamisel genereerida 10^7 – 10^8 osakest ja doosijaotuste korral 10^9 – 10^{10} osakest.

Suur osakeste arv soovitud määramatuse saavutamiseks on tingitud ehitusmaterjalide kiirguslevi mudeldamise omapärast. Esmalt liiguvad üle pooltest isotroopiliselt kiiratud osakestest siseruumi õhust eemale. Teiseks neeldub suur osa ülejäänud osakestest allika sees omaneeldumise tõttu. Ainult väike hulk algselt genereeritud osakestest jõuab siseruumi õhku, neist enamik aga ei astu vastastikmõjusse õhuga. Sellegipoolest on Monte Carlo meetod realistliku levi kirjeldamisel parim variant, kuna meetod ei sea piiranguid osakese laengule ja energiale ega allika või doosipiirkonna geomeetria. Lisaks on võimalik uurida neeldumisdoosi nii õhus kui ka fantoomides.

Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiirguse optimeerimine tugineb õhu neeldumisdoosi

teisendamisel efektiivdoosiks. Kui γ -kiirguse korral on teisenduskoefitsendid olemas, sest kiirguse kõrge läbitungimisvõime tõttu on doosi jaotus üle keha ühtlane, siis β -kiirguse korral lihtsaid teisenduskoefitsiente ei ole. β -doosi hindamiseks kasutati kahte ICRP 110 referentsfantoomi [2], referentsmees ja referentsnaine, mis on loodud realistlike tomograafiliste andmete põhjal, et arvutada kiirgusdoose organite kaupa. Referentsmehe ja -naise organidooside aritmeetiline keskmine annab doosihinnangu ICRP 103 väljaandes defineeritud referentsinimesele [3]. Käesoleva töö raames kvantifitseeriti referentsinimesega nii ehitusmaterjalidest tingitud γ - kui β -kiirguse doosijaotust individuaalsetes organites. Referentsmeest on standardruumi keskkonnas kujutatud joonisel 2.3.



Joonis 2.3: EGSview tarkvaraga kuvatud referentsmees standardruumi geometrias.

2.5 Mudeli seadistamine

Kiiritusraja korrektseks mudeldamiseks tuleb seadistada tarkvara füüsikalised ja arvutuslikud parameetrid. Mudeli seadistamise alla kuulub nii kiiritusraja asjakohaste vastastikmõjude, arvutusalgortimide kui ka täpsust mõjutavate läviväärtuste valik. Käesoleva töö raames kasutati kiirguslevi mudeldamisel EGSnrc (2021) seadistuse vaikeväärtusi. Ainsa erandina optimeeriti arvutusaja säästmiseks osakeste energia läviväärtuse valikut.

2.5.1 Mudeli vastastikmõjud

Vaikimisi seob mudel footonite välja elektronväljaga läbi kolme peamise vastastikmõju:

- elektron-positron paari teke laetud osakese mõjuraadiuses ehk paaride teke,

- footonite täielik neelamine elektronkatte sisekihi elektronide poolt ehk fotoelektriline efekt,
- mitteelastne hajumine väliskihi elektronidelt ehk Comptoni hajumine. [30]

Lisanduva vastastikmõjuna suudab mudel ka arvesse võtta madalatel energiatel olulist Rayleigh hajumist, kuid lagunemise käigus tekkivate γ -footonite energiatega juures see efekt tulemusi oluliselt ei mõjuta. Kolme loetletud efekti tugevus sõltub ümbritseva aine tuumalaengust ja footoni energiast. Kõrgetel energiatel on kõige olulisemaks paaride teke, keskmistel energiatel Comptoni hajumine ja madalatel energiatel fotoelektriline efekt. [30]

Laetud osakeste liikumist läbi aine mudeldatakse samuti kolme vastastikmõju abil: mitteelastset põrked atomaarsete elektronidega, pidurduskiirus ja positronide annihilatsioon. Viimased kaks vastastikmõju seovad omakorda elektronvälja ja footonvälja, kuna vastastikmõju tulemusena muundub laetud osakeste energia footoniteks. Kahest vastastikmõjust osutub kõige olulisemaks kõrgetel energiatel pidurduskiirus ja madalatel energiatel mitteelastset põrked. [30]

Lisaks eelmainitud põhivastastikmõjudele mängivad olulist rolli ka elastsed põrked aatomi tuumadega, millest tingituna on elektronide liikumissuund pidevas muutuses. Elektronide mitteelastset põrked elektronkatttega tekitavad omakorda ümbritsevas aines ergastusi ja ionisatsioone, mille tulemusena esineb ka relakseerumisest ja rekombineerumisest tingitud footonite ja elektronide voog. [30]

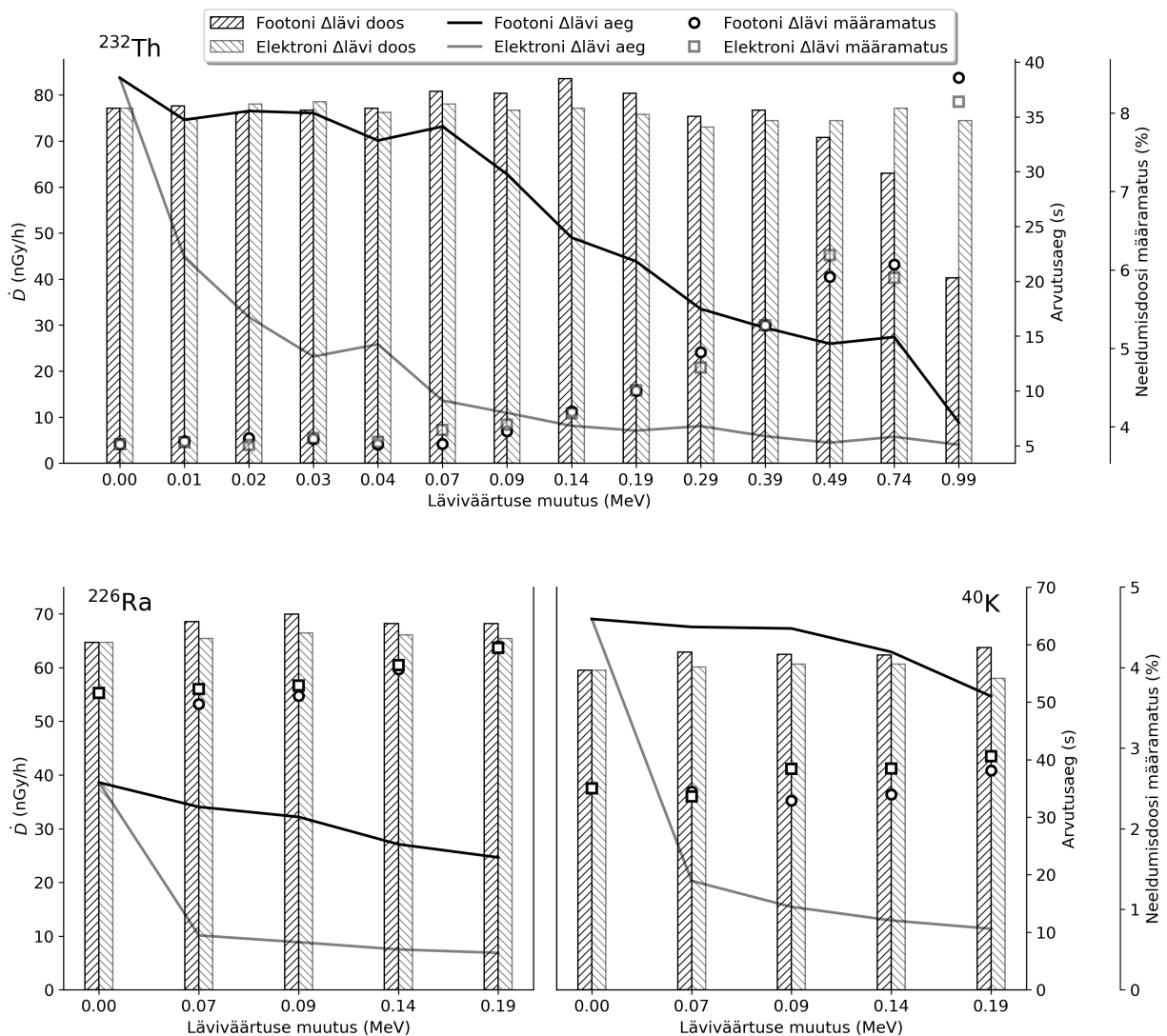
2.5.2 Läviväärtuse valik

Osakeste energia läviväärtuse valik seadistatakse footonite ja elektronide korral eraldi. Mudeldatud osakesed kaotavad iga järgneva vastastikmõjuga energiat. Oma olemuselt määrab läviväärtus lõpliku piiri, millest alates kantakse kogu osakese energia lokaalsele piirkonnale.

Kuna käesoleva töö raames käsitletakse makroskoopiliste mõõtmetega γ -footoni allikaid ja doosipiirkondi, siis oli mudeldamisel alust arvata, et vastastikmõjude käigus genereeritud sekundaarsete osakeste arv, mis liigub ühest doosipiirkonnast teise, on madalatel energiatel tühine. Eelmainitud juhul ei tohiks läviväärtuse muutmine tulemust märkimisväärselt mõjutada. Hüpooteesi kontrolliti standardruumi geometrias ^{232}Th , ^{226}Ra ja ^{40}K näitel. Graafikul 2.4 on kuvatud arvutatud neeldumiskoos määratusega ja kulunud arvutusaeg. Arvutuste tegemisel kasutati tabelis 2.1 kirjeldatud referentsallikat RP112.

Algseks läviväärtusteks võeti EGSnrc vaikeväärtused, elektronidel 0,521 MeV (seisumass + 10 keV) ja footonitel 0,01 MeV. Seejärel hakati ühte kahest läviväärtusest tõstma, et hinnata läviväärtuse mõju arvutuse täpsusele ja ajale. Läviväärtuse muutuse mõju ei kaardistatud lineaarselt vaid kvaasilogaritmiliselt, alustades väikestest muutustest, mida hakati järkjärgult

mitmekordistama, et saada paremat ülevaadet üle suurema vahemiku.



Joonis 2.4: Osakese (elektroni või footoni) energia läviväärtuse mõju neeldumiskoosile, arvutusajale ja määramatusale ^{232}Th , ^{226}Ra ja ^{40}K seeriate näitel.

Esimesena vaadeldi γ -footoni läviväärtust ^{232}Th rea puhul, kuna selles lagunemisreas esineb nii madala kui kõrge energiaga γ -footoneid. Tulemustest selgus, et footonite läviväärtuse väike muutus ei avaldanud olulist mõju õhu neeldumiskoosile, samas ei kutsunud läviväärtuse muutus esile ka suurt muutust arvutusajas. Läviväärtuse suurte muutustel kahanes arvutusaeg oluliselt, kuid sellega kaasnes ka tulemuse määramatuse kasv. See-eest kutsus elektronide läviväärtuse muutmine koheselt esile arvutusaja languse ilma oluliste muutusteta tulemuse väärtuses ja määramatuses. Kuna käesoleva töö põhifookuses on γ -kiirgusest tingitud doos siseruumis, siis otsustati suurendada ainult elektronide minimaalse energia läviväärtust, et vältida madala energiaga γ -footonite potentsiaalse mõju allasurumist.

Graafikul on näha, et läviväärtuse valik on optimeerimisprobleem, kuna liigne läviväärtuse tõstmine kutsub esile ka määramatuse kasvu ja soovitud määramatuse saavutamiseks tuleb genereerida rohkem osakesi. Eelmainitud kaalutlustes otsustati ^{226}Ra lagunemisrea ja ^{40}K korral vaadata arvutusaega ja määramatust ainult teatud läviväärtuse muutuste piirkonnas (vahemik 0,07-0,19 MeV). Sarnast trendi on näha kõige kolme radionukliidi korral, mistõttu kasutati elektronide läviväärtuseks 0,611 MeV (elektroniseisumass 0,511 MeV + optimaalne muutus 0,10 MeV).

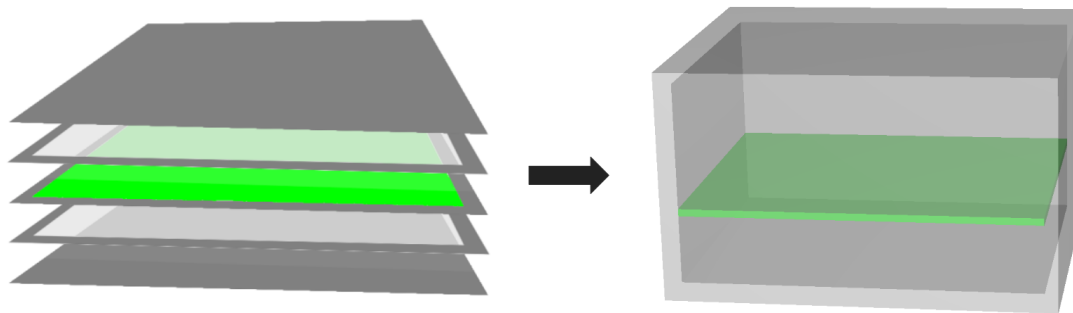
Lisaks graafikul 2.4 illustreeritud tulemustele arvutati ka iga lagunemisrea kohta doosijaotuskaart, mille tulemusi võrreldi vaikeväärtustega saadud kaardiga. Kahe kaardi tulemused ühtisid määramatuse raames.

2.6 Mudeli defineerimine

Üheks ajakulukamaks osaks Monte Carlo mudelarvutuste juures on modelleerimisülesande geometria defineerimine. Kuigi C++ keeles on võimalik kirjutada oma rakendus, mis kasutab vaid kiirguse levi puudutavaid koodijuppe, siis levinum on kasutada EGSnrc tarkvaraga kaasnevat moodulite komplekti, mis võimaldavad mudeli luua lihtsatest geometrilistest kujunditest. Kuid isegi lihtsustatud lähenemine osutub detailsete geometriate koostamisel aeganõudvaks tegevuseks. Iga objekti asend, kuju ja prioriteet teiste objektide suhtes (kui mitmel objektil on sama asukoht, siis prioriteet määrab, milline objekt luuakse) tuleb käsitsi kirjutada mudelit defineerivasse tekstifaili ning kasutaja sisestatud käsured tõlgendab programm ümber mudeli geometria regioonideks. Regioonid peab kasutaja käsitsi vastavusse seadma materjali kirjeldusega. Geomeetria loomisel on vaja kasutada ka visualiseerimistarkvara, et mõista regioonide asetust. Keerulistes geometriates võib regioone olla tuhandeid, see piirab märkimisväärselt realistlikke ehitusvõtteid kujutavate geometriate kasutamist modelleerimisel. Samuti tekivad käsitsi sisestamisel vead, mille ülesleidmine on äärmiselt ajakulukas.

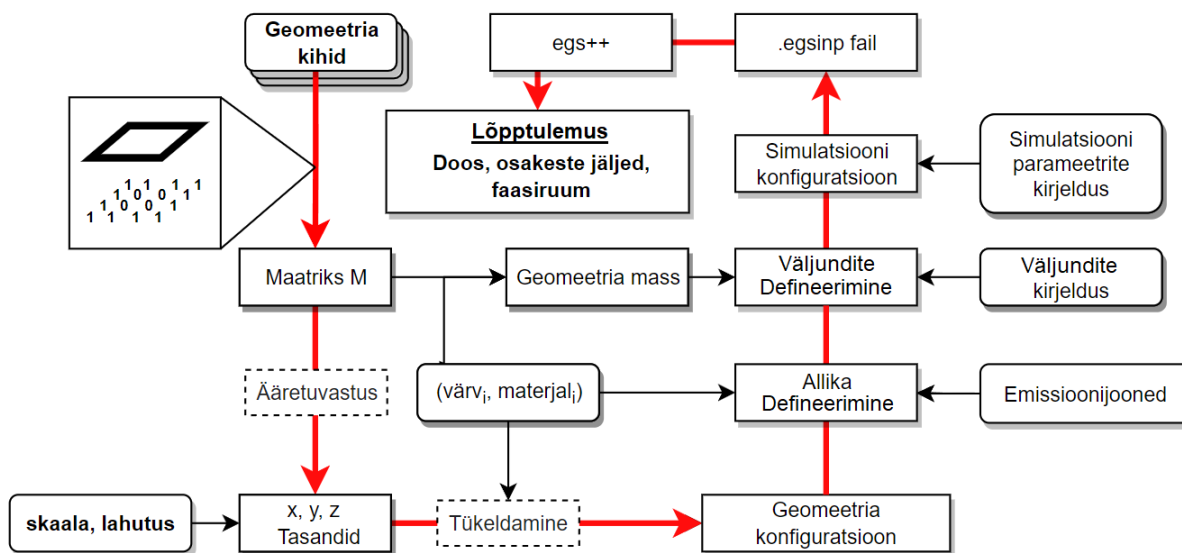
2.6.1 Mudeli failide koostamine

Probleemide ületamiseks kirjutati käesoleva lõputöö raames programm, mis teisendas skemaatilisi pildifaile mudeli geometriateks (joonis 2.5). Tarkvara koostab kõrgusega ristuvate lõigete alusel kolme-dimensionaalse andmemassiivi.



Joonis 2.5: Kasutaja loodud pildifailide konverteerimine mudeli geometriaks.

Seejärel kasutatakse ääretuvastusalgoritmi, et leida väärtuste muutumise piirkonnad iga telje suunas. Need piirkonnad moodustavad kahe erineva materjali puutepinna. Igale puutepinna seatakse vastavusse skaneerimissuunaga risti olev tasand, mis tükeldab ruumi kaheks regiooniks. Paljude tasandite defineerimise koosmõjul kujunebki välja mudeli geometria. Kuna regioonide nummerdamine käib deterministliku algoritmi alusel, siis pöördalgoritmiga saab seada ristlõikel defineeritud värvid ehk materjalid vastavusse mudeli regioonidega. Üldine mudeli failide koostamise skeem on välja toodud joonisel 2.6.



Joonis 2.6: Programmi tööpõhimõtte skeem.

Kasutaja sisendil (joonisel 2.6 ümardatud nurkadega kastikesed) defineerib tarkvara sobivad geomeetria regioonid allikateks (nt seinad, lagi, põrand) ja doosipiirkondadeks (nt üle ruumi ulatuv 10 cm paksune õhukiht põrandast 1 m kõrgusel) ning arvutab tulemuste normaliseerimiseks vajalikud ruumalad.

Esmalt peab kasutaja sisestama mudeli skaala, mis viib pildifaili piksli suuruse vastavusse mudeli geomeetria mõõtmega. Lisaks skaalale on vajalik ka kirjeldada doosipiirkonna lahutust (kui suurteks tükideks doosipiirkond lahutatakse). Seejärel tuleb vastavusse viia pildifailides kasutatud värvid EGSnrc keskkonnas defineeritud materjalidfailidega ning valida, mis materjal kirjeldab mudelis allikat ja doosipiirkonda.

Allika defineerimisel saab sisestada nii radionukliide, kui vastavad andmefailid on ENDF formaadis EGSnrc-s olemas, kui ka spektrifaile, kus on antud osakeste energiad ja vastavad emissioonitõenäosused (emissioonijooned). Mõõdetavate kirjelduste all saab täpsustada, missuguseid väärtuseid arvutuse käigus salvestatakse. Hetkeseisuga toetab programm nii osakeste trajektoore (jäljed), doosipiirkonna neeldumiskoosi kui ka materjalide vahelisi piirpindu ületavate osakeste energia ja asukoha loendamist (faasiruum). Programm võimaldab täpsustada mudeli parameetreid nagu näiteks osakeste energia läviväärtus kui ka vastastikmõju mehhanisme. Viimasena peab kasutaja sisestama nii genereeritavate osakeste kui ka protsessori tuumade arvu, mida arvutamisel kasutatakse.

Pildifailide mudeli geomeetriaks teisendamise programmi kasutades ei pea tegelema EGSnrc käsukeelega, mis vähendab kasutajapoolseid kirjutusvigu kui ka hilisemat tulemuste töötlust, kuna programm võimaldab automaatselt tulemusi teisendada teisendusfaktorite sisestamisel otse efektiivdoosi kui ka doosijaotused .msh failiformaati. EGSnrc käsukeelt läheb vaja vaid siis, kui soovitakse kasutada EGSnrc keskkonnas mitte-defineeritud materjale. Materjalifailide puudumisel tuleb need NIST rakenduse ESTAR [31] abil genereerida.

2.7 Modelleerimistarkvara verifitseerimine: EGSnrc mudeli võrdlus näidisülesandega

Enne kompleksemate arvutuste läbiviimist veenduti nii EGSnrc korrektse installatsioonis kui ka käesoleva töö raames loodud mudeli geomeetria teisendamise tarkvara töötamises. Selleks püstitati mudelifailide koostamise tarkvara abil standardruumi geomeetria tuginev näidisülesanne, mille sisu on kirjeldatud Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis „Radiation Protection 112” [8]. Näidisülesannet kasutati ka ^{238}U ja ^{226}Ra lagunemisriidest tingitud doosi võrdlemiseks, et hinnata, kas seadusandluses toodud lihtsusust piirduda ^{238}U rea radionukliidide doosi hindamisega vaid ^{226}Ra ja tema tütar nukliidide panuse hindamisega, on õigustatud. Nii radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid kui ka mudeldamise tulemusena saadud doosikiirused on välja toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2: Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis „Radiation Protection 112” [8] väljapakutud näidisarvutuse võrdlus EGSnrc poolt arvutatud väärtustega. Aktiivsuskontentratsioonid ja doosikiirused ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th lagunemisriidade ja ^{40}K näitel.

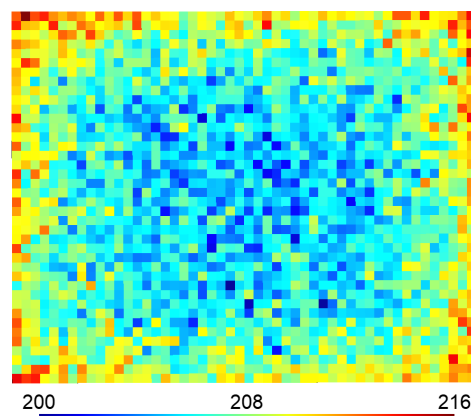
	^{238}U seeria	^{226}Ra seeria	^{232}Th seeria	^{40}K
\dot{D} (nGy/h)	$68,0 \pm 4,0\%$	$66,9 \pm 3,8\%$	$78,4 \pm 4,0\%$	$62,9 \pm 2,6\%$
\dot{E} (mSv/a)	$0,333 \pm 4,0\%$	$0,328 \pm 3,8\%$	$0,385 \pm 4,0\%$	$0,308 \pm 2,6\%$

EGSnrc-iga saadud väärtused langevad laiendmääramatuse ($k = 2$) piires näidisülesande tulemustega kokku (tabel 2.3). On näha, et ^{226}Ra lagunemisrea ja teda sisaldava ^{238}U lagunemisrea põhjal arvutatud doosikiirused langevad samuti määramatuse piires kokku. Vaid ^{226}Ra ja tema tütar nukliidide γ -kiirguse arvessevõtmine doosi hindamisel võib lugeda õigustatud praktikaks, kuna $> 95\%$ doosi panustavadki vaid eelmainitud rea radionukliidid.

Tabel 2.3: Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis „Radiation Protection 112” toodud näidisarvutuse ja EGSnrc tulemuste võrdlus.

	Simulatsioon	RP112
\dot{D} (nGy/h)	$209,3 \pm 4,3\%$	215
\dot{E} (mSv/a)	$1,03 \pm 4,3\%$	1,1

Lähtudes näidisülesandest uuriti ka standardruumi doosikiiruste jaotust. Orabi [9] ja Dziri et al. [32] on oma töödes kirjeldanud ehitusmaterjalide doosijaotusi standardruumi kontekstis ning arvutatud jaotuste hälve on olnud väike. Näidisülesandes kirjeldatud allika doosikiiruste jaotus siseruumis on välja toodud joonisel 2.7.



Joonis 2.7: Ehitusmaterjalidest põhjustatud välise γ -kiirguse neeldumiskoosi kiiruste (nGy/h) jaotus standardruumi õhus Euroopa Komisjoni juhendmaterjalis „Radiation Protection 112” [8] kirjeldatud näidisülesande puhul.

Neeldumisdoosi kiiruse jaotust uurides on näha, et maksimum (216 nGy/h) kujuneb välja seinte ääres ja miinimum (200 nGy/h) ruumi keskel. Siiski, doosikiiruste hälve on väike, maksimumi ja miinimumi erinevus jääb alla 10%. Kuigi doosikaardil kuvatud väärtuste laiendmääramatus ($k = 2$) jäi alla 5%, on doosikaart maksimumi ja miinimumi väikese erinevuse tõttu suhteliselt mürane. Standardruumi geomeetria puhul on ruumi keskel ja üle ruumi keskmistatud doosikiiruste erinevus piisavalt väike, et nii ühe kui ka teise meetodi kasutamine on õigustatud.

Peatükk 3

Tulemused ja arutelu

3.1 Looduslikest radionukliididest tingitud väliskiiritus

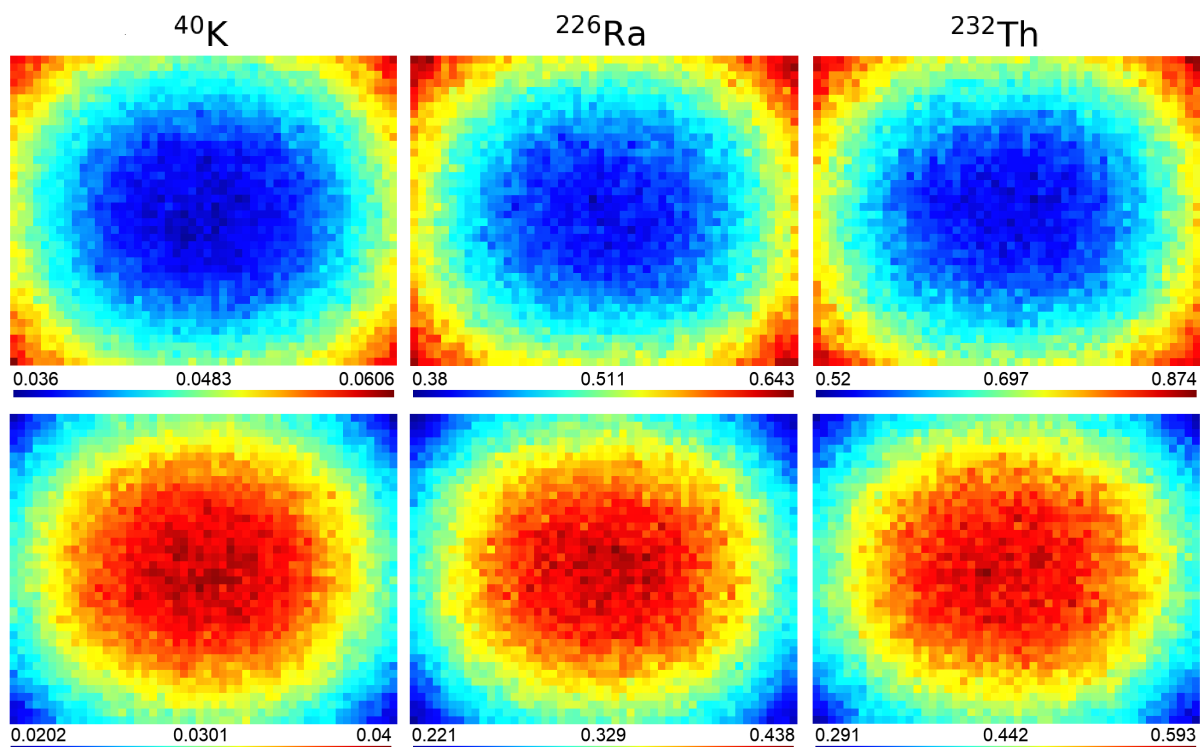
Esimese etapina dekonstrueeriti standardruum kaheks allikaks - seinad ning põrand ja lagi. Eesmärgiks oli uurida eelnevalt kirjeldatud allikate neeldumisdoosi jaotusi õhus. Seejärel hinnati tiheduse ja materjali paksuse mõju ruumi keskmisele doosikiirusele ning hinnati kui palju väheneb maapinna kiirgusest põhjustatud doos siseruumi varjestava mõju tõttu. Viimasena analüüsiti väheuuritud β -kiirguse panust aastasesse doosi standardruumi geometrias.

3.1.1 γ -kiirguse doosijaotus ruumis ja inimeses

γ -kiirguse doosijaotuste arvutused viidi läbi nii ^{226}Ra ja ^{232}Th lagunemisriidadega kui ka ^{40}K isotoobiga. Doosikaardid on välja toodud joonisel 3.1. Analüüs näitas, et kolme radionukliidi põhjustatud doosijaotuste kujud on praktiliselt samaväärsed. Seintest tingitud γ -kiirgus põhjustab doosikiiruse maksimumi seinte läheduses, mis väheneb ligikaudselt pöördruutsõltuvusega ruumi keskele liikudes. Vastupidist olukorda on näha põrand ja lae korral, kus doosikiiruse maksimum on välja kujunenud ruumi keskel ning miinimum seinte ääres.

Liites seinte doosikaardile põrand ja lae doosikaardi on tulemuseks standardruumi doosijaotus, mis on välja toodud joonisel 2.7. Võib järeldada, et doosikiiruste väike hälve standardruumi eri punktides on seletatav seinte ja põrand + lae doosikiiruste ekstreemumite kokkulangemisega, kus äärmused kompenseerivad üksteist ja tekib ühtlane doosijaotus üle ruumi. Sellest võib ilmnedagi probleem doosi hindamise meetodite puhul, mis üldistavad ruumi keskpunkti doosikiiruse üle ruumi. Kuigi lähendus kehtib standardruumi kujulise allika korral, võib see osutada puudulikuks realistlikumates geometriates, kus doosikiiruse analüüs võtab arvesse

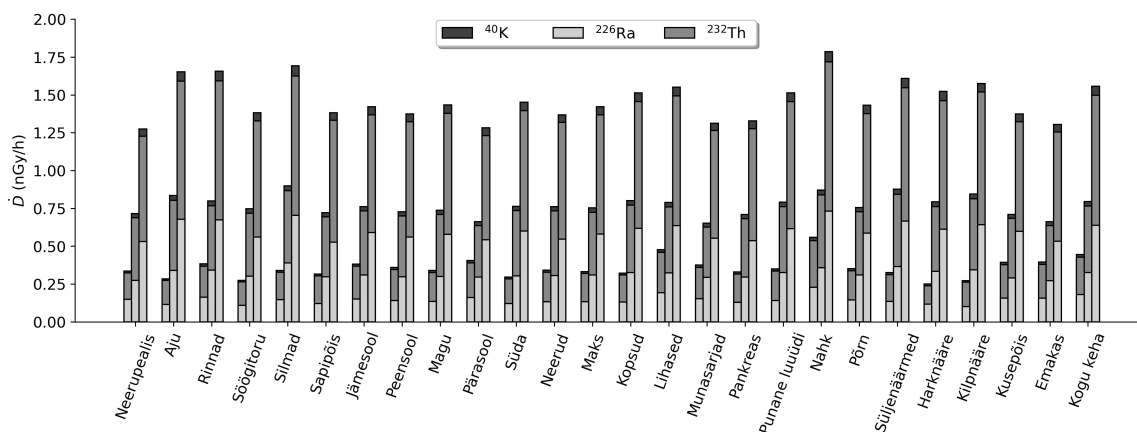
konkreetses ehitusmaterjalis kasutusviisi (nt lagi ja seinad ei pruugi olla samast materjalist ega sisaldada samaväärses koguses radionukliide).



Joonis 3.1: γ -kiirguse neeldumiskoosi kiiruse (nGy/h) jaotus standrdruumi õhus ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta (\dot{D}/C) ^{226}Ra ja ^{232}Th lagunemisriidade ning ^{40}K korral. Ülemisel real on kujutatud seintest tingitud doosijaotus, alumisel real põrandast ja laest tingitud doosijaotus.

Doosikiiruse võrreldes on näha, et kõige madalamad väärtused on tingitud ^{40}K -st ja kõrgeimad ^{232}Th -st. Kuigi nende doosikiiruste vahe on ligi 10 korda, esineb reeglina ^{40}K suurtemates kontsentratsioonides, mistõttu kolme radionukliidi reaalse panuse peale aktiivsuskontsentratsiooni arvestamist on tihti võrreldav.

Lisaks doosikiiruse jaotuse analüüsimisele ruumi õhus, arvutati välja ka γ -kiirgusest tingitud doosikiiruste jaotus inimese organites. Analüüs viidi läbi ICRP 110-s väljatoodud referentsfantomidega. Tulemused on kujutatud joonisel 3.2, esitatud on neeldumiskoosi kiirused inimese organites.



Joonis 3.2: γ -kiirgusest tingitud neeldumisdoosi kiirused referentsinimese organites. Vasakpoosed tulbad kirjeldavad olukorda, kus kiirgusallikaks on põrand, keskmised olukorda, kus allikaks on seinad, ning parempoolsed tulbad vastavad standardruumi põrandast, seintest ja laest tulevale summaarsele doosikiirusele.

Kõikide allika geomeetriaate korral on γ -kiirgusest tingitud doosikiirused piisavalt ühtlased, et massikeskmistatud doos üle kogu keha (kõige parempoolsem) oleks esindavaks suuruseks. Sellest tingituna võib väita, et õhu neeldumisdoosi teisendamine efektiivdoosiks on samuti põhjendatud ka sein- ja põrandageomeetriaate korral. Kõige kõrgemaid doosikiirusi leiti välimistes organites nagu silmad ja nahk, mis vähesel määral varjestavad sisemisi organeid nagu soole- ja kõhupiirkonna elundid, kus doosikiirused on väiksemad. Referentsinimese põhjal arvatud efektiivdoosid, mis on välja toodud tabelis 3.1, ühtisid nii ^{226}Ra , ^{232}Th kui ^{40}K korral õhus teisendatud doosiga määramatuse piires.

Tabel 3.1: Standardruumi seintest, põrandast ja laest tingitud aastane efektiivdoos ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta (1 Bq/kg) nii referentsinimese kui õhus neeldunud doosi teisendamise näitel.

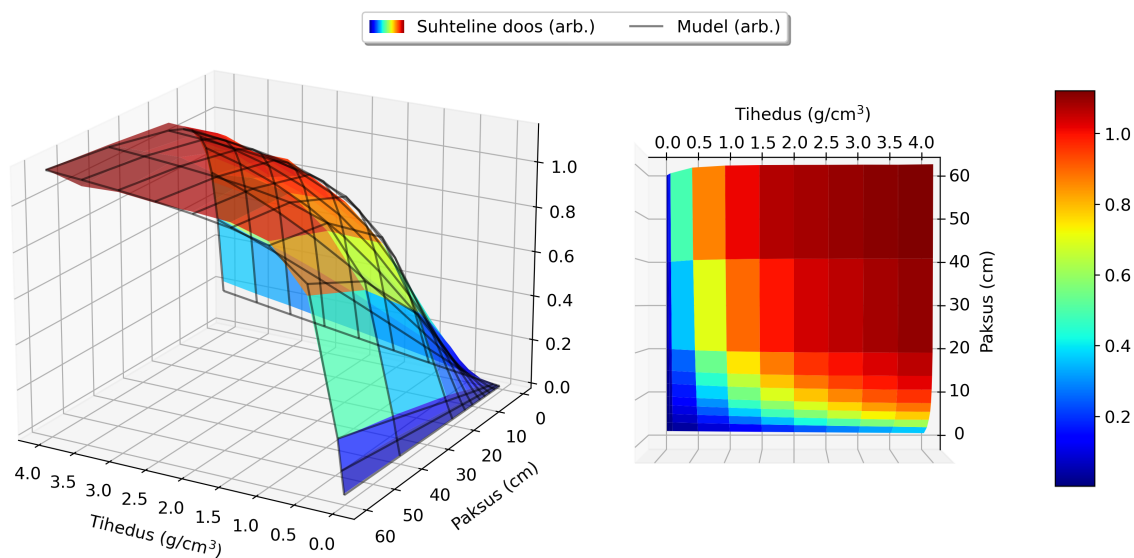
	^{226}Ra rida	^{232}Th rida	^{40}K
Referentsinimene \dot{E} ($\mu\text{Sv/a}$)	$4,26 \pm 4,7\%$	$5,70 \pm 4,9\%$	$0,393 \pm 4,3\%$
Õhus neeldunud doos \dot{E} ($\mu\text{Sv/a}$)	$4,13 \pm 2,1\%$	$5,54 \pm 2,2\%$	$0,388 \pm 1,8\%$

3.1.2 Ehitusmaterjalide paksuse ja tiheduse mõju γ -kiirguse doosile

Kui materjalidest tingitud kiirgusdoosi konservatiivsust vähendada läbi realistlikumate geomeetriaate, siis tuleb arvestada suurel määral materjalide paksuse ja tihedusega. Selleks, et spetsiifilistes kasutusviisides hinnatud ehitusmaterjalide doosikoefitsiente saaks laiendada erinevate tiheduse ja paksusega materjalidele, hinnati mõlema muutuva mõju γ -kiirgusest tingitud doosikiirusele.

Muutujate mõju uurimiseks loodi arvutiprogrammi abil mudeli konfiguratsioonifailide generaator, mis jaotas standardruumi põranda- ja seinaallikaks ning varieeris allika paksust ja tihedust. Muutujate olekuruumi katmiseks koostati iga loodusliku radionukliidi jaoks eraldi mudelarvutuste kogum. Kokku koostati 660 unikaalset tiheduse, paksuse, rakenduse ja radionukliidi kombinatsiooni.

Tulemused on välja toodud joonisel 3.3. Kuna eri radionukliidide ja allika geometriate suhtelised väärtused oluliselt ei erinenud (joonis 3.4), kuvati joonisel vaid seintest tingitud suhtelised doosikiirused ^{232}Th rea näitel. Doosikiirused on esitatud suhteliste väärtustena võrreldes neid standardruumi lähenemisele kohase 20 cm paksuse ja $2,35 \text{ g/cm}^3$ tihedusega materjali poolt põhjustatud doosikiirusega.



Joonis 3.3: Paksuse ja tiheduse mõju suhtelisele doosikiirusele standardruumi geometrias, kui kiirgusallikaks on ^{232}Th rea nukliidid ruumi seintes.

Tulemustest selgus, et doosikiirused lähenevad küllastunud väärtusele nii materjali tiheduse kui paksuse kasvamisel. Ehitusmaterjalid, mis on paksemad kui 20 cm ja kõrgema tihedusega kui $1,5 \text{ g/cm}^3$ on jõudnud küllastusväärtusteni, st varjetavad omaenda kiirgust piisavalt hästi, et täiendav paksuse või tiheduse suurenemine (ja seega ka radionukliidide absoluutaktiivsuse kasv seinas) endaga doosikiiruste märgatavat kasvu kaasa ei too. See-eest on aga tihedus oluline õhukeste ning materjali paksus kergete materjalide korral. Esimeste alla võiksid kuuluda pinnakatte- ja viimistlusmaterjalid ning viimaste alla soojustusmaterjalid. Tiheduse ja paksuse mõju doosikiirusele kvantifitseeriti funktsiooni sobitamise kaudu. Selleks kasutati valemiga 3.1

kirjeldatud funktsiooni

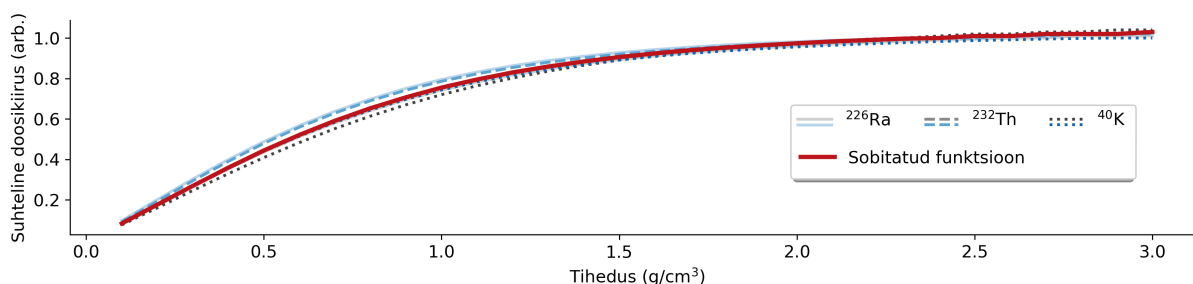
$$f(\rho, D) = a \ln(b\rho) \cdot \ln(cD) \cdot \tanh(d\rho D), \quad (3.1)$$

kus ρ on allika tihedus (g/cm^3), D on allika paksus (cm) ja a , b , c , d on sobitamise käigus avaldatud kordajad.

Tabel 3.2: Tiheduse ja paksuse funktsiooni sobitamise keskmistatud kordajad.

a	b	c	d
$4.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^{-2}$

Funktsiooni sobitamisel vaadati erinevate radionukliidide ja allika geomeetria mõju suhtelisele doosikiirusele. Reegina osutus nende mõju piisavalt väikeseks, et tiheduse ja paksuse mõju kirjeldamisel sai heas lähenduses kasutada radionukliidide ja allika geomeetria kõverate keskmist. Keskmistatud kordajad on kirjeldatud tabelis 3.2. Näidis erinevate radionukliidide ja allika geomeetria mõjust koos sobitatud funktsiooniga on välja toodud joonisel 3.4.

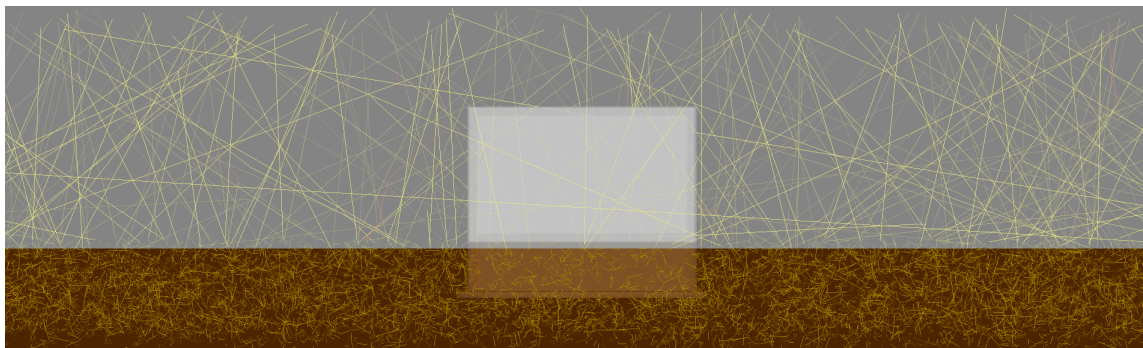


Joonis 3.4: Erinevate radionukliidide sisaldusest (^{226}Ra , ^{232}Th ja ^{40}K) ja allika geomeetriast (seinad või põrand) tingitud kõrvalekalle sobitatud funktsioonist, 20 cm paksuse materjali tiheduse sõltuvuse näitel.

3.1.3 Pinnase γ -kiirguse doosi mõju siseruumis

Tiheduse ja paksuse analüüsist on näha, et kõrge paksuse ja tihedusega materjalidest tingitud doosikiirused jõuavad küllastusväärtuseni. Küllastusväärtuseni jõudmist saab laiendada ka ruumiväliste kiirgusallikate panuse hindamisel siseruumi õhus. Üheks põhiliseks ruumiväliseks kiirgusallikaks on hoonealune pinnas. Kuigi enamusest kiirgusest neeldub kas pinnases endas või on varjestatud ehitusmaterjalide poolt, pääseb γ -kiirguse loomuse tõttu osa siiski ka siseruumi õhku. Selle läbipääsenud kiirguse kvantifitseerimiseks loodi mudel $40 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ maaalaga, mille keskele asetati standardruumi geomeetrias maja koos algelise vundamendiga.

Algeline vundament koosnes pinnasesse kaevatud süvimikest, mis on täidetud betooniga. Mudeli ristlõige koos pinnases genereeritud γ -footonitega on välja toodud joonisel 3.5.

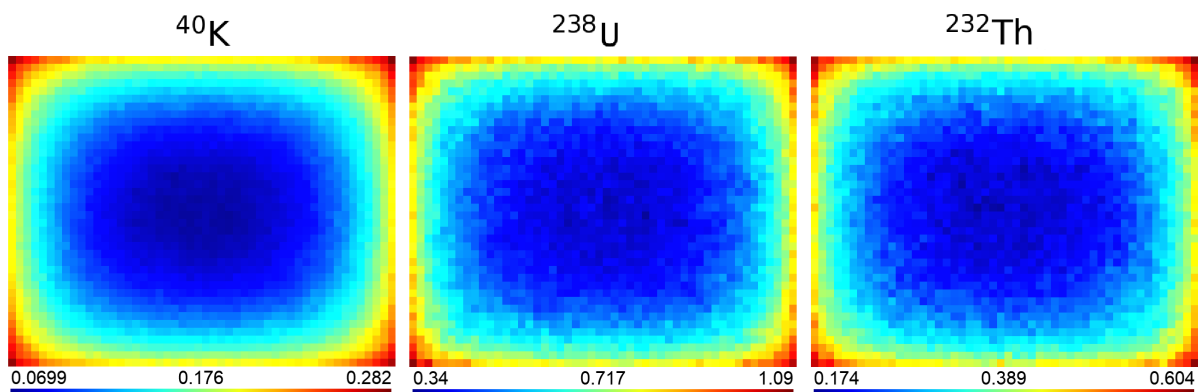


Joonis 3.5: Illustratsioon pinnases genereeritud γ -footonite trajektoorigest pinnases ja välisõhus. Maa-ala keskel asub standardruumi geometria koos vundamendiga.

Analüüsi käigus selgus, et suurem osa kiirgusest jääb oma genereerimise piirkonda. Vaid pinnalähedased footonid jõuavad pinnasest välja, kuid sellisel juhul on eelistatud footonid, mille liikumisteed pinnases on võimalikult lühike, ehk pinnase tasandiga risti. Võib järeldada, et enamik γ -footonitest, mis jõuavad pinnasest välja, liiguvad otse üles. Vaid tilluke osa kõigist genereeritud footonitest liiguvad sobiva nurga all ja ei neeldu ehitusmaterjalides täielikult ning jõuavad siseruumi õhku. Võttes arvesse Eesti pinnase aktiivsuskontsentratsioone [28], arvutati välisõhu doosikiirusteks 1 meetri kõrgusel 47,5 nGy/h, mis on võrreldav kirjanduses avaldatud tulemustega [33]. Standardruumi siseõhus langeb pinnasest põhjustatud doosikiirus aga 2,5 nGy/h-ni (0,012 mSv/a). Hoone 20 cm betoonist väliskarkass varjestab ligi 95% pinnases sisalduvatest radionukliididest põhjustatud kiirgusest. Võib järeldada, et pinnasest tingitud kiirgusdoosi ignoreerimine siseruumi hinnangutel on õigustatud, kui hoone ehitamisel on kasutatud kõrge tiheduse ja paksusega materjale nagu betoon.

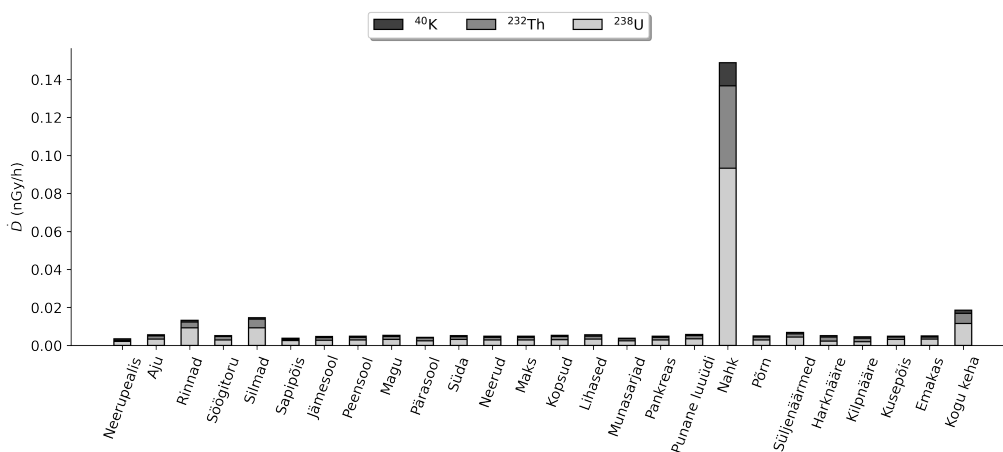
3.1.4 β -kiirguse doosi jaotus ruumis ja inimeses

Enne materjalide spetsiifiliste kasutusviiside uurimist, vaadati ka konservatiivses standardruumi geometrias ehitusmaterjalidest tingitud β -kiirguse doosi. Siinkohal hinnati β -kiirguse panust vaid standardruumi tervikliku allika kontekstis, et saada konservatiivne hinnang maksimaalsele β -kiirguse doosile siseruumis. Kirjanduses ei leidu pea ühtegi ülevaadet ehitusmaterjalide poolt põhjustatud β -kiirguse doosist, kuna elektronide läbimisvõime materjalides on äärmiselt väike. Esmalt läheneti probleemile analoogselt γ -kiirgusega ning uuriti β -kiirguse neeldumist õhus. Arvutatud doosikaardid standardruumi geometrias on välja toodud joonisel 3.6.



Joonis 3.6: Standardruumi ühikulise aktiivsuskontsentratsiooniga allika neeldumiskoosi jaotus (D/C) ^{238}U ja ^{232}Th ridade ning ^{40}K β -kiirguse korral.

Doosijaotuse kuju on γ -kiirgusega analoogne, kuid õhus esineva märkimisväärse neeldumise tõttu, langevad seinteäärsed kõrged doosikiirused ruumi keskele liikudes kiiremini kui γ -kiirguse korral (joonised 2.7 ja 3.1). Esmapilgul osutuvad ootamatuks neeldumiskoosi kõrged väärtused, kuid see on põhjendatav β -kiirguse kõrge neeldumisega õhus, mis on vastupidine γ -kiirgusele, mis ei astu õhuga nii lihtsasti vastastikmõjusse. Sealjuures on aga γ -doosi jaotus inimkehas ühtlane (joonis 3.2). Samad eeldused ei kehti aga β -kiirguse korral, mille kehvena läbitungimisvõime tõttu on kiirguse mõju piiratud vaid välimiste organitega. β -kiirguse mõju hindamiseks tuli kasutada neeldunud energiat referentsfantoomi organites, mis on kvantifitseeritud joonisel 3.7.



Joonis 3.7: β -osakestest tingitud neeldumiskoosi kiirused referentsinimese organites.

Ootuspäraselt on näha kõige kõrgemaid doosikiirusi välimistes organites nagu nahk, rinnad ja silmad, mis varjestavad ülejäänud organeid kiirguse eest. Massikeskmistatud doos üle keha on

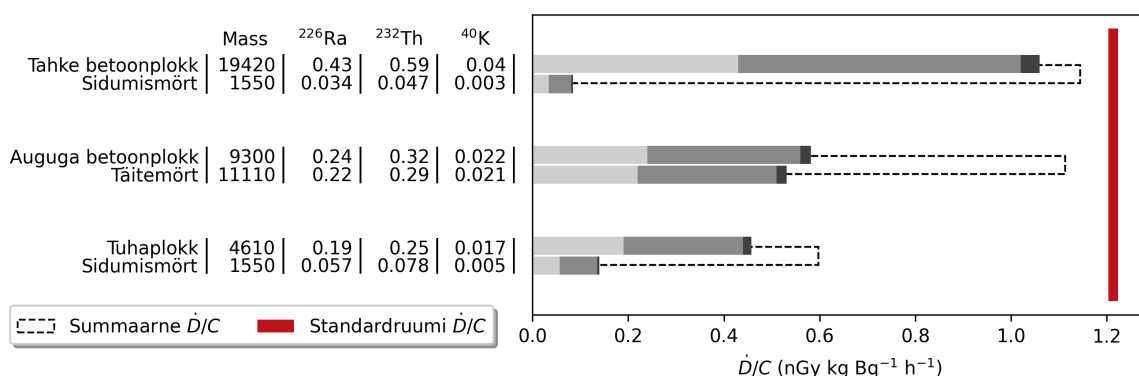
ligi 100 korda väiksem kui γ -kiirguse korral, mis õigustab β -kiirguse mitteamistamist välise kiirguse doosihinnangutes. Kuigi nahas neeldunud doosikiirus võib tunduda kõrgena võrreldes ülejäänud organitega, on naha koefaktorid kõige madalama tundlikkusega, mis vähendab naha neeldumiskoostispanust kogu keha efektiivdoosi. Summaarse efektiivdoosi arvutamine allikaga, mille aktiivsuskontsentratsioon vastaks ühesele I-indeksile (tabel 2.1), annaks beetakiirguse doosikiiruseks 0,012 mSv/a, mis on pinnasest tingitud γ -kiirguse mõjuga samas suurusjärgus.

3.2 Ehitusmaterjali kasutusviisi mõju γ -kiirgusest tingitud doosile

Toetudes varasemalt kirjeldatud tulemustele, uuriti ehitusmaterjalide realistliku kasutusviisi mõju doosikiirusele läbi unikaalsete arvutusgeomeetria, mis loodi standardruumi näitel. Järgnevad tulemused on lahterdatud materjalide tüübi ja kasutusviisi kaupa. Kõik tulemused on antud doosikoefitsientides ehk neeldumiskoostis kiirusena õhus ühikulise radionukliidi aktiivsuskontsentratsiooni (1 Bq/kg) kohta. Materjalidele vastavate geomeetria kirjeldus on välja toodud lisas B.

3.2.1 Seinaplokk

Esimesena analüüsiti välisseina ehitusel laialt levinud plokkmaterjale. Modelleeriti nii tahkeid kui augulisi plokkke. Lisaks vaadati ka madala tihedusega tuhaplokkke. Joonisel 3.8 esitatud doosikiiruse võrreldes on näha, et mõlemad betoonploki liigid, nii tahke kui auguline, tekitavad koos mördiga samas suurusjärgus doosikiiruse nagu standardruumi sein, mida on graafikul kirjeldatud punase joonega.



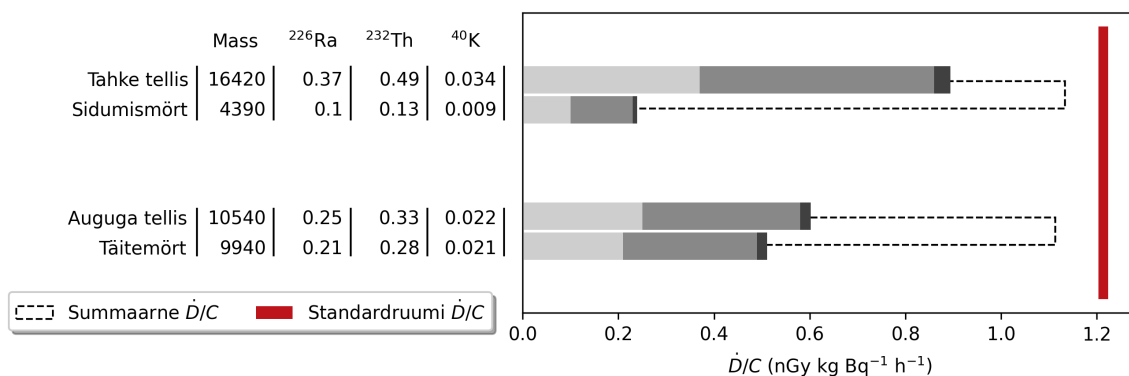
Joonis 3.8: Seinaplokkmaterjalide ja mördi massid (kg) ja doosikiirused D/C (nGy kg h⁻¹ Bq⁻¹) ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.

Vaid tuhaploki põhjustatud doosikiirus on märkimisväärselt madalam plokkide madala tiheduse tõttu. See-eest varjestavad tuhaplokkid aga vähem sidumismördi kiirgust.

Joonise 3.8 vasakpoolne tulp vastab ^{226}Ra -le, keskmine ^{232}Th -le ja parempoolne ^{40}K -le. Punktkriipsuga on ploki ja mördi summaarne doosikiirus. Kui võrrelda seina erinevatest komponentidest põhjustatud doosikiirusi allika massiühiku kohta, siis selgub, et kõige väiksem doosikiirus tuleb täitemördist. Täitemördist tingitud doosikiirus allika massiühiku kohta on tahkest plokist ^{226}Ra korral 10%, ^{232}Th korral 14% ja ^{40}K korral 2% madalam. Selgituseks võib tuua nii täitemördi omaneeldumisvõime kui ka ümbritseva plokikihi, mis varjestab osaliselt mördist tingitud γ -kiirgust. Tuhaplokk aga varjestab massiühiku kohta nii tahkest kui augulisest plokist ligi 40% kehvemini.

3.2.2 Telliskivi

Telliskivi puhul võrreldi ehitusplokiga analoogselt nii tahke kui augulise tellise kasutamisest tingitud doosikiirusi (joonis 3.9). Mõlemad tellise liigid tekitavad tellise ja mördi summeerimisel standardruumiga samas suurusjärgus doosikiiruse. Erinevalt ehitusplokist kasutatakse telliskivi müüri ehitamisel tellise väiksemate mõõtude tõttu oluliselt rohkem sidumismörti. See-eest kulub väiksemate mõõtudega augulise telliskivi täitmiseks vähem mörti kui augulise seinaploki korral, mistõttu on täitemördi kogused hoopis väiksemad.



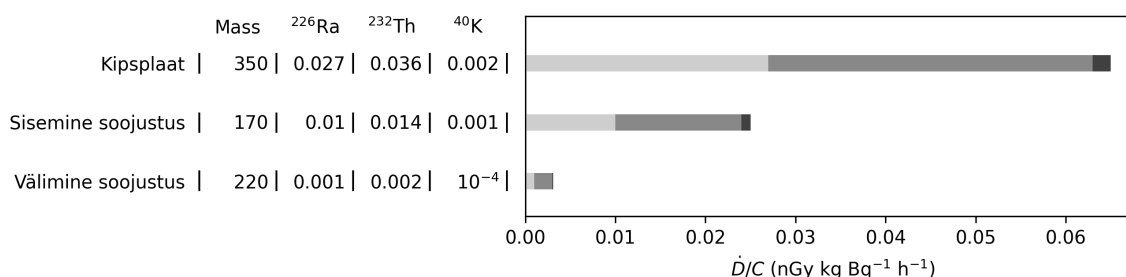
Joonis 3.9: Seina telliste ja mördi massid ja doosikiirused D/C ($\text{nGy kg h}^{-1} \text{Bq}^{-1}$) ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.

Kui võrrelda kahe tellise liigi võimet mördist tingitud kiirgust varjestada, siis on näha ehitusplokiga vastupidist olukorda. Sidumismördi doosikiirus on allika massiühiku kohta ^{226}Ra korral 9%, ^{232}Th korral 11% ja ^{40}K korral 7% väiksem kui täitemördil. Määravaks erinevuseks ehitusplokkide ja telliskivi vahel võib tuua augu mõõtmed. Kui augulise ploki korral on auku mahtuva mördi kogus piisavalt suur, et mördi omaneeldumise efekt annab olulise panuse lõpliku

varjestusvõimesse, siis telliskivide väiksemate aukude tõttu on omaneeldumine mördi sees väiksem.

3.2.3 Kipsplaat ja soojustusmaterjal

Seina kattematerjalina kasutatava kipsplaadi mudeldamise tulemusi (joonis 3.10) analüüsid on näha, et nii madala tiheduse kui väikeste koguste tõttu on kipsplaadist põhjustatud summaarne doosikiirus rohkem kui 10 korda madalam standardruumi seintest. Selleks, et kipsplaadist tingitud kiirgus põhjustaks 1 mSv/a viitetaseme ületamist, peaks plaadis esinema seaduses defineeritud väljaarvamistasemetest (^{238}U rida 1 kBq/kg, ^{232}Th rida 1 kBq/kg ja ^{40}K 10 kBq/kg) [34] ligi 7 korda kõrgemad aktiivsuskontsentratsioonid. Nii kõrgete aktiivsuskontsentratsioonidega materjale klassifitseeritakse radioaktiivse aineks ja nõutakse kiirgustegevusluba.



Joonis 3.10: Kipsplaadi ja soojustuse massid ja doosikoefitsiendid D/C (nGy kg h⁻¹ Bq⁻¹) ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.

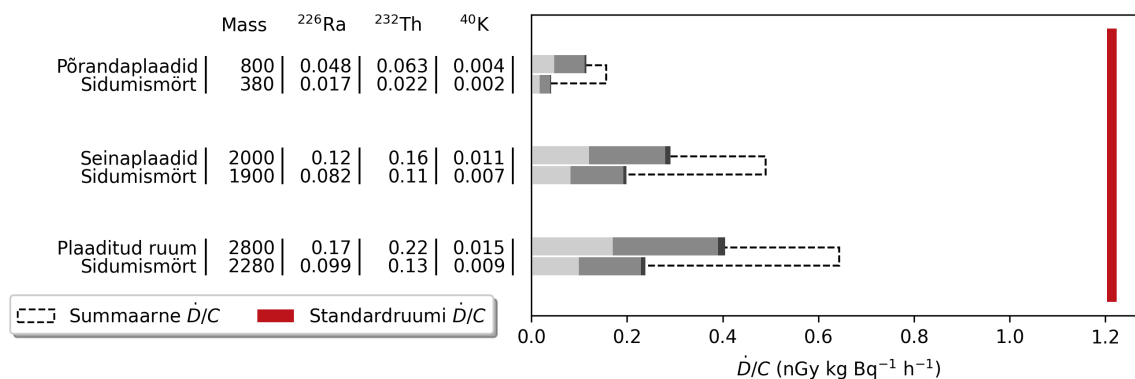
Kipsplaadist veelgi madalamat doosikiirust on näha soojustusmaterjali kasutamisel. Kui sisemise soojustuse kasutamine toob endaga kaasa kipsplaadist ligi poole madalama doosikiiruse, siis välimisest soojustusmaterjalist tingitud kiirgus neeldub praktiliselt täielikult välisseintes ja selle panus siseruumi doosi on tühine.

Kokkuvõttes võib järeldada, et nii kipsplaadilaadsete pinnakatte- kui soojustusmaterjalide reguleerimine γ -kiirguse seisukohast pole vajalik, kuna looduslike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid, mis jäävad allapoole väljaarvamistaset, ei ole võimelised põhjustama ehitusmaterjali realistlikus kasutusviisis siseruumis viibivale inimesele märkimisväärset doosi.

3.2.4 Katteplaadid

Keraamiliste ja kivist katteplaatide kasutamisel on doosikiirused (joonis 3.11) standardruumi seintega võrreldes olulisemalt madalamad, kuid doosikiirus sõltub suurel määral plaatide

kasutusviisist. Põrandaplaadid põhjustavad ligi 2 korda madalama doosikiiruse kui seinaplaadid. Reeglina on plaatide kasutamisest tingitud doosikiirus piisavalt kõrge, et selle arvestamine ehitusmaterjalidest põhjustatud doosi hindamisel on oluline.

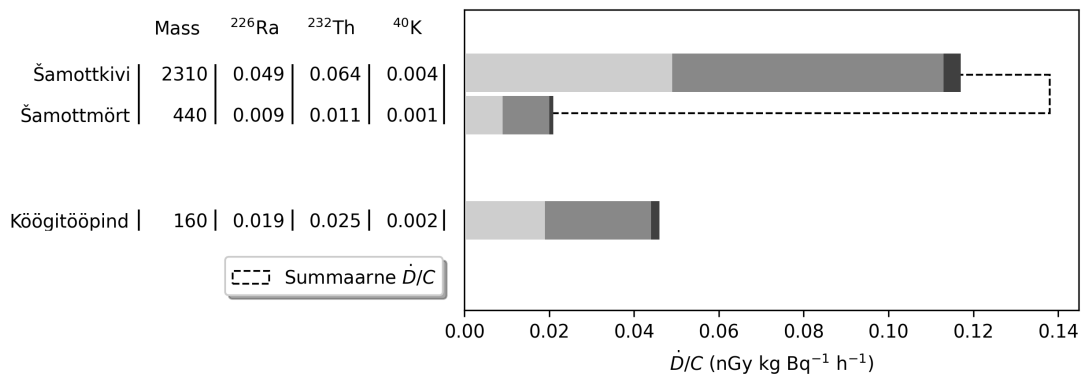


Joonis 3.11: Katteplaatide ja sidumismörtide doosikoeffitsiendid D/C ($\text{nGy kg h}^{-1} \text{Bq}^{-1}$) ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.

Kuna katteplaate kasutatakse pinnakatematerjalina, siis on ruumis lisaks plaatidele alati ka põhimaterjalidest tingitud doosikiiruse komponent, mistõttu on oht plaatide mittereguleerimisel summaarseid doosikiirusi alahinnata. Käesoleva töö raames tehtud modelleerimistulemused näitavad, et osades riikides kasutatav lahendus suurendada katematerjalide puhul I-indeksi lubatud väärtust mitmekordselt [14, 15], ei pruugi olla hea lahendus. Kui kokku liita nii põhimaterjali kui katematerjali panus doosikiirusesse, võib see kõrgema radionukliidide sisaldusega ehitusmaterjalide puhul viia olukorrani, kus ületatakse aastase doosi viitetaset 1 mSv/a.

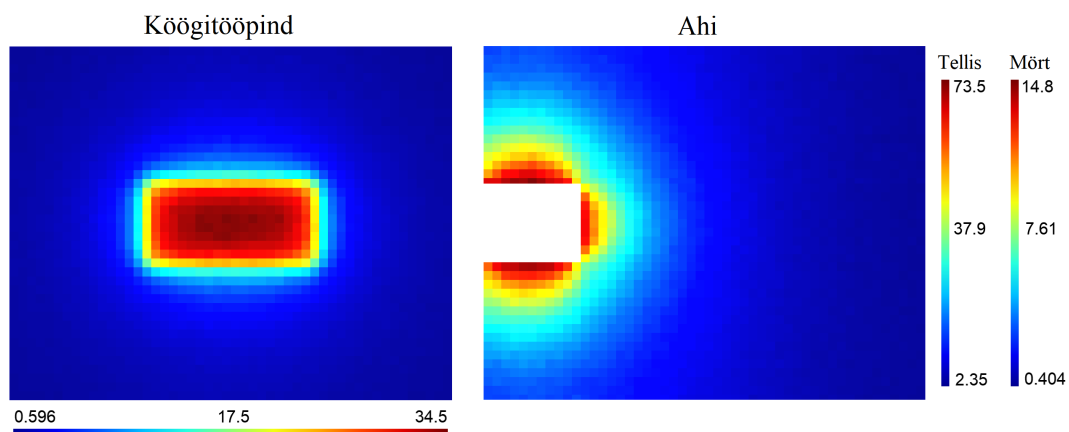
Analoogselt ehitusplokkide ja tellistega saab kasutada ka plaatide fikseerimisel sidumismörti. Sidumismördist tingitud doosikiirus on madalam plaatide enda kiirgusest, kuid siiski reeglina samas suurusjärgus. Võrreldes varasemalt kirjeldatud mördi kasutusviisidega, on plaatide ja neid kandava pinna vahelise mördi doosikiirus allika massiühiku kohta kõrgem. Plaatide sidumismört põhjustas tuhaplokkide vahelisest mördist keskmiselt 16% kõrgema doosikiiruse.

3.2.5 Ahi ja köögi tööpind



Joonis 3.12: Šamottkivi, -mördi ja köögi tööpinna mass ja doosikoeffitsiendid D/C (nGy kg h⁻¹ Bq⁻¹) ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.

Kui ahjust tingitud doosikiirus (joonis 3.12) on võrreldav põrandaplaatidega, siis köögitööpinna doosikiirus on nii ahjust kui põrandaplaatidest rohkem kui kaks korda väiksem. Erinevalt peatükkides 3.2.1-3.2.4 kirjeldatud ehitusmaterjalidest, kus doosikiiruse jaotused olid analoogsed peatükis 3.1.1 kirjeldatud doosikiiruse jaotustega, käituvad detailmaterjalid palju lokaliseeritumate allikatena, mistõttu modelleeriti mõlema objekti korral doosikiiruse jaotust ruumis (joonis 3.13). Doosikiiruse jaotuse arvutamisel kasutati allikat, mille I-indeks oleks võrdne 1-ga (tabel 2.1).

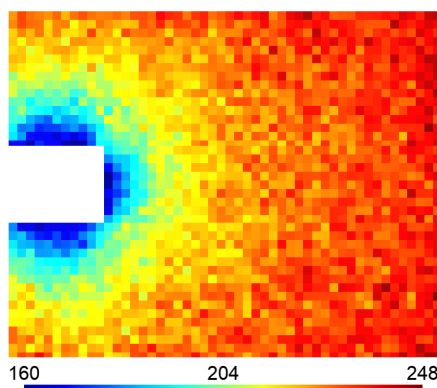


Joonis 3.13: Köögi tööpinnast ja ahjust tingitud neeldumiskoosi kiiruse (nGy/h) jaotused siseruumi õhus I-indeksiga 1 allika korral.

On näha, et detailmaterjalidest tingitud doosikiirus on kõrge vaid detaili vahetus läheduses. Aastase viitetaseme ületamiseks on tarvis kõrgemat doosikiirust kui 210 nGy/h, millest võib

järeldada, et kumbki detail problemaatilist kiirguse taset ei tekita. Siinkohal võib välja tuua, et kõõgi tööpinnal erakordselt kõrge doosikiirus on tingitud tasapinna asetusest, mis on vaid mõne sentimeetri kaugusel õhukihist, kus doosi hinnati. Sellest tulenevalt on ka kõõgi tööpinnast tingitud doosikiirus palju kõrgem kui muidu võiks ootada mõnesaja kilogrammise massiga ehitusmaterjalilt. Kuna reeglina ei veedeta pikki perioode kõõgi tööpinnal, siis nii tööpind kui ka sellega analoogsed detailmaterjalid endast kõrgendatud radionukliidide sisalduse korral ohtu ei kujuta.

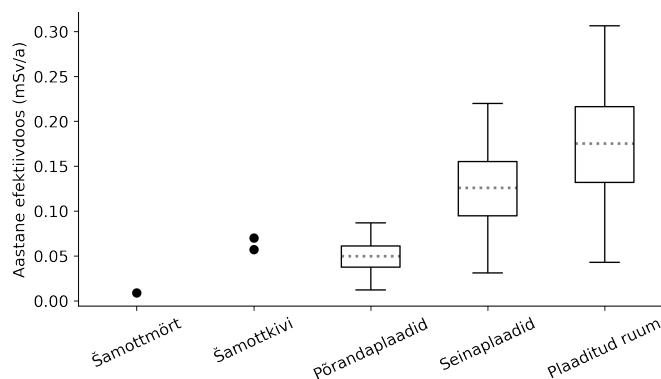
Kui võrrelda ahju ehitamisel kasutatud šamottmörti varasemalt kirjeldatud mördi kasutusviisidega, siis šamottmördi doosikiirus allika massiühiku kohta on võrreldav augulise ploki täitemördi doosikiirusega (2% kõrgem). Lisaks võib välja tuua ahju võime varjestada ülejäänud ruumi materjalidest tingitud kiirgust. Ümbritseva betoonkarkassi doosikiiruse jaotus allika korral, mille I-indeks on 1 (tabel 2.1), on välja toodud joonisel 3.14. Arvutustest selgus, et kui ahju koostisosad olid sarnase aktiivsuskontsentratsiooniga nagu ruumi karkass, siis doosikiiruse kasvu asemel, vähendas ahju lisamine ruumi keskmist doosikiirust 7,4% võrra.



Joonis 3.14: Ahju materjali varjestuse mõju betoonkarkassist tingitud neeldumiskoosi kiiruse (nGy/h) jaotusele.

3.2.6 Eesti turul müüdavate ehitusmaterjalide kiirgusdoosid

Ehitusmaterjali kasutusviisi doosikiiruste mudeldamise tulemusi sai hinnata Eesti turul tuvastatud potentsiaalselt kiirgusohtlike ehitusmaterjalide kontekstis. Joonisel 3.15 kirjeldatud aastaste efektiivdooside arvutamiseks kasutati Koch et al. (2020) [1] mõõdetud aktiivsuskontsentratsioone ja peatükis 3.2.4 väljaarvutatud doosikiirusi ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta.



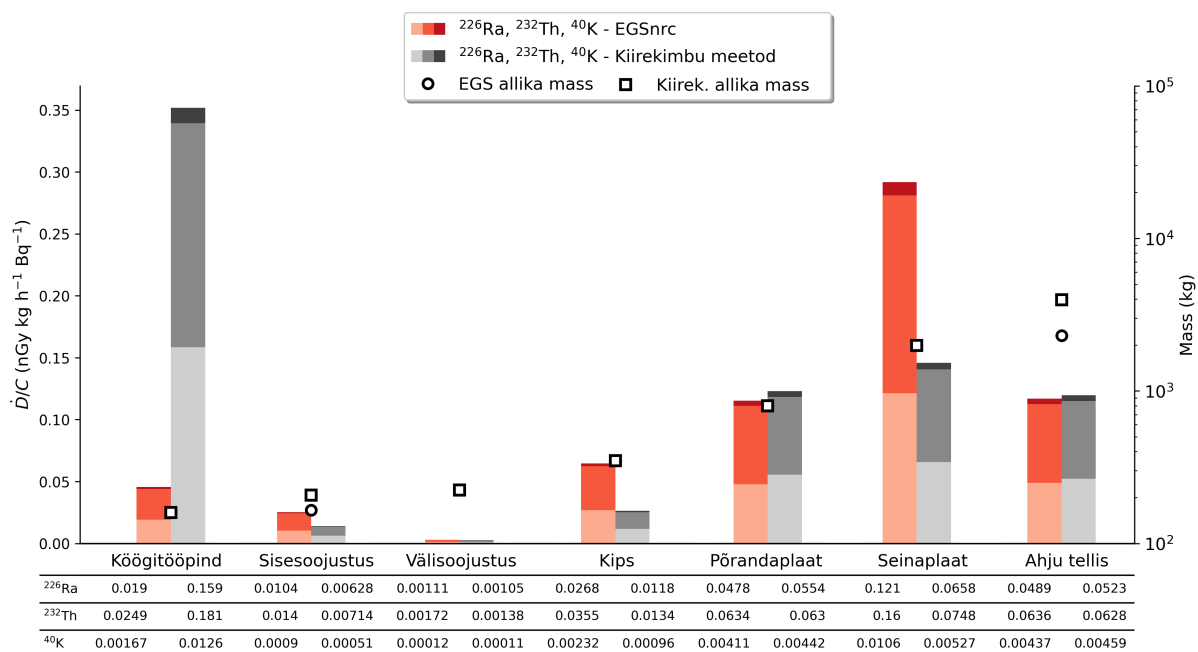
Joonis 3.15: Koch et al. (2020) [1] poolt mõõdetud šamottkivi ja -mördi ning plaatide ruumi keskmise neeldumisdoosi kiiruse hinnangud.

Šamottmördi korral mõõdeti ühte materjali, šamottkivi korral kahte materjali ja erinevate katteplaatide (looduskivi-, keraamilised- kui kiltkiviplaadid) korral 36 materjali. Katteplaatide aastase efektiivdoosi keskmine väärtus kolme erineva kasutusviisi korral on joonisel 3.15 välja toodud punktiirjoonega. Vurrud kirjeldavad kõige väiksema ja suurema I-indeksiga plaate, mis vastavad mõõdetud materjalide piirjuhtudele. Kasti servad vastavad esimesele ja kolmandale kvartiilile.

Analüüs näitas, et ka kõige kõrgema aktiivsuskontsentratsiooni materjali puhul, milleks oli Tai keraamiline plaat ($I = 1,3$), ei ületanud efektiivdoosi kiirus $0,31 \text{ mSv/a}$ plaaditud ruumi lähenduses viitetaset 1 mSv/a . Mõõdetud plaatide doosikiirustes oli näha väga suurt varieeruvust, kuid võib järeldada, et mõõdetud materjalide kasutamise piiramine välise kiiritusriski tõttu ei ole põhjendatud.

3.3 EGSnrc võrdlus analüütilise mudeliga

Kui kiirguslevi mudeleid on varasemalt omavahel võrreldud põhimaterjalide kontekstis [23], siis pinnakatte- ja detailmaterjalide korral võrdlused puuduvad. Käesolevas töös tehti võrdlus Markkaneni mudeli (ehk kiirekimbu meetodi) ja Monte Carlo meetodile toetuva EGSnrc tarkvara vahel. Võrdluse aluseks võeti peatükis 3.2 kirjeldatud materjalid. Tulemused on välja toodud graafikul 3.16.



Joonis 3.16: EGSnrc ja kiirekimbu mudeli vaheline võrdlus pinnakatte- ja detailmaterjalide näitel. Joonise all olevas tabelis on välja toodud neeldumisdoosi kiirused ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni kohta ($\text{nGy kg h}^{-1} \text{Bq}^{-1}$).

On näha, et kahe meetodi suurim lahkeli esineb köögi tööpinna korral. Monte Carlo meetod ülehindab siin doosikiirust, sest osa õhukihist, milles doosikiirust hinnatakse, asub kohe köögi tööpinna kohal. Monte Carlo meetodi puhul keskmistatakse küll doosikiirused üle ruumi, aga sellegipoolest jääb doosikiirus konservatiivselt ülehinnatuks, sest inimesed ei viibi reaalsuses köögi tasapinna kohal, vaid selle kõrval. Kiirekimbu meetod aga hindab doosikiirust veel suurusjärgu kõrgemalt. Selle põhjuseks on asjaolu, et Markkaneni mudel hindab doosikiirust ainult ruumi keskpunktis, mis juhtumisi asub köögi tööpinna keskel või vahetus läheduses. Lõpptulemust ei keskmistata üle ruumi, kuigi doosikiirused ülejäänud ruumis on oluliselt madalamad.

Samuti on suuri erinevusi näha sisesoojustuse, kipsplaadi ja seinaplaadi doosikiiruse hinnangute juures. Kõigi korral on tegemist seinamaterjalidega, mistõttu leiab kiirekimbu meetodi korral, vastupidiselt köögi tööpinnaga, aset doosikiiruse alahindamine, kuna seintest tingitud kiirguse korral moodustub doosikiiruse miinimum ruumi keskele. Lisaks võib täheldada, et kiirekimbu meetodil on kalduvus alahinnata doosi madala tihedusega ja õhukeste materjalide korral. Üheks põhjuseks võib tuua üldkasutatavate akumulatsioonifaktorite mittesobivus, mis on mõeldud kõrge tiheduse ja paksusega põhimaterjalide jaoks.

Põrandaplaatide ja ahju telliste korral andsid kaks meetodit hästi kokkulangevaid tulemusi. Põrandaplaatide korral hindas esmalt kiirekimbu meetod doosikiirusi üle, kuna ruumi keskel

esineb põrandamaterjalide rakenduse doosikiiruse maksimum, kuid materjali paksusest tingitud alahindamine tasakaalustas varasema ülehinnangu ära. Ahju korral on tegemist aga piisavalt paksu struktuuriga, et see on sarnane põhimaterjalide paksusega. Ahju detailne siseehitus ei mõjuta oluliselt doosikiirusi, kuna ruumi õhku jõudev kiirgus on peamiselt pärit välimistest materjalikihtidest.

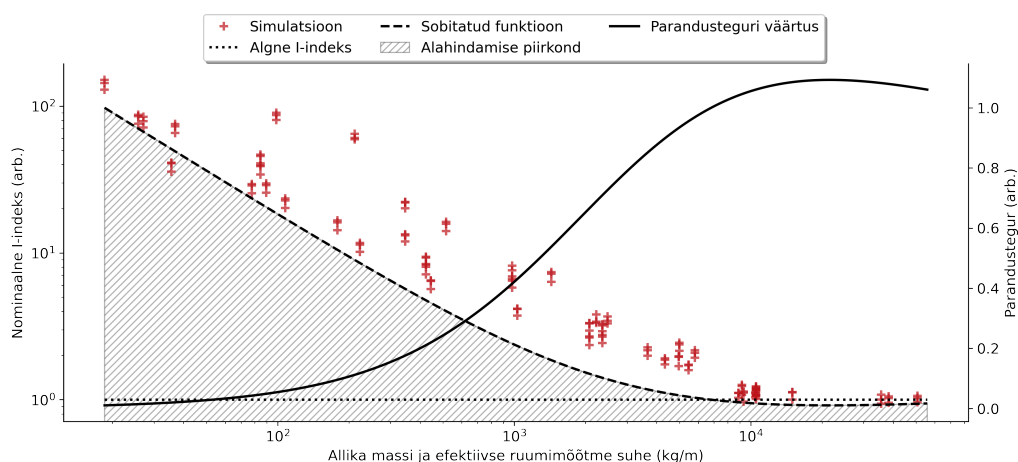
3.4 I-indeksi kasutamine ehitusmaterjalide kiirgusohutuse hindamisel

Neeldumisdoosi kiirus õhus võimaldab füüsiliselt kvantifitseerida ehitusmaterjalidest põhjustatud gammakiirgust. Ehitusmaterjalidest pärineva ioniseeriva kiirgusega seonduva terviseriski hindamiseks tuleb kasutada efektiivdoosi, kuna seadusandluses esitatud viitetase on defineeritud efektiivdoosi ühikutes. Hinnangute lihtsustamiseks on kasutusele võetud I-indeks. Selleks, et hinnata I-indeksi konservatiivsust, teisendati ehitusmaterjalidest põhjustatud ruumi keskmised neeldumisdoosi kiirused efektiivdoosi kiirusteks ja radionukliidi kaupa arvatati välja vajalik aktiivsuskontsentratsioon, mille korral oleks 1 mSv/a viitetase ületatud. Seejärel, kasutades I-indeksi definitsiooni, konverteeriti maksimaalsed aktiivsuskontsentratsioonid nominaalseteks I-indeksi väärtusteks, mille ületamisel leiab aset ka efektiivdoosi 1 mSv/a ületamine.

Seadusandluse tasandil pole mõtet kehtestada nõuet hinnata detailselt ehitusmaterjalide kiirgusohutlikkust, kuna vastavate arvutuste läbiviimine eeldaks vaevrohket mudeldamist, mis võtab arvesse konkreetset ehitusprojekti. See poleks sugugi proportsionaalne hinnatava riski suurusega. Kiirgusohutikkuse hindamise meetod peab olema piisavalt lihtne, et tootja sellega toime tuleks (saab aru, milliseid analüüse ta tellima peab). Seega on lihtsustatud kiirgusohu hindamise vahendid nagu I-indeks vajalikud tööriistad, kuid nende rakendamisel ei tohi unustada, et need on vaid indikatiivse iseloomuga.

I-indeksi täpsuse parandamiseks otsustati käesoleva töö raames taandada mudeli geomeetria allika massi ja ruumi pindala ruutjuure (efektiivse ruumimõõtme) suhteks. Allika mass on võrdeline aktiivsusega ja piiratud mõõtmetega ruum kombinatsioonis materjali omaneeldumisest tingitud varjestusefektiga tähendab, et massi kasvuga on oodata doosikiiruse piirväärtusele lähenev funktsionaalne sõltuvus. Massi vähenedes aga doosikiirused vähenevad. Materjali kasutusviisist lähtuvalt saab anda hinnangu, milline on konkreetse ehitusmaterjali mass ruumi pindala kohta, mille näidisväärtused on 20 m² ruumi jaoks välja toodud peatükis 3.2. Nominaalse I-indeksi sõltuvus allika massist ja efektiivsest ruumimõõtmest on välja toodud log-log graafikuga joonisel 3.17.

Kuna ehitusmaterjalidest tingitud väliskiirguse käsitus eeldab materjalide reguleerimist välise taustkiirguse kontekstis, siis nominaalse I-indeksi arvutamisel liideti 1 mSv/a viitetasemele ehitusmaterjalide või ruumi poolt varjestatud kiirgusfoon (kuni 45 nGy/h ehk 0.22 mSv/a). Kõrgema massiga ehitusmaterjalid varjestavad suurema hulga välisest taustkiirgusest. Mõttekäigu elluviimiseks arvutati välja iga ruumi pindala kohta standardruumi allikale vastav mass, mis on võimeline varjestama suurema osa pinnasest tulenevast kiirgusest. Seejärel kasutati ehitusmaterjali reaalsele kasutusviisile vastava massi ja standardruumi allikale vastava massi suhet, et hinnata lineaarselt rakendusele omistavat varjestusvõimet.



Joonis 3.17: Nominaalse I-indeksi sõltuvus allika massi ja efektiivse ruumimõõtmest. Mudelarvutuse punktid koos sobitatud astmefunktsiooniga ja parandusteguri väärtused.

Joonisel 3.17 on näha, et kuigi andmepunktide hulgas on arusaadavalt üsna suur varieeruvus, kuna kompleksete mudelite geomeetriaid ei ole võimalik perfektselt kirjeldada vaid ühe muutujaga, saab funktsionaalset sõltuvust lähendada astmefunktsiooniga, mis läheneb muutuja suurtel väärtustel konstantsele piirväärtusele. Piirväärtuseks ongi I-indeks oma algse definitsiooni kohaselt, mille konservatiivne väärtus kirjeldab ehitusmaterjali rakendust standardruumi geomeetrias. Ruumi seinte, lae ja põranda paksendamine aga endaga suurt doosikiirguse muutust kaasa ei too, kuna materjal on võimeline ise varjestama radionukliidide absoluutkoguse suurenemisest tingitud kiirgusvoo.

$$E_I(M, S) = \left(\frac{1800\sqrt{S}}{M} + \frac{1}{12} \ln \frac{M}{\sqrt{S}} \right)^{-1} \cdot I \quad (3.2)$$

Joonisel 3.17 kuvatud parandustegurit kasutav funktsioon on välja toodud valemiga 3.2. Funktsiooni kasutamiseks tuleb hinnata ruumi pindala S (m²), kiirgava materjali massi ruumis

M (kg) ja materjali I-indeksi väärtust I , et hinnata ruumi aastast doosikiirust E_I (mSv/a).

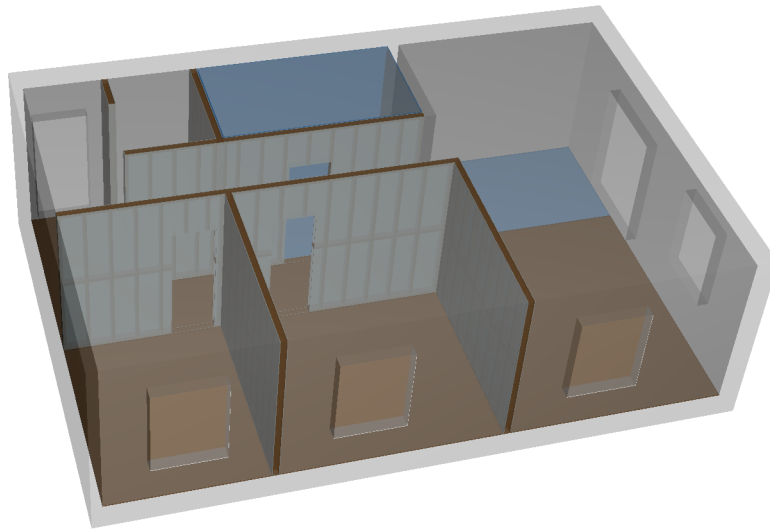
Tegemist pole andmetele kõige paremini sobitatud funktsiooniga, vaid parandustegur võtab arvesse ka konservatiivsuse vajadust, mille kohaselt peaks olema väljapakutud parandustega I-indeks potentsiaalseks filtriks kiirgusohtlikele ehitusmaterjalidele. Graafikul viirutatud alasse kuuluvate andmepunktide korral toimub doosi alahindamine, viirutamata alas aga ülehindamine. Hetkeseisuga on näha vaid ühte andmepunktide gruppi, mille puhul võtab aset valemiga 3.2 doosi alahindamine. Selleks on köögi tööpinna mudel, mille asetus doosi piirkonna lähedal tekitab kõrgeid doosiväärtusi, mis realistlikult endas kõrgendatud ohuolukorda ei kujuta.

Kuna väljapakutud meetod pole niivõrd konservatiivne nagu I-indeks, siis läviväärtuse 1 kasutamisel ruumis, kus valemit on rakendatud mitme erineva materjali jaoks, tooks kaasa doosiviitetaseme ületamise. Sellest tulenevalt on tarvis seada uued läviväärtused valemile 3.2, mis tagaksid, et doosipiirmäära ei ületata. Kui arvestada ehitusmaterjalide omavahelist varjestavat mõju, on soovitatav kasutada põhimaterjalide läviväärtuseks 1 ja pinnakatte- ning detailmaterjalide jaoks 0,5. Võrreldes traditsioonilise I-indeksiga oleks lubatud aktiivsuskontsentratsioonid põhimaterjalides reeglina mõne protsendi võrra madalamad, aga pinnakatte- ja detailmaterjalid kuni mitu korda kõrgemad. See lähenemine võimaldaks adekvaatsemalt hinnata varasemate uuringute käigus mõõdetud materjalide kiirgusohtlikkust looduslike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide põhjal.

3.5 Ehitusmaterjalidest tingitud doosikiiruse terviklik käsitus

Ehitusmaterjalide poolt doosikiiruste arvutamine standardruumi sarnases ruumis võimaldab anda teatud hinnangu ehitusmaterjalide kiirgusohtlikkusele, kuid standardruumi geomeetria ei vasta ühelegi realistlikule elamule. Enamik elamuid koosnevad erinevatest tubadest, mille seinad, põrandad ja laed on vastavalt vajadusele ehitatud erinevatest materjalidest. Materjalide omavaheline mõju varjestuse näol võib aga muuta doosikiirusi märgatavalt.

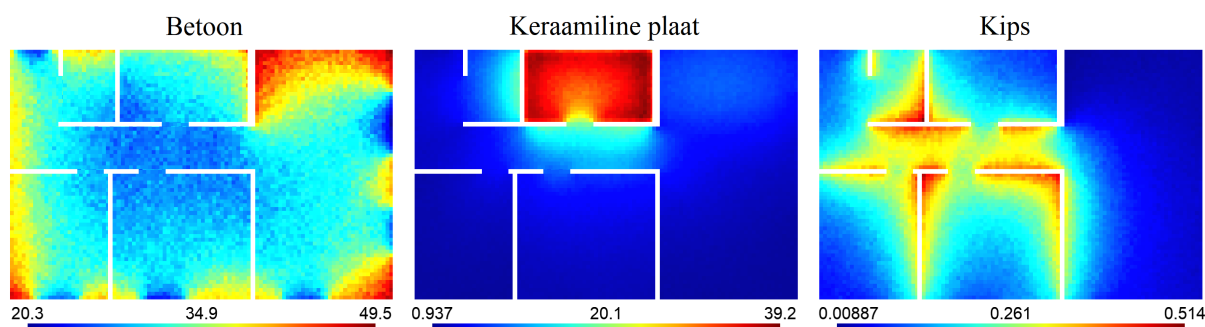
Mudeldades tüüpilist eluaset Eesti kontekstis on võimalik hinnata elaniku kiirgusdoosi ehitusmaterjalidest realistlikus kontekstis. Näidiselamu aluseks võeti korter, millel on 3 eluruumi, garderoob, koridor, köök ja vannituba. Korteri välisseinad, põrand ja lagi on valatud betoonist, vaheseinad puitkarkassi peale kinnitatud kipsplaadist. Köögi ja vannitoa põrandad on kaetud keraamilise plaadiga, ülejäänud korteril puitlauaga. Vannitoa seinad on samuti plaaditud ning köögi ja vannitoa vahel on üks toetav betoonsein. Korter on kuvatud joonisel 3.18.



Joonis 3.18: EGSnrc-s doosihinnanguteks valmistatud tüüpiline 3-toaline 65 m² elupind.

Korteri geometriaga tehti kolm analüüsi, esmalt vaadatati realistlikku olukorda, kus ehitusmaterjalide aktiivsuskontsentratsioonid on Eesti keskmiste väärtustega (tabel 2.1. Seejärel pandi nii I-indeks kui ka käesoleva töö raames väljapakutud reguleerimise meetod (valem 3.2) testile mõlema vahendi poolt lubatud maksimaalsete aktiivsuskontsentratsioonidega. Eesti keskmiste materjalide neeldumiskoosi kiiruse jaotused ehitusmaterjali kaupa on välja toodud joonisel 3.19.

On näha, et põhilise panuse annab betoon. Betooni doosikiirused on kõige kõrgemad köögis, mida ümbritseb kolm betoonist seina. Globaalselt kõige madalamad punktid asuvad uste ja akente juures, kuid lokaalne miinimum tekib ka korteri keskele. Üllataval kombel ei mõjuta vaheseinad olulisel määral doosikiiruse jaotuse kujunemist. See-eest varjestavad betoonseintest tingitud γ -kiirgust vannitoa keraamilised plaadid. Viimasena tasub märkida, et kuigi mudelilamu väliskarkass moodustab standardruumi sarnase allika (allikaks sein, põrand ja lagi), siis doosikiiruse maksimumi ja miinimumi vahe on üle kahe korra.



Joonis 3.19: Betoonist, plaatidest ja kipsist tingitud doosikiiruse jaotused Eesti keskmiste materjalide korral elupinna siseõhus.

Keraamilistest plaatidest tingitud doosikiirus on koondatud lokaalselt vannitoa lähedusse. Kui osa kiirgusest lekib ka läbi vaheseinte garderoobi ja koridori, siis köögi ja vannitoa vaheline betoonsein märgatavas koguses läbi ei lase. Plaaditud köögi põranda põhjustatud doosikiirus osutub võrreldes vannitoaga väikeseks.

Lisaks katteplaatidele vaadati ka vaheseinade ehitamisel kasutatud kipsi panust. Võrreldes eelmise kahe ehitusmaterjaliga osutus kipsist põhjustatud doosikiirus väikeseks. Doosikiiruse maksimumid kujunesid seinte lähedale, kuid maksimumi väärtused olid mitukümmend korda madalamad betoonallika miinimumväärtusest.

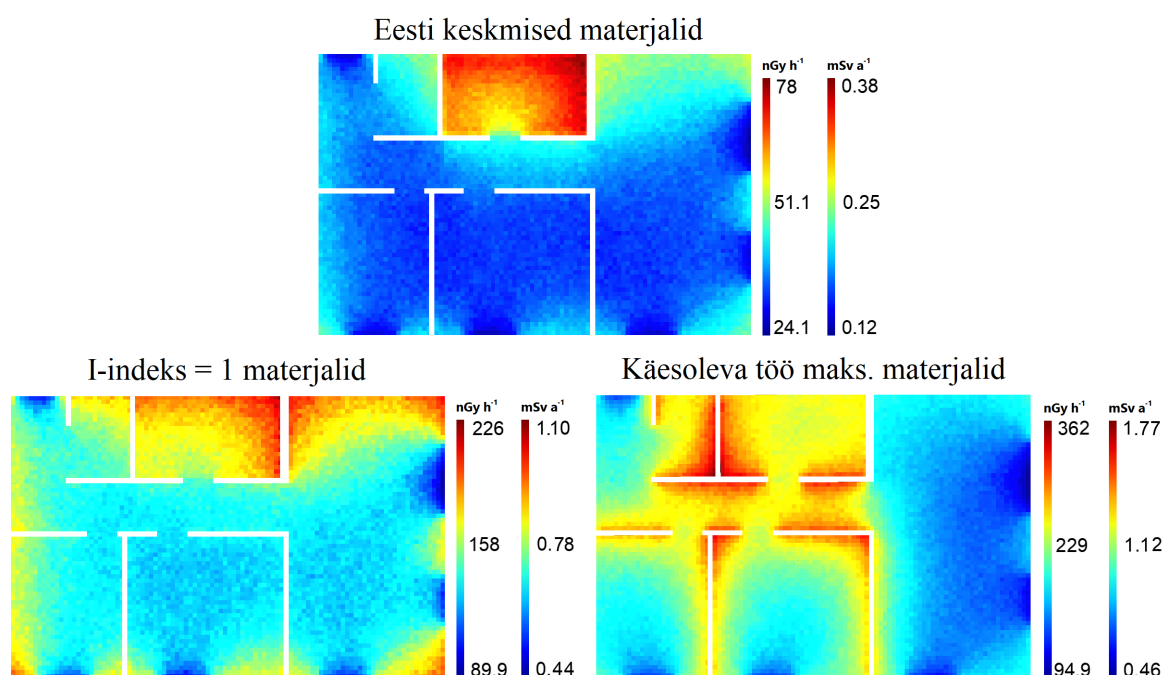
Ehitusmaterjalide summeeritud doosikiirus terve elupinna piires on välja toodud joonisel 3.20. Eestis kasutatavate ehitusmaterjalide keskmiste aktiivsuskontsentratsioonide korral tekib doosikiirus maksimum valdavalt vannituppa ning kööki. Teistes eluruumides on doosikiirused madalad. Mudeldamisel kasutatud ehitusmaterjalide I-indeksid ja keskmine efektiivdoos korteris on toodud tabelis 3.4. Korteris keskmine efektiivdoos on väike, suuresti on see tingitud Eestis mõõdetud betooni radionukliidide sisaldusest, mis on ligi poole väiksem Euroopa Liidu keskmisest. Euroopa Liidu keskmise betooni [28] korral oleks keskmine efektiivdoos 0,4 mSv/a ehk ligi kaks korda kõrgem. Kui regulatsiooni kohaselt keskmisest efektiivdoosist veel maha lahutada pinnasest tingitud väline kiirgusfoon, mis jääb siseruumis viibival inimesel ehitusmaterjalide varjestava mõju tõttu saamata (0,22 mSv/a), siis selgub, et siseruumis viibiva inimese efektiivdoos võib isegi olla madalam, kui väljaspool ehitist.

Tabel 3.3: Valemi 3.2 maksimaalselt lubatud aktiivsuskontsentratsioonid (Bq/kg) betooni, katteplaatide ja kipsi näitel 20 m² ruumi korral.

Beton			Plaadid			Kips		
²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
95	65	950	160	105	1600	1020	680	10200

Tabel 3.4: Mudeldamisel kasutatud ehitusmaterjalide I-indeksid ja efektiivdoosid mudelkorteris kolme analüüsistsenaariumi korral.

	Eesti keskmised materjalid			I-indeks = 1			Reguleerimismeetodi (valem 3.2) max väärtused		
	Betoon	Plaadid	Kips	Betoon	Plaadid	Kips	Betoon	Plaadid	Kips
I-indeks	0,24	0,78	0,02	1	1	1	0,95	1,6	10,2
Efektiivdoos	0.20 mSv/a			0.73 mSv/a			1.05 mSv/a		



Joonis 3.20: Doosikiiruste võrdlus mudelkorteris siseruumi õhus, kui ruumides on kasutatud Eesti keskmiste aktiivsuskontsentratsioonidega ehitusmaterjale, I-indeksi väärtusele 1 vastavaid materjale ja käesoleva töö raames väljapakutud reguleerimismeetodi maksimaalsetele aktiivsuskontsentratsioonidele vastavad materjale.

Selleks, et võrrelda nii I-indeksi kui ka valemi 3.2 (materjali massid peaktükist 3.2) rakendatavust ehitusmaterjalide aktiivsuskontsentratsioonide optimeerimisel läbi siseruumi doosikiiruste hinnangute, konstrueeriti mõlema meetodi lubatud maksimaalsetest aktiivsuskontsentratsioonidest allikad, mis võiksid põhjustada 1 mSv/a (viidetase) efektiivdoosi siseruumis. I-indeksi allika aktiivsuskontsentratsioonid on välja toodud tabelis 2.1 ja valemi 3.2 tabelis 3.3. Tulemustest selgus, et I-indeksi kasutamine ehitusmaterjalide aktiivsuskontsentratsioonide optimeerimisel läbi doosikiiruste hinnangute on piiratud efektiivsusega. I-indeksile 1 vastavate materjalide poolt põhjustatud maksimaalne efektiivdoos

ulatub vaid 0,51 mSv/a-ni (peale fooni mahalahutamist).

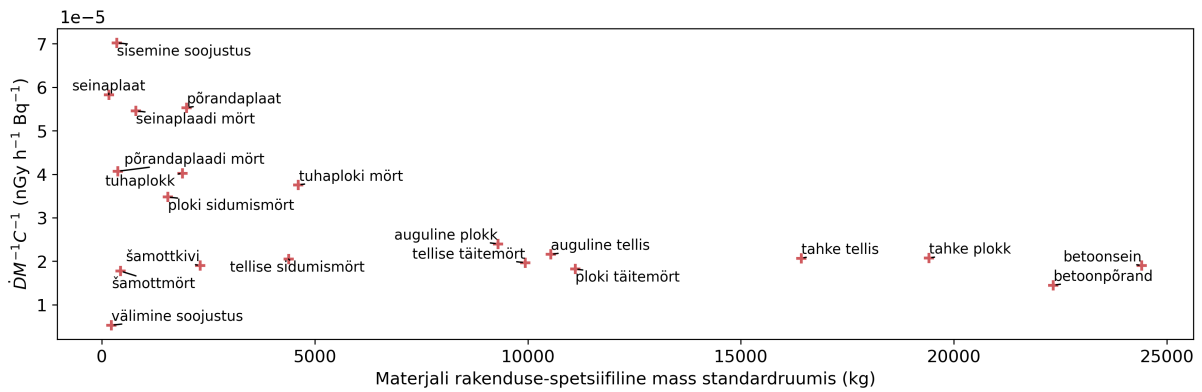
Valemi 3.2 rakendamine aga andis keskmiseks efektiivdoosiks 0,83 mSv/a (peale fooni mahalahutamist). Tegemist on siiski konservatiivse hinnanguga, kuid võimaldab täpsemalt hinnata aastast efektiivdoosi ja selle läbi ka paremini optimeerida materjalide aktiivsuskontsentratsioone. Valemi kasutamine ei vii olukorrani, kus doosikiiruse viitetaset 1 mSv/a ületatakse, kuid see võimaldab kasutusele võtta märksa kõrgema radionukliidide sisaldusega ehitusmaterjale.

Kõigi kolme analüüsitud stsenaariumi korral kujunesid doosikiiruse maksimumid välja vannitoas ja köögis, kus elanikud ei viibi reeglina pikalt, ja miinimumid tubades, kus magatakse ning puhatakse. Tegemist on kiirguskaitse seisukohalt parima olukorraga, kuna kõrge doosikiirusega piirkondades veedetav aeg on ilma muutusi sissetoomata juba optimeeritud.

3.6 Tööstusjääkide taaskasutamiseks sobilikud ehitusmaterjalid

Tööstusjääkide kasutamine ehitusmaterjalide valmistamisel võib suurendada radionukliidide aktiivsuskontsentratsioone ehitusmaterjalis. Samas aitab tööstusjääkide kasutamine arendada ringmajandust, vähendada ressursikulu ja muuta ehitusmaterjalide tööstust keskkonnasõbralikumaks. Selleks, et ringmajandusest tingitud tegevus ei põhjustaks ehitusmaterjalidest põhjustatud doosi viitetaseme 1 mSv/a ületamist, hinnati käesolevas töös, milliseid materjale saaks valmistada kõrgendatud radionukliidide sisaldusega jääkidest, et doosi viitetaseme ületamist vältida.

Materjalide sobilikkuse hindamiseks arvutati välja doosikiirused ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni ja massi kohta. Kuna ^{226}Ra , ^{232}Th ja ^{40}K doosikiiruste suhted olid materjalide kasutusviisi võrdluses sarnased, siis tulemuste visualiseerimisel kuvati kolme radionukliidi keskmine. Doosikiirused on välja toodud graafikul 3.21.



Joonis 3.21: Neeldumisdoosi kiirus ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni ja massi kohta erinevate ehitusmaterjalide kasutusviiside näitel.

Kõige kõrgema doosikiiruse ühikulise aktiivsuskontsentratsiooni ja massi kohta annab sisemine soojustus. Madala tiheduse tõttu on materjali omaneeldumisvõime väga väike. Erinevalt kõrge tihedusega materjalidest pääseb suur osa tekkinud kiirgusest ka materjalist välja. See-eest on materjali tihedus madal ja füüsiliselt materjali hulk ruumis piiratud, mistõttu kiirgusohklikku olukorda ei teki. Analoogselt on tööstusjääkide kehva kasutuskohana ka erinevad pinnakattematerjalid, mis asetatakse ruumi pörandale ja seintele õhukese kihina, selle käigus minimeerides materjali omaneeldumisvõimet.

Vastanduvalt annab välimine soojustus käesolevas kontekstis kõige madalama doosikiiruse. Selle omaneeldumisvõime on sisemise soojustusega sama, kuid kõrge tihedusega välisseina varjestuse tõttu on välise soojustuse panus siseruumi doosikiirusesse tühine. Kõrge radionukliidide sisaldusega soojustust saaks kasutada näiteks korterelamute ülemiste korruste soojustamisel, kus vahemaa maapinnaga on piisavalt suur, et piirata välise fooni tõusu ning ruumi siseõhu ja soojustuse vahel on kõrge tihedusega paks välissein.

Lisaks välisele soojustusele paistis võimaliku jääkmaterjalide kasutamise kohana välja ka betoonpörand. Betoonpörandi valmistamiseks kulub palju materjali, mis võimaldab taaskasutada rohkem jääke, kuid võrreldes seintega panustab see ruumi doosikiirusesse massiühiku kohta vähem. Betoonpörandi järel saab tööstusjääkide sobiliku kasutuskohana välja tuua ka ploki täitemördi, šamottmördi ja -kivi, mida on peatükis 3.2 põhjalikult analüüsitud.

Kokkuvõte

Käesoleva töö raames hinnati ehitusmaterjalidest tingitud väliskiiritust siseruumis viibivale inimesele. Lisaks materjalidest tingitud γ -kiirguse modelleerimisel, tehti täiendavad hinnangud nii betoonist tingitud β -kiirgusele kui ka pinnasest tingitud γ -kiirgusele. Ehitusmaterjalide kiiritusohklikkuse põhjalikuks uurimiseks loodi Monte Carlo tarkvara EGSnrc abil materjalide kasutusviisile vastavad mudeli geomeetriad. Neid võrreldi konservatiivse standardruumi geomeetriaga nii Monte Carlo kui analüütilise Markkaneni meetodi abil arvutatud doosikiirustega.

Detailsete geomeetriae loomiseks koostati abistav arvutiprogramm, mille peamine eesmärk oli teisendada skemaatilisi joonisefaile mudeligeomeetriaeks. Ehitusmaterjalide realistlike kasutusviise mudeldades selgus, et kõige suuremat doosikiirust põhjustavad väliskarkassi ehitamiseks kasutatavad materjalid nagu näiteks ehitusplokid ja telliskivid. Tuhaplokkide kasutamine seinte ehitamisel vähendas sarnaste aktiivsuskontsentratsioonide juures siseruumis viibiva inimese aastast efektiivdoosi ligi poole võrra.

Kipsplaatidest ja soojustusmaterjalist tingitud doosikiirused osutusid piisavalt madalaks, et nende reguleerimine γ -kiirguse seisukohast pole vajalik. Materjalide looduslike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid, mis jäävad allapoole väljaarvamistaset, ei ole võimelised põhjustama ehitusmaterjali realistlikus kasutusviisis siseruumis viibivale inimesele märkimisväärset doosi.

Kõrge tihedusega pinnakattematerjalidest uuriti keraamilisi ja looduskivist plaate. Plaatidest tingitud aastane efektiivdoos võib osutada piisavalt kõrgeks, et nende materjalide reguleerimine on põhjendatud. Siiski, seda ei saa teha praeguses seadusandluses toodud meetoditega, sest need reguleeriksid olukorda üle. Varasemate uuringute raames on Eestis tuvastatud katteplaate, mis on määruse "Ehitusmaterjalidele ja -toodetele esitatavad nõuded ja nende nõuetele vastavuse tõendamise kord" nõuetest lähtuvalt problemaatilised, kuid doosiarvutus seda järeldust ei toetanud.

Ehitusmaterjalide kiiritusohklikkust on võimalik hinnata mudeldamise tulemusena saadud doosikoefitsientide abil, kui materjali aktiivsuskontsentratsioonid on teada. Kui tegemist on

materjaliga tüübiga, mida töö käigus ei käsitletud, siis selleks formuleeriti lihtsustatud doosihindamise meetod, mis on vähemkonservatiivne edasiarendus seadusandluses kasutatavale I-indeksi meetodile. Meetodit võrreldi I-indeksiga ja illustreeriti 3-toalise korteri näitel, mudeldades kiirgusallikana betooni, kipsi ja keraamilisi plaate. Kuigi I-indeksi kasutamine hoiab ära aastase doosiviitetaseme ületamise, ei sobi meetod materjali aktiivsuskontsentratsiooni optimeerimiseks, mis on oluline, kui ringmajanduse rakendamisel valmistatakse ehitusmaterjale tööstusjääkidest. See-eest saab optimeerimisega hakkama töö käigus väljapakutud meetod.

Kasutatud kirjandus

- [1] Tallinna Tehnikakõrgkool, *Väljastpoolt Euroopa Liitu pärinevate ja Eesti turul olevate ehitusmaterjalide kaardistamine ning vastavate materjalide kiirgusohtlikkuse tuvastamine*, projekti nr 16329, aruanne (Tallinna Tehnikakõrgkool, 2020).
- [2] Rahvusvaheline Kiirguskaitsekomisjon, *Adult Reference Computational Phantoms*, Annals of ICRP: ICRP Publication 110 (ICRP, 2009).
- [3] Rahvusvaheline Kiirguskaitsekomisjon, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Report - IAEA/RL/148 (IAEA, 2007).
- [4] J. T. Bushberg, “Uses of effective dose: The good, the bad, and the future,” *Health Physics* **116**, 129–134 (2019).
- [5] K. Saito, N. Petoussi-Hens ja M. Zankl, “Calculation of the effective dose and its variation from environmental gamma ray sources,” *Health Physics* **74**, 698–706 (1998).
- [6] M. Markkanen, *Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity*, STUK-B-STO 32 (FINNISH CENTRE FOR RADIATION AND NUCLEAR SAFETY, 1995).
- [7] E. Stranden, “Radioactivity of building materials and the gamma radiation in dwellings,” *Physics in Medicine and Biology* **24**, 921–930 (1979).
- [8] Euroopa Komisjon, *Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*, Radiation protection 112 (Euroopa Komisjon, 1999).
- [9] M. Orabi, “Studying factors affecting the indoor gamma radiation dose using the MCNP5 simulation software,” *Journal of Environmental Radioactivity* **165**, 54–59 (2016).
- [10] Euroopa Tuumauuringute Keskus, “Fundamentals of monte carlo simulations of radiation transport with fluka,” kasutatud 07.03.2022, https://indico.cern.ch/event/694979/contributions/2927088/attachments/1657637/2654305/Fundamentals_of_MC_simulations_of_radiation_transport_2018.pdf.

- [11] Council of European Union, “Council directive 2013/59/euratom,” kasutatud 07.03.2022, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:02013L0059-20140117&from=EN>.
- [12] ÜRO Aatomikiirguse Mõjude Teaduslik Komitee, *SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION*, UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly (ÜRO, 2017).
- [13] Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus 26.07.2013 nr 49, “Ehitusmaterjalidele ja -toodetele esitatavad nõuded ja nende nõuetele vastavuse tõendamise kord,” redaktsioon jõustunud 01.01.2021, <https://www.riigiteataja.ee/akt/119022019005>.
- [14] Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur, *Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*, Specific Safety Guide No. SSG-32 (IAEA, 2015).
- [15] J. Ortiz, L. Ballesteros ja V. Serradell, *Radioactivity reference levels in ceramics tiles as building materials for different countries*, INIS-AR-C-1051 (International congress of the International Radiation Protection Association, 2008).
- [16] M. Lust ja E. Realo, “Assessment of natural radiation exposure from building materials in estonia,” *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* **61**, 107 (2012).
- [17] W. Schroeyers, *Naturally occurring radioactive materials in construction: Integrating radiation protection in reuse*, TU1301 norm4building (Woodhead Publishing, 2017).
- [18] The Arctic University of Norway, “Innovation in concrete design for hazardous waste management applications,” (2022). kasutatud 19.05.2022, <https://en.uit.no/project/iconde>.
- [19] S. Pepin, “Using resrad-build to assess the external dose from the natural radioactivity of building materials,” *Construction and Building Materials* **168**, 1003–1007 (2018).
- [20] S. Righi, S. Verita, P. L. Rossi ja M. F. Maduar, “A dose calculation model application for indoor exposure to two-layer walls gamma irradiation: The case study of ceramic tiles,” *Radiation Protection Dosimetry* **171**, 545–553 (2015).
- [21] A. Estokova ja E. Singovszka, “Assessment of risk from irradiation originating from mortars with mineral waste addition,” *Indoor and Built Environment* **31**, 219–229 (2021).
- [22] G. Manić, V. Manić, D. Nikezić ja D. Krstić, “The dose of gamma radiation from building materials and soil,” *Nukleonika* **60**, 951–958 (2015).
- [23] J. Deng, L. Cao, ja X. Su, “Monte carlo simulation of indoor external exposure due to gamma-emitting radionuclides in building materials,” *Chinese Physics C* **38**, 108202 (2014).

- [24] J. C. Bryan, *Introduction to nuclear sciences* (CRC Press, 2018).
- [25] Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur, *The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition*, Technical Reports Series No. 476 (IAEA, 2014).
- [26] Laboratoire National Henri Becquerel, “Nucléide - lara: Library for gamma and alpha emissions,” kasutatud 07.03.2022, <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>.
- [27] Laboratoire National Henri Becquerel, “Betashape – beta spectra computing – version: 2.2,” kasutatud 08.03.22, <http://www.lnhb.fr/rd-activities/spectrum-processing-software/>.
- [28] M. Lust, *Assessment of dose components to Estonian population*, dissertationes physicae universitatis tartuensis 82 (Tartu University Press, 2012).
- [29] National Institute of Standards and Technology, “X-ray mass attenuation coefficients,” kasutatud 07.03.2022, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>.
- [30] I. Kawrakow, E. Mainegra-Hing, D.W.O. Rogers, F. Tessier ja B.R.B. Walters, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, NRCC Report PIRS-701 (NRC Canada, 2021).
- [31] National Institute of Standards and Technology, “Estar: Stopping powers and ranges for electrons,” kasutatud 07.03.2022, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
- [32] S. Dziri, A. Nachab, A. Nourreddine, A. Sellam ja D. Gelus, “Experimental and simulated effective dose for some building materials in france,” *World Journal of Nuclear Science and Technology* **03(02)**, 41–45 (2013).
- [33] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, ja J. Silva, “Monte carlo calculation of dose rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil.” *Health Physics* **78**, 295–302 (2000).
- [34] Keskkonnaminister, “Kiirgustegevuses kasutatavate või tekkivate radioaktiivsete ainete väljaarvamise ja vabastamise tingimused ning väljaarvamise ja vabastamise taotlusele esitatavad nõuded,” kasutatud 08.05.2022, <https://www.riigiteataja.ee/akt/127082021006>.
- [35] H. Tohver, *Omaneeldumiseefekt gammaspektromeetrias ehitusmaterjalide kiirgusohutuse hindamisel*, Füüsika õppekava bakalaureusetööd (Tartu Ülikool, 2020).

Lisa A - Materjali omaduste kirjeldus

Tabel A1: Ehitusmaterjalide kasutusviiside mudeldamisel kasutatud materjalide tihedused ρ (g/cm^3), ionisatsioonienegiad I_e (eV) ja elementaarne koostis massiprotsentides. Jääk vastab < 0.1% massiprotsendile.

	Element ja massiprotsent (%)															
	ρ	I_e	H	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ar	K	Ca	Ti	Fe
Betoon	2,35	124,5	1,9	0,2		50,6	13,4	0,1	1,8	26,8			0,9	3,8		0,6
Plokkbetoon	2,00	124,5	1,9	0,2		50,6	13,4	0,1	1,8	26,8			0,9	3,8		0,6
Tuhaplokk	0,48	153,6				43,8		0,5	2,2	27,5			0,8	24,2		1,0
Telliskivi	2,00	149,3				47,3	0,9	1,6	9,0	29,5			2,0	5,0	0,4	4,4
Portland mört	1,89	166,0				36,1	0,1	1,4	2,5	9,9	1,0		0,6	46,0	0,2	2,3
Katteplaat	2,00	137,1				48,9	0,1	1,2	10,6	31,7			3,5	1,7	0,6	1,8
Šamotkivi	2,00	149,3				47,3	0,9	1,6	9,0	29,5			2,0	5,0	0,4	4,4
Šamotmört	1,60	145,9				36,1	0,1	1,4	2,5	9,9	1,0		0,6	46,0	0,2	2,3
Marmor	2,65	145,9		4,7		43,9	0,6	9,5	1,2	10,3				29,8		
Kivivill	0,04	150,7				43,0	2,1	5,6	7,1	22,1			1,2	8,1	1,7	9,2
Kipsplaat	0,72	151,6				47,7					24,4			27,9		Jääk
Pinnas	1,50	112,7	2,8	14,4	Jääk	49,6	0,8		8,9	21,3			0,6	0,5		1,0
Puit	0,60	76,4	6,2	51,6	42,2											
Õhk	0,001	85,7		Jääk	75,5	23,2						1,3				

Tabelis väljatoodud väärtused võeti peamiselt [31] andmebaasist. Kui materjal andmebaasist puudus, võeti andmed teistest kirjandusallikatest. Kuna paljude ehitusmaterjalide tihedused varieeruvad märgatavalt, siis kasutati kirjandusest ja toodete kataloogidest leitud keskmisi väärtusi.

Lisa B - Mudeli geomeetria kirjeldus

Kõigi mudelite puhul hinnati neeldumisdoosi kiirust põrandast 95 cm kuni 105 cm kõrgusel asuvas õhukihis.

B.1 - Standardruum

Standardruumi geomeetria koosneb 20 cm paksustest betoonseintest, põrandast ja laest. Siseruumi pindala on 20 m^2 , üks külg 5 m, teine 4 m. Siseruumi kõrguseks on 2,8 m.

B.2 - Pinnas

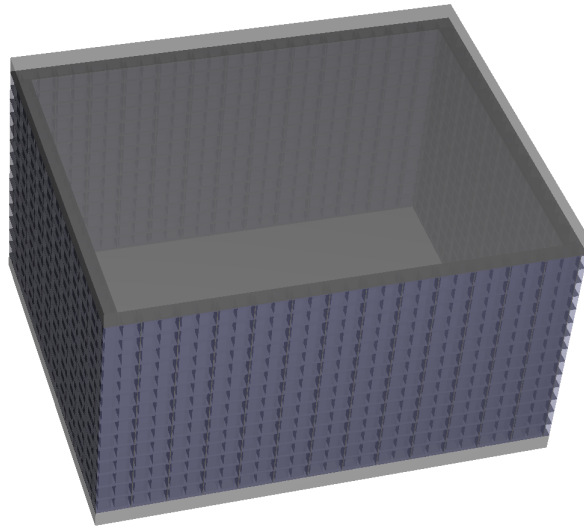
Pinnasest tingitud γ -kiirguse doosi hindamiseks kasutati $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ristahuka kujulist maatükki, mille sügavuseks oli 2 m. Doosihinnang tehti maatüki keskel $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ alas.

Pinnasest tingitud γ -kiirguse doosi hindamiseks siseruumis asetati eelnevalt kirjeldatud geomeetriasse standardruum (maa peal), kus vundamendi taldmiku mudeldamiseks jätkasid seinad 1 meetri sügavusele (joonis 3.5). 1 meetri sügavusel paiknesid 30 cm laiused vundamendi talad. Doosikiirusi hinnati standardruumiga analoogses konfiguratsioonis.

B.3 - Seinaplokid

Seinaplokkide geomeetria koosnes $5 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$ sisemõõtmetega ruumist, mille seinad koosnesid plokkidest. Ploki mõõtmeteks oli $20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ja kõrvuti asetsevate plokkide vahel oli 1 cm paksune sidumismördi kiht. Betoonploki ja tuhaploki geomeetriad olid samasugused.

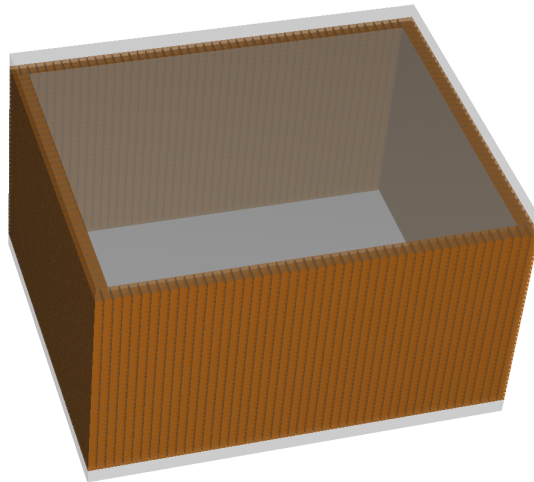
Augulise ploki mudeldamiseks asetati ploki sisse $14 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ auk. Ploki välisseinade paksuseks jäi 3 cm, kahe augu vahelise seina paksuseks aga 4 cm. Augulised plokid täideti täitemördiga. Augulise ploki geomeetria on näidatud joonisel B1.



Joonis B1: Augulise ehitusploki geometria illustratsioon.

B.4 - Telliskivi

Telliskivi seinte geometria koostati analoogselt seinaplokkide geometriale, kuid telliskivi mõõtudeks võeti $10\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 6\text{ cm}$. Augulise telliskivi mudeldamisel loodi telliskivi keskele kolm auku. Aukudevaheliste kihtide ja telliskivi seinapaksuseks oli 2 cm. Täidetud telliskivi geometria on välja toodud joonisel B2.



Joonis B2: Täidetud telliskivi geometria illustratsioon.

B.5 - Kipsplaat

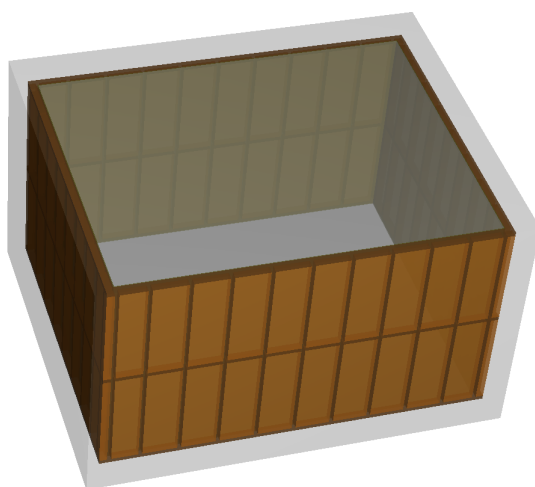
Kipsplaadi geometria põhjaks võeti standardruumi geometria, mille seinte vastu asetati $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ prussidest valmistatud puitkarkass. Puitkarkass kaeti 1 cm paksuse kipsplaadiga, mida

kasutati kiirgusallikana.

B.6 - Soojustusmaterjalid

Sisemise soojustuse geomeetria aluseks võeti kipsplaadi geomeetria, kus puitkarkassi tõttu tekkinud kipsplaadi ja seina vaheline tühimik täideti soojustusmaterjaliga, mis oli antud geomeetria kiirgusallikaks.

Välimise soojustuse geomeetria aluseks võeti standardruum, mille seinad kaeti väljast poolt 10 cm paksuse soojustusmaterjali kihiga. Kipsplaadi ja sisemise soojustusmaterjali geomeetria on illustreeritud joonisel B3.

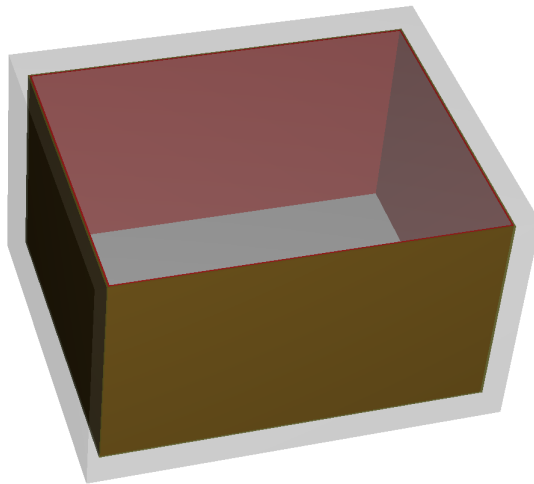


Joonis B3: Sisemise soojustuse ja kipsplaadi geomeetria illustratsioon.

B.7 - Katteplaadid

Katteplaatide geomeetria aluseks võeti standardruum. Seinaplaadi rakenduseks kaeti standardruumi seinad 2 cm paksuse mördikihiga, mille peale asetati 2 cm paksune ühtlane katteplaadi kiht.

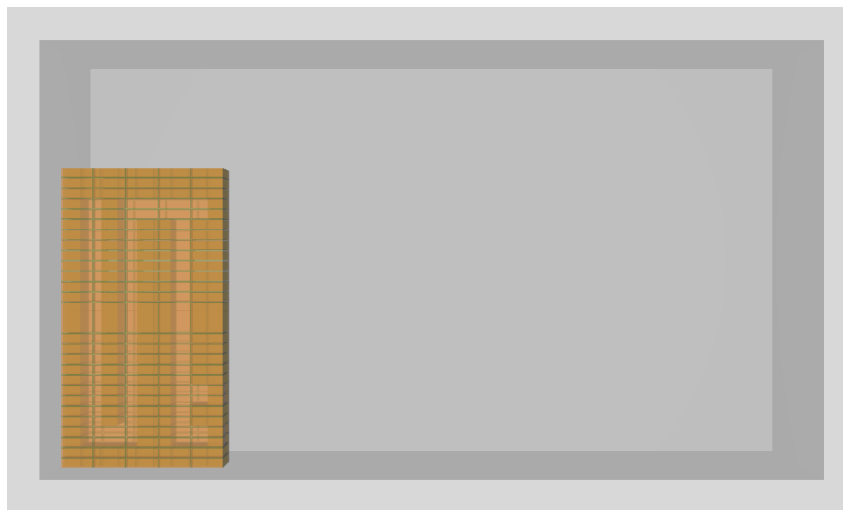
Põrandaplaadi kasutusviisi mudeldamiseks viidi eelnevalt kirjeldatud protseduur läbi põrandaga. Seinaplaadi geomeetria on illustreeritud joonisel B4.



Joonis B4: Seinaplaatide geometria illustatsioon.

B.8 - Ahi

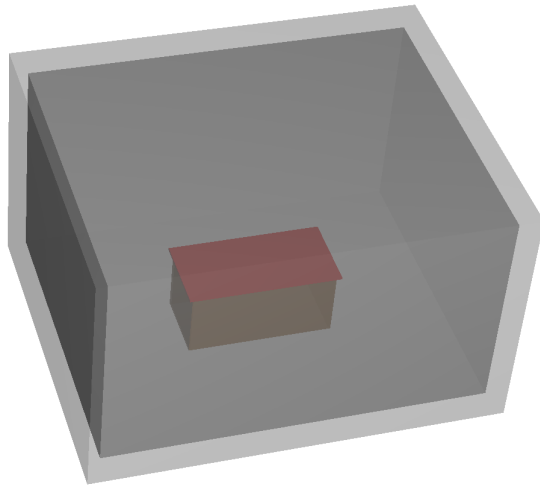
Ahju mudeldamiseks võeti näidiseks levinud nõukogudeaegsed tellisahjud mõõtutega 110 cm × 90 cm × 200 cm. Ahi asetati standardruumi lühema külje keskele. Ahju küljel oli 1 cm paksune terasest ahjuuks ja tuhaluuk. Ahju sisemine struktuur on kuvatud joonisel B5.



Joonis B5: Ahju ristlõige standardruumis (ruumi külgvaade).

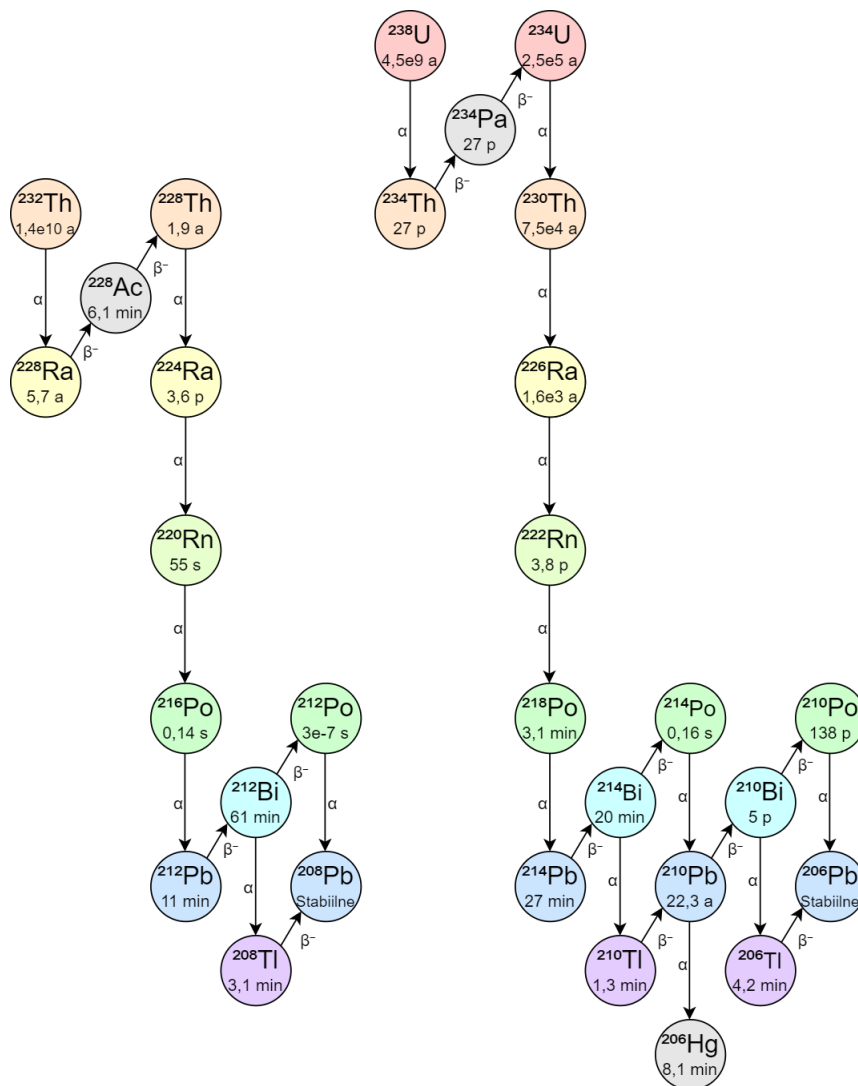
B.9 - Köögi tööpind

Köögi tööpinna alusgeomeetriaks võeti standardruum, mille keskele asetati puidust 190 cm × 90 cm × 85 cm köögi tööpinda toetava kapi seinad. Seinte paksuseks võeti 2 cm. Marmorist köögi tööpinna mõõtmeteks olid 100 cm × 200 cm × 3 cm. Tööpinna geometria on illustreeritud joonisel B6.



Joonis B6: K ogit opinna geometria illustratsioon.

Lisa C - ^{238}U ja ^{232}Th lagunemisread



Joonis C1: ^{238}U ja ^{232}Th radionukliidide lagunemisread [35].

Tänuavaldused

Avaldan tänusoove oma toetavale ja abivalmile juhendajale Siiri Saluperele, kes mind pika teekonna läbimisel aitas ja nõustas. Samuti soovin tänada oma elukaaslast, kes mind terve magistritöö valmimise protsessi jooksul toetas.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hando Tohver,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Ehitusmaterjalidest tingitud väliskiirituse analüüs Monte Carlo meetodiga,

mille juhendaja on Siiri Salupere, PhD,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 29. mai 2022. a.