

ARUANNE

Doosihinnang FIONA uuringu fosforiidi ja graptoliitargilliidi proovi võtmisele ja hoiustamisele

Aruande tellija:

Eesti Geoloogiateenistus

Aruande koostaja:

Siiri Salupere, PhD

OÜ Kiirgustark

Tartu, 2024

Sisukord

1. Sissejuhatus.....	2
2. Kiirgusohutus NORM-valdkonnas	3
3. Metoodika	5
3.1. Kasutatav tarkvara.....	5
3.2. Sisendandmed.....	7
3.2.1. Graptoliitargilliiti ja fosforiiti kirjeldavad andmed	7
3.2.2. Siseruumi kirjeldavad parameetrid.....	10
3.2.3. Välitingimusi kirjeldavad parameetrid	10
3.2.4. Tööaeg väli- ja sisetingimustes	11
4. Tulemused.....	12
4.1. Materjali käitlemine proovivõtukohas	12
4.1.1. Graptoliitargilliit välitingimustes	12
4.1.2. Fosforiit välitingimustes.....	12
4.2. Materjali hoiustamine Arbavere uurimiskeskuses.....	16
4.2.1. Graptoliitargilliit sisetingimustes	16
4.2.2. Fosforiit sisetingimustes.....	19
5. Järeldused ja soovitused.....	24
6. Kokkuvõte.....	25
7. Kasutatud kirjandus	26

Lisa 1. Puuraukudest saadava fosforiidi ja graptoliitargilliidi koguste hinnang

Fail „Lisa 1_Materjali kogus puuraukudest.xlsx“

Lisa 2. RESRAD-ONSITE doosihinnangu mudelite failid

Fail „Lisa 2_RESRAD mudelid.zip“

1. Sissejuhatus

Käesolevas aruandes antakse doosihinnang¹ fosforiidi ja kaasnevate ressursside uuringu raames 2024. aasta suvel kogutava suuremahulise fosforiidi ja graptoliitargilliidi proovi käitlemisele.

Vastavalt lähteülesande kirjeldusele on töö eesmärgiks anda teostatavatele tegevustele doosihinnang (ingl k. *size-specific dose estimate*), mis sisaldab alljärgnevat:

- Lühikest ülevaadet, kuidas kiirgusohutuse temaatika on reguleeritud Eestis ja Euroopa Liidus lähtuvalt Eesti Geoloogiateenistuse (EGT) poolt planeeritavast tegevusest.
- Doosihinnangut graptoliitargilliidi käitlemisele nii proovivõtukohas kui ka hilisemal hoiustamisel Arbavere uurimiskeskuses.
- Doosihinnangut fosforiidi käitlemisele nii proovivõtukohas kui ka hilisemal hoiustamisel Arbavere uurimiskeskuses.
- Vajadusel soovitusi kiirgusohutuse tagamiseks tööde juures viibivatele inimestele (sh isikukaitsevahendite kasutamise vajalikkus, tööaja limiteerimine vms).
- Vajadusel soovitusi võetava proovi hoiustamise tingimuste ja kiirgusohu monitoorimise kohta, et oleks tagatud inimeste ohutus ning tegevus oleks kooskõlas kehtivate õigusnormidega.

Analüüsi koostamisel on lähtutud FIONA uuringu üldgeoloogilise uurimistöö loa taotluse seletuskirjas toodud andmetest. Doosihinnangus kasutatud graptoliitargilliidi ja fosforiidi radionukliidide sisalduse andmed põhinevad aastatel 2020-2021 EGT poolt kogutud suursüdamike GA004 ja PH010A gammaspекtromeetrilise analüüsi tulemustel.

Käesolev analüüs ei käsitle graptoliitargilliidi isesüttimise ja leostumisega seotud küsimusi. Doosihinnangu koostamisel on võetud aluseks eeldus, et graptoliitargilliidi käitlemisel jälgitakse EGT poolt koostatud juhendmaterjali „Graptoliitargilliidi käitlemise juhend“ (ETG, 2020) ning töö toimub piisavalt kiiresti, et uraani, raadiumi ja teiste uraani lagunemisrea elementide aktiivsuskontsentratsioon ei jõua leostumise tõttu väheneda.

Doosihinnangus on lähtutud konservatiivsuse printsiibist – kui sisendparameetri täpne väärtus pole teada, on eelistatud väärtust, mis võib viia suurema doosini. Seda toetab ka doosihinnangu teostamiseks kasutatav tarkvara RESRAD-ONSITE, kus sisendparameetrite vaikeväärtusteks on valitud konservatiivsed väärtused.

Aruanne sisaldab doosihinnangut 11 erineva stsenaariumi puhul. Nii sise- kui välitingimustes on graptoliitargilliidile ja fosforiidile koostatud üks realistlik baasstsenaarium. Lisaks on analüüsitud seitset alternatiivstsenaariumit, mille eesmärgiks on illustreerida doosi muutust sisendandmete varieerimisel (nt tööaja suurenemine seoses välitööde venimisega, väiksema hoiuruumi kasutamine materjali pikaajaliseks säilitamiseks).

¹ Käesolevas aruandes kasutatakse mõistet doos tähenduses efektiivdoos (ühikutes mSv).

2. Kiirgusohutus NORM-valdkonnas

Akronüüm NORM (ing. k *Naturally Occuring Radioactive Material*) tähistab materjali, mis sisaldab looduslikult esinevaid radioaktiivseid elemente ehk radionukliide. Kiirgusseadus defineerib NORM'i mõiste alljärgnevalt:

„Looduslik radioaktiivne aine (NORM – *Naturally Occuring Radioactive Material*) on peamiselt looduslikke radionukliide kaalium-40, toorium-232, uraan-235 või uraan-238 ning nende lagunemisritta kuuluvaid radionukliide sisaldav radioaktiivne aine, mille aktiivsus või aktiivsuskontsentratsioon on kiirgusohutuse seisukohalt oluline.“

Olulisuse kiirgusohutuse seisukohast määrab radionukliidi väljaarvamistase. Selle all mõeldakse radioaktiivse aine aktiivsuse või aktiivsuskontsentratsiooni väärtus, millega võrdsed või millest väiksema väärtuse korral ei nõuta kiirgustegevusluba (Kiirgusseadus). Väljaarvamistasemed on kehtestatud keskkonnaministri määrusega nr 40 „Kiirgustegevuses kasutatavate või tekkivate radioaktiivsete ainete väljaarvamise ja vabastamise tingimused ning väljaarvamise ja vabastamise taotlusele esitatavad nõuded“.

- Määruse lisa 2 kehtestab looduslike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide väljaarvamise- ja vabastamistasemed tahkel kujul oleva radioaktiivse aine mis tahes koguse kohta, kui looduslike radionukliidide read on radioaktiivses tasakaalus ema-radionukliidiga. **Aktiivsuskontsentratsiooni väljaarvamistase uraani-238 ja Th-232 ridade radionukliididele on 1000 Bq/kg.**
- Määruse lisa 3 kehtestab radionukliidide aktiivsuste väljaarvamise- ja vabastamistasemed mis tahes kujul oleva radioaktiivse aine mis tahes koguse kohta. **U-238 ja Ra-226 aktiivsuse väljaarvamistase on 10 000 Bq,**
- Määruse § 3 sätestab radioaktiivsete ainete väljaarvamise- ja vabastamistasemete tuletamise alused:
„(1) Radioaktiivsete ainete väljaarvamisel ja vabastamisel kiirgusseaduse nõuete kohaldamisest arvestatakse järgmiste tingimustega:
1) tehislake radionukliidide kasutamisega seotud kiirgustegevusest elaniku saadav efektiivdoos ühe aasta jooksul on 10 mikrosiivertit või väiksem;
2) **looduslike radioaktiivsete ainete kasutamisega seotud kiirgustegevusest elaniku saadav efektiivdoos ühe aasta jooksul on 1 millisiivert või väiksem;**
3) efektiivdoosi hindamisel võetakse arvesse maksimaalsed potentsiaalsed efektiivdoosid oluliste kiiritusradade kaudu.“

Ülaltoodud paragrahv tähendab, et väljaarvamistasemest suurem radionukliidi sisaldus ei tähenda automaatselt, et radionukliidi sisaldava materjaliga töötamiseks on vaja kiirgustegevusluba. Kui doosihinnangu alusel on võimalik ära tõestada, et tegevuse käigus ei saada looduslikult esinevaid radionukliide sisaldavast materjalist suuremat efektiivdoosi kui 1 mSv/a, ei vaja tegevus kiirgustegevusluba. Sealjuures peab doosihinnang arvesse võtma kõiki olulisi kiiritusradu.

Väljaarvamistasemete väärtused ja nende tuletamise alused ning väljaarvamise doosipiirmäärad on Eesti seadusandlusesse üle võetud Euroopa Nõukogu direktiivist

2013/59/EURATOM, millega kehtestatakse põhilised ohutusnormid kaitseks ioniseeriva kiirgusega kiiritamisest tulenevate ohtude eest (nn BSS ehk *Basic Safety Standards* direktiiv).

Mõiste kiiritusrada on defineeritud kui tee keskkonnas, mille kaudu radioaktiivne aine liigub isikuni ja kiiritab teda (Kiirgusseadus). Uraan-238 lagunemisrea elemente sisaldava NORM'i kontekstis on oluline tähelepanu pöörata radoon-222 sissehingamise kiiritusrajale. Radioaktiivne gaas radoon-222 on kõige suurema panusega looduslik kiirgusallikas, põhjustades üle poole inimese keskmisest aastadoosist (Cinelli et al., 2019). Radoonisisaldust töökohtade siseõhus reguleerib keskkonnaministri määrus nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“. Radoonisisalduse viitetase töö- ja eluruumides on 300 Bq/m³. Kui sellises radooni kontsentratsioonis töötada aastaringselt 40 tundi nädalas, saadakse efektiivdoos 4 mSv/a. See väärtus on märgatavalt suurem kui NORM'i väljaarvamise doosipiirmäär 1 mSv/a. Kuidas selgitada vastuolu radooni kiiritusrada puudutatavatele nõuetele?

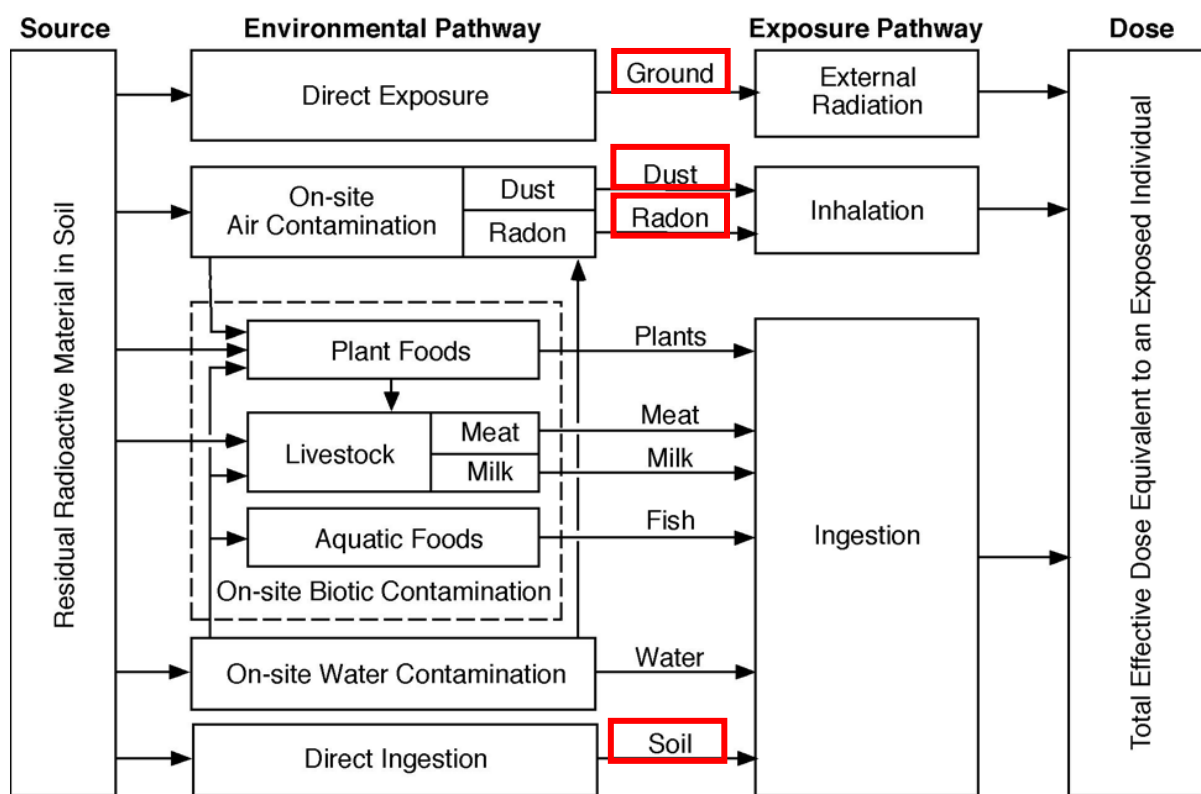
Kiirguskaitstes tehakse vahet kavandataval kiirgusolukorral ja püsikiirituse kiirgusolukorral (ICRP, 2007). Kavandatav kiirgusolukord (ing. k *planned exposure situation*) on olukorrad, kus kiirguskaitset saab ette planeerida ja kiiritust saab mõistlikult prognoosida. Selle puhul kehtib elanikele efektiivdoosi piirmäär 1 mSv/a. Püsikiirituse olukord (ing. k *existing exposure situation*) on olukord, mis eksisteeris juba enne seda, kui kiiritust otsustati reguleerida/kontrollida. Püsikiirituse olukorra näited on kõrgendatud loodusliku kiirgusfooniga alad ning geoloogilistest oludest põhjustatud radoon ruumide siseõhus. Püsikiirituse olukorrad on halvemini planeeritavad ja neis ei saa kehtestada nii täpseid doosipiirmäärasid. Rahvusvahelise Radioloogilise Kaitse Komitee (ICRP – *International Commission on Radiological Protection*) soovitus on kehtestada nendes olukordades viitetase, mis jääks vahemikku 1–20 mSv/a (ICRP, 2007). Radoonisisaldust töö- ja eluruumide õhus reguleeritakse vastavalt püsikiirituse olukorra kontseptsioonile. Looduslikke radionukliide sisaldava materjali kasutuselevõttu uurimistöös või tööstuses vaadeldakse seevastu kavandatava kiirgusolukorrana, mille puhul tuleb väljaarvamise taotlemiseks ära näidata, et kõigi oluliste kiiritusradade dooside summa on maksimaalselt 1 mSv/aastas.

3. Metoodika

3.1. Kasutatav tarkvara

Doosihinnangu koostamiseks on kasutatud vabavaralist tarkvara RESRAD-ONSITE, versioon 7.2 (arendaja *Argonne National Laboratory*, USA, <https://resrad.evs.anl.gov/>). Tarkvara on mõeldud inimese kiirgusdoosi hindamiseks võttes arvesse nii radioaktiivsest materjalist põhjustatud väliskiiritust kui sisekiiritust (sissehingamine ja -söömine).

Joonisel 1 on toodud ülevaatlik plokk skeem, mis kirjeldab doosi modelleerimist RESRAD-ONSITE'i abil. Kiirgusallikana (*source*) defineeritakse antud juhul kas graptoliitargilliit või fosforiit. Programm võimaldab arvesse võtta erinevaid liikumisteid, mis kirjeldavad radionukliidide levi keskkonnas, põhjustades lõpuks inimesele doosi väliskiirituse, sissehingamise või sissesöömise kaudu.



Joonis 1. RESRAD-ONSITE'i plokk skeem kiiritusradadega (Argonne National Laboratory, 2001). Punase riskülikuga on tähistatud komponendid, mida on käesolevas doosihinnangus arvesse võetud.

Graptoliitargilliidist ja fosforiidist põhjustatud doosi modelleerimisel võeti arvesse järgmised kiiritusrajad:

- **Väliskiiritus** – selle all mõeldakse kiiritust, mida põhjustab kiirgusallikas/-allikad, mis asuvad väljaspool inimese keha. Käesoleva töö kontekstis põhjustavad väliskiiritust graptoliitargilliidis ja fosforiidis sisalduvad uraan-238 lagunemisrea radionukliidid, mis kiirgavad gamma- või beetakiirgust. (Alfakiirguse panus väliskiirituse doosi on vähe, kuna alfakiirgus neeldub väga kergesti.)

- **Sissehingamine tolmuna** – sisekiiritus, mille inimene saab, kui kiirgusallikast tekkiv tolm (radioaktiivse materjali osakesed) satub tahtmatult hingamisteedesse.
- **Sissesöömine** – sisekiiritus, mille põhjustab mittetahtlik pinnase sissesöömine välitingimustes ja tolmu allaneelamine sisetingimustes (radioaktiivse materjali osakesed satuvad suhu ja sealt edasi söögitorru). Selle kiiritusraja arvesse võtmine doosihinnangutes jälgib USA *Environmental Protection Agency* doosi modelleerimise põhimõtteid. Lähtuvalt RESRADi kasutusjuhendi soovitudest (*Appendix F: Soil Ingestion Pathway Factors*; Argonne National Laboratory, 2001) on sissevõetava materjali massi jaoks kasutatud väärtust 18,25 g/aastas (50 mg/päevas), mis iseloomustab keskmist tahtmatult sissesöödava pinnase ja tolmu kogust üle 7-aastaste inimeste puhul.
- **Radooni sissehingamine** – sisekiiritus, mille põhjustab kiirgusallikas sisalduva raadium-226 lagunemisel tekkiv gaasiline radoon-222.

Ülejäänud radionukliidide levikuteed, mida RESRAD-ONSITE mudeldada võimaldab, saab käesoleva töö kontekstis kõrvale jätta, kuna eeldame, et materjalist ei toimu radionukliidide leostumist ümbritsevasse keskkonda.

RESRAD-ONSITE'i modelleerimise väljundina saame doosi erinevate kiiritusradade kaupa ja doosi muutuse ajas. Kuna FIONA uuringu raames on välitöödeks planeeritud maksimaalselt 8 kuud (EGT, 2024), piirduti välitingimuste jaoks teostatud doosihinnangus ühe aasta pikkuse perioodiga. Sisetingimuste doosihinnangus, mis käsitleb materjali hoiustamist Arbavere uurimiskeskuses, teostati modelleerimine kümne aasta pikkuse perioodi jaoks.

RESRAD-ONSITE'i radooni doosi hindamise arvutuskäik lähtub epidemioloogilisest mudelist, mille puhul kasutatakse õhu radooni aktiivsuskontsentratsioonilt efektiivdoosile üleminekuks doosi konvekterimise faktorit ühikutes mSv/WLM (WLM – *Working Level Month*). Eestis on radooni doosi hindamine töökohtades reguleeritud Keskkonnaministri määrusega nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“, mis kasutab radoonist põhjustatud efektiivdoosi hindamiseks dosimeetrilist mudelit, kus kasutatakse doosikoefitsiente ühikutes mSv/(Bq·h·m⁻³) või mSv/(J·h·m⁻³). Et olla kooskõlas kohaliku õigusruumiga, ei kasutatud käesolevas doosihinnangus radooni sissehingamise kiiritusraja doosi väärtusena RESRAD-ONSITE'i poolt arvatud doosi, vaid lähtuti Keskkonnaministri määruses nr 28 toodud arvutusvalemist (valem 1):

$$E = koef \cdot C \cdot t \quad (1)$$

kus E – radooni sissehingamisest saadav efektiivdoos ühikutes mSv;

$koef$ – efektiivdoosi koefitsient, $6,7 \cdot 10^{-6}$ mSv/(Bq·h·m⁻³);

C – radoon-222 aktiivsuskontsentratsioon õhus ühikutes Bq/m³;

t – tööaeg (tundides), mis veedetakse keskkonnas, kus õhu Rn-222 aktiivsuskontsentratsioon on C .

Keskkonnaministeeriumi määruses toodud radooni doosi arvutusvalem on kooskõlas Rahvusvahelise Radioloogilise Kaitse Komisjoni ICRP kõige uuemate soovitudega radooni doos hindamise osas (ICRP publikatsioon nr 137, 2017).

Radooni sissehingamisest põhjustatud doosi hindamisel kasutati valemis 1 sisendina RESRAD-ONSITE'i poolt arvutatud Rn-222 aktiivsuskontsentratsiooni sise- ja välitingimustes.

3.2. Sisendandmed

3.2.1. Graptoliitargilliiti ja fosforiiti kirjeldavad andmed

Radionukliidide sisaldus

Doosi modelleerimisel lähtuti uraan-238 lagunemisrea radionukliidide (vt joonis 2) sisaldusest väljendatuna aktiivsuskontsentratsiooni ühikutes (Bq/kg). Toorium-232 lagunemisrea radionukliidide modelleerimisel arvesse ei võetud, kuna nende sisaldus nii graptoliitargilliidis kui fosforiidis jääb mitmekümnekordselt allapoole väljaarvamistaset.

Raadium-226 aktiivsuskontsentratsioon graptoliitargilliidis leiti puursüdamiku GA004 analüüsitulemuste põhjal. Kasutatud on 11 proovi Ra-226 aktiivsuskontsentratsiooni keskvaartust (proovid tähistega GA004001–GA004011).

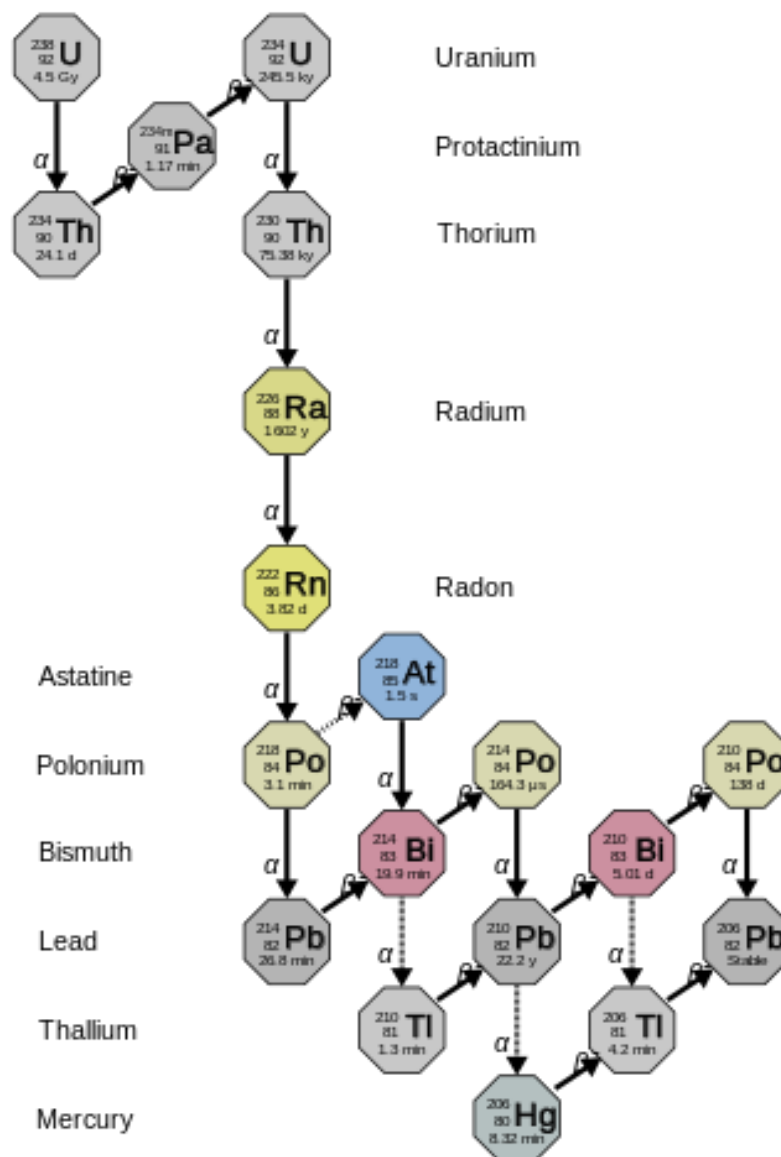
Raadium-226 aktiivsuskontsentratsioon fosforiidis saadi puursüdamik PH010A analüüsitulemustest. Kasutatud on 6 proovi Ra-226 aktiivsuskontsentratsiooni keskvaartust (proovid tähistega PH010A104–PH010A109).

Modelleerimisel eeldati, et U-238 lagunemisreas (joonis 2) on radionukliidid kuni raadiumi isotoobini Ra-226 omavahel sekulaarses tasakaalus. See tähendab, et kõigi U-238 ja Ra-226 vahele jäävate radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid on omavahel võrdsed. Seda eeldust toetab tugev korrelatsioon uraanisisalduse ja Ra-226 aktiivsuskontsentratsiooni vahel antud puursüdamikes (allikas: EGT, 2023. *Exploration of phosphorite and black shale in North-Eastern Estonia* / EGF 9594, lk 370, joonis 218).

Ra-226 lagunemisel tekkiv radoon-222 on gaasiline element, mis oma tekkekohast kergesti kaugemale kandub. Seetõttu ei saa eeldada, et Rn-222 ning tema tütar nukliidid oleksid sekulaarses tasakaalus U-238 lagunemisrea esimese kuue liikmega. Rn-222 pikaajaliste tütar nukliidide poloonium-210 ja plii-210 aktiivsuskontsentratsioonide hindamiseks võeti arvesse, kui palju Rn-222 materjali alles jääb. Seda võimaldab hinnata radooni emanatsioonikoefitsient, mis väljendab, kui suur osakaal Ra-226 lagunemise tulemusena moodustunud Rn-222 aatomitest materjalist vabaneb (valem 2):

$$\text{Emanatsioonikoefitsient} = \frac{\text{Vabanenud Rn aatomite arv}}{\text{Moodustunud Rn aatomite arv}} \quad (2)$$

Rn-222 emanatsioonikoefitsiendi väärtused varieeruvad materjalides suurel määral. Kirjanduse andmetel võib see pinnases olla vahemikus 0,14–80%, kivimites 2,1–32% (Cinelliet al., 2019). Rahvusvahelise Aatomienergia Agentuuri raport „Measurement and calculation of radon releases from NORM residues“ (IAEA, 2013) toob emanatsioonikoefitsiendi väärtuste vahemiku 10–30% välja kui tüüpilise vahemiku kivimite, pinnase ja kaevandusjääkide puhul. Käesolevas töös võeti **Rn-222 emanatsioonikoefitsiendi väärtuseks 30%**. See tähendab, et 30% Ra-226 lagunemisel tekkinud radoonist lendub materjalist välja ning 70% jääb materjali alles ja laguneb edasi järgmisteks tütar nukliidideks.



Joonis 2. Uraan-238 lagunemisrida (https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain).

Doosihinnangu teostamiseks tuli RESRAD-ONSITE mudelisse sisestada aktiivsuskontsentratsioon kõigi U-238 rea elementide kohta, mille poolestusaeg on pikem kui 30 päeva. Aktiivsuskontsentratsioonide sisendandmed graptoliitargilliidi ja fosforiidi jaoks on esitatud tabelis 1.

Tabel 1. Doosi modelleerimisel kasutatud U-238 rea elementide aktiivsuskontsentratsioonid graptoliitargilliidis (puursüdamiku GA004 põhjal) ja fosforiidis (puursüdamiku PH010A põhjal).

<i>Eeldatav Rn-222 emanatsioonikoefitsient: 0,3</i>	U-238 (Bq/kg)	U-234 (Bq/kg)	Th-230 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)
Graptoliitargilliit	1890	1890	1890	1890	1320	1320
Fosforiit	270	270	270	270	190	190

Tihedus, poorsus

Tiheduse ja poorsuse andmetena kasutati EGT 2023. a aruandes „Exploration of phosphorite and black shale in North-Eastern Estonia“ toodud keskmisi väärtusi, mis on esitatud tabelis 2. Tihedus ja poorsus mõjutavad radooni pääsemist materjalist ümbritsevasse õhku. Tihedusel on mõju ka väliskiirguse kiiritusrajale: mida tihedam on materjal, seda suurem on otsese gamma-ja beetakiirguse omaneeldumine materjalis.

Tabel 2. Doosi modelleerimisel kasutatud graptoliitargilliidi ja fosforiidi tiheduse ja poorsuse andmed.

Materjal	Tihedus (t/m ³)	Poorsus
Graptoliitargilliit	1,85	0,3
Fosforiit	1,97	0,3

Materjali kogus

Puuraukudest saadava fosforiidi ja graptoliitargilliidi koguste hindamisel lähtuti FIONA uuringu üldgeoloogilise uurimistöö loa taotluse seletuskirjas toodud andmetest puuraukude arvu ja diameetri kohta (EGT, 2024). Tasub silmas pidada, et puuraukudest saadud materjali kogused võivad olla ülehinnatud, sest puuraukude geoloogilise läbilõike andmete kasutamisel eeldati nii fosforiidi kui graptoliitargilliidi puhul maksimaalset kihipaksust (vt lisa 1).

Välitingimuste jaoks tehtud doosihinnangu puhul eeldati maksimaalset materjali mahtu maapinnal (tabel 3; olukord, kus kõik puuraugud on puuritud, tagasitäitmisega ei ole veel alustatud ja säilitatav proovikogus ei ole veel Arbaverre ära viidud). Modelleerimiseks kujutleti ette, et materjal paikneb maapinnal 1 m paksuse kihina. See eeldus annab suure pinnalaotse, mis võimaldab koostada konservatiivse hinnangu.

Tabel 3. Graptoliitargilliidi ja fosforiidi kogused väli- ja sisetingimustes tehtud doosihinnangutes.

Materjal	Välitingimused		Sisetingimused		
	Puuraukudest saadud materjali kogus kokku		Materjali kogus, mis transporditakse suurtes presentkottides (BigBag) Arbavere uurimiskeskusesse		
	Ruumala (m ³)	Mass (t)	Ruumala (m ³)	Mass (t)	BigBag kottide arv
Graptoliitargilliit	54	99	1.08	2	2 (avatud pinna suurus 2 m ²)
Fosforiit	91	180	25.38	50	50 (avatud pinna suurus 50 m ²)

Sisetingimuste jaoks tehtud doosihinnangus võeti aluseks proovide mass, mida plaanitakse Arbavere uurimiskeskusesse viia – 2 tonni graptoliitargilliiti ja 50 tonni fosforiiti. Lähtudes asjaolust, et BigBag kottide kandevõime on kuni 1 tonn (<https://www.ragnsells.ee/service/bigbag/>), eeldati, et graptoliitargilliidi proov säilitatakse Arbaveres kahe pealt avatud BigBag kotina (avatud pind 2 m²). Fosforiidi puhul eeldati 50

BigBag kotti, mis tähendab 50 m² avatud pinda (tabel 3). Modelleerimisel eeldati, et materjal paikneb kottides põrandal 0,5 m paksuse kihina. See eeldus on konservatiivne, sest tegelikkuses plaanitakse materjali hoiustamiseks paigutada osad BigBag kotid üksteise peale. Seega võiksid reaalsuses fosforiidiga täidetud BigBag kotid enda alla võtta 30–35 m² põranda pinda.

3.2.2.Siseruumi kirjeldavad parameetrid

Selleks, et hinnata Ra-226 lagunemisest ringitud radoon-222 kontsentratsiooni siseruumis, tuleb RESRAD-ONSITE'i sisestada rida ruumi kirjeldavaid parameetreid:

- **Ruumi kõrgus**, milleks baasstsenaariumites valiti **4 m**. Baasstsenaariumid kirjeldavad Arbavere uurimiskeskuse hoidlaid. Alternatiivstsenaariumid kirjeldavad hüpoteetilist väikest hoiuruumi (hüpoteetiline kabinet või laboriruum), sel puhul valiti ruumi kõrguseks 2,5 m. Väikese ruumi puhul eeldati, et radoon-222 seguneb ühtlaselt kogu ruumi kõrguses.
- **Põranda pindala osa**, mis on mõjutatud radioaktiivsest materjalist (*Building Indoor Area Factor*). Tarkvarasse ei tule sisestada otseselt ruumi pindala, vaid protsent põranda pinnast, mis on kontaktis radioaktiivse materjaliga. Käesoleva doosihinnangu kontekstis tuleks seda tõlgendada kui materjali avatud pinna suuruse ja ruumi põranda pindala suhet. Modelleerimisel kasutatud väärtused ja nendele vastavad ruumide pindalad on esitatud tabelis 4. Baasstsenaariumites kirjeldatud juhtum (põranda pindala 640 m²) vastab Arbavere hoidla pindalale. Alternatiivstsenaariumites kirjeldatud ruumid on hüpoteetilised.
- **Õhuvahetuse kiirus ruumis**. Kirjanduse andmetel jääb õhuvahetuse kiirus tavaliselt vahemikku 0,2–2 h⁻¹, geomeetiline keskmine 0,63 h⁻¹ (Ujic' et al. 2010). Käesolevas töös kasutati vaikeväärtusena **0,5 h⁻¹**, mis tähendab, et tunni aja jooksul vahetub välja pool ruumis olevast õhust. Täiendavates analüüsides (alternatiivstsenaariumites) kasutati väärtusi 1 h⁻¹ ja 0,25 h⁻¹.

Tabel 4. Põranda pindala osa

Materjal	Eeldus, kui suure osa põranda pinnast võtavad enda alla BigBag kotid	Vastav põranda pindala
BAASSTSENAARIUMID:		
Graptoliitargilliit	0,003	640 m ²
Fosforiit	0,078	640 m ²
ALTERNATIIVSTSENAARIUMID:		
Graptoliitargilliit	0,25	8 m ²
Fosforiit	0,75	67 m ²

3.2.3.Välitingimusi kirjeldavad parameetrid

Radooni kontsentratsiooni kujunemist välitingimustes mõjutab **tuule kiirus** – mida suurem on tuule kiirus, seda kiiremini radoon hajub. Modelleerimisel kasutati RESRAD-ONSITE'i vaikeväärtust **2 m/s**. Seda võib pidada konservatiivseks hinnanguks – viimase 30 aasta

keskmise tuule kiirus on Eestis olnud suvekuudel 3 m/s, aasta keskmine väärtus on 3,5 m/s (www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/tuul/).

3.2.4. Tööaeg väli- ja sisetingimustes

Doosi hindamisel mängib tööaeg olulist rolli, sest see määrab, kui kaua viibib inimene radioaktiivse materjali läheduses.

Töötaja arvestamisel välitingimustes kasutati baasstsenaariumina eeldust, et välitööd teostatakse kahe kuu jooksul ning töötajad viibivad kaevandamise alal täistööaja. Alternatiivstsenaariumina mudeldati olukorda, kus välitööd venivad ning vältavad kaheksa kuud, mis on välja toodud välitööde maksimumperioodina üldgeoloogilise uurimistöö loa taotluses (EGT, 2024). Analoogselt baasstsenaariumiga eeldati, et töötaja viibib täistööaja kaevandamise alal.

Sisetingimustele vastava töötaja hindamisel eeldati, et töötaja viibib ühe tööpäeva nädalas proovide hoiuruumis ning seda igal nädalal terve aasta vältel (välja arvatud üks kuu aastas, mil töötaja viibib puhkusel). Sama töötundude arvestust kasutati nii baas- kui alternatiivstsenaariumite puhul.

Kokkuvõtte töötundide arvestusest on esitatud tabelis 5.

Tabel 5. Töötundide arv väli- ja sisetingimustes.

Töötunnid välitingimustes (kaevandamise alal)	Töötunnid sisetingimustes (Arbavere uurimiskeskuses)
8 h/päevas 5päeva/nädalas Baasstsenaarium – 1 kuu Alternatiivstsenaarium – 8 kuud	8 h/päevas 1 päev/nädalas 11 kuud
Kokku Baasstsenaarium – 320 h Alternatiivstsenaarium – 1280 h	Kokku 352 h/aastas

4. Tulemused

Kokkuvõtte kõigist doosihinnangu stsenaariumite tulemustest on esitatud käesoleva peatüki lõpus, tabelis 10. Tabel sisaldab efektiivdoosi hinnangut doosiraja kaupa, summaarset efektiivdoosi ning radooni aktiivsuskontsentratsiooni õhus (vastavalt stsenaariumile kas välis- või siseõhus). Järgnevates alapeatükkides on erinevad stsenaariumid täpsemalt lahti seletatud.

4.1. Materjali käitlemine proovivõtukohas

4.1.1. Graptoliitargilliit välitingimustes

Graptoliitargilliidist põhjustatud efektiivdoosi hinnangu baasstsenaariumi (B1) tulemused välitingimustes on kujutatud joonisel 3(a), arvväärtused on esitatud tabelis 6(a). Kõige olulisem kiiritusrada on väliskiiritus, mis moodustab 98,3% summaarsest efektiivdoosist. Selleks, et teised kiiritusrajad peale väliskiirituse oleksid joonisel 3 nähtavad, on y-teljel kasutatud logaritmilist skaalat. Näeme, et ühe aasta pikkuse perioodi jooksul efektiivdoos ajas praktiliselt ei muutu. See on ootuspärane arvestades radionukliidide pikki poolestusaegu ja fakti, et antud doosihinnang eeldab, et radionukliidide kadu leostumise kaudu on olematu. Ainsad viisid, kuidas radioaktiivse materjali kogus väheneb, on radioaktiivne lagunemine ja materjali minemakandumine tolmuks. Tulemuste esitamise selguse huvides piirdatakse kokkuvõttes tabelis 10 ainult modelleerimise alghetkel leitud dooside väärtuste väljatoomisega, sest doosid alghetkel ja ühe aasta möödudes erinevad üksteisest maksimaalselt 99,7%.

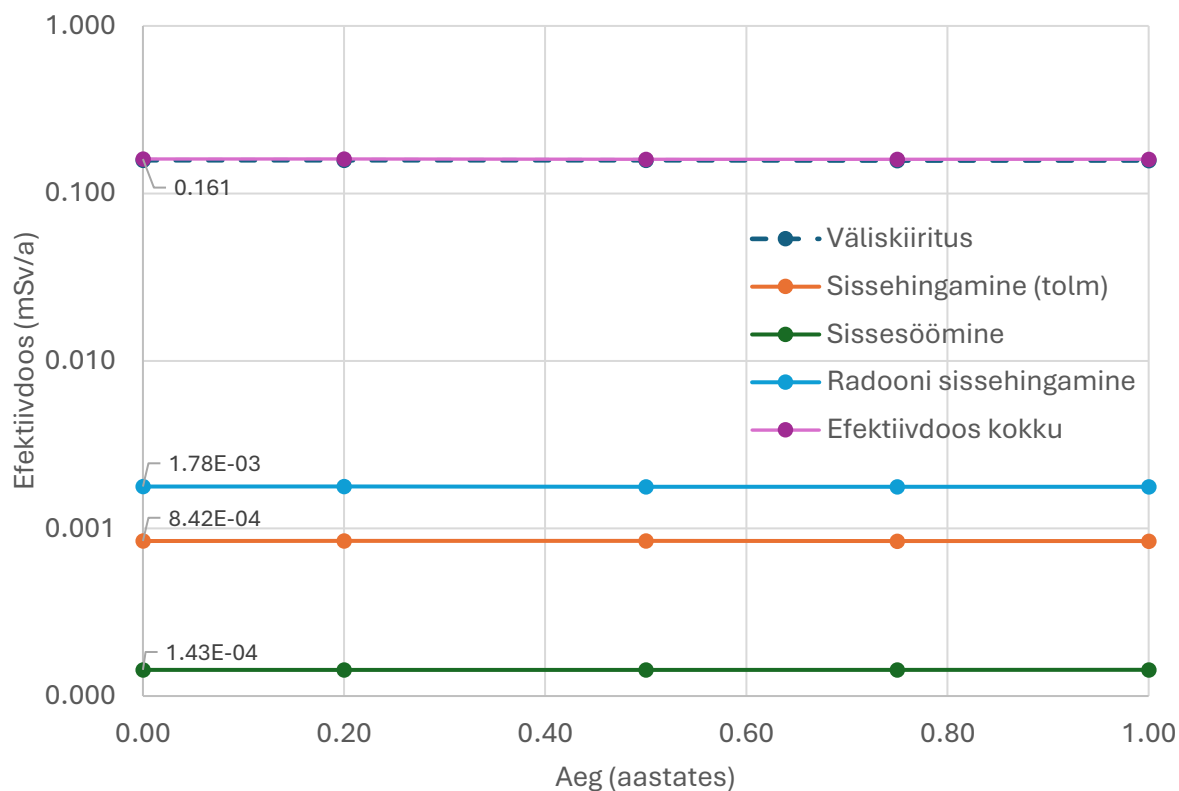
Baasstsenaariumi B1 summaarne efektiivdoos – 0,16 mSv/a – jääb allapoole NORM'i väljaarvamise piirmäära 1 mSv/a.

Joonisel 3(b) ja tabelis 6(b) esitatud alternatiivstsenaarium A1 erineb baasstsenaariumist B1 töötundide arvu poolest. Alternatiivstsenaariumis eeldati neli korda pikemat välitööde perioodi. Ka alternatiivstsenaariumi puhul jääb domineerivaks kiiritusrajaks väliskiiritus. Summaarne efektiivdoos – 0,6 mSv/a – on väiksem kui NORM'i väljaarvamise piirmäär 1 mSv/a. Isegi juhul, kui graptoliitargilliidi kogus maapinnal oleks kaks korda suurem (hõlmaks enda alla pindala 108 m²), jääks efektiivdoos lubatud piiridesse (vt alternatiivstsenaarium A2 tabelis 10).

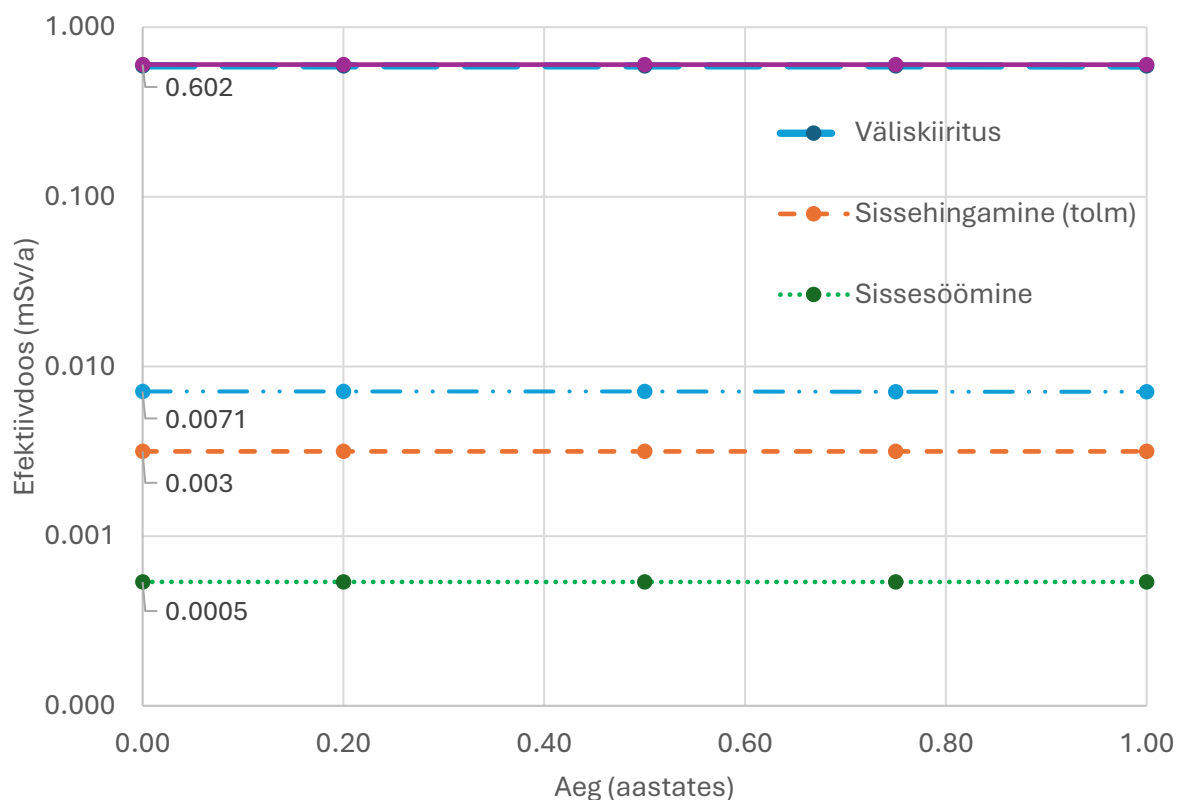
4.1.2. Fosforiit välitingimustes

Fosforiidist põhjustatud efektiivdoosi hinnangu baasstsenaariumi (B2) tulemused välitingimustes on kokku võetud tabelis 7(a). Taas on kõige olulisem kiiritusrada väliskiiritus. Summaarne efektiivdoos jääb tugevalt alla 1 mSv. Sama järelduseni jõuame ka alternatiivstsenaariumi A3 puhul, kus eeldatakse neli korda pikemat välitööde kestvust (tabel 7(b)).

Reaalsuses tuleb arvestada, et välitingimustes on korraga esindatud nii graptoliitargilliit kui fosforiit. Seetõttu on summaarne doos välitingimustes graptoliitargilliidi ja fosforiidi dooside summa: kahe kuu pikkuse välitöö puhul 0,16 mSv (baasstsenaariumid B1 + B2); kaheksa kuu pikkuse välitöö korral 0,7 mSv/a (alternatiivstsenaariumid A1 + A3). Graptoliitargilliidist ja fosforiidist põhjustatud efektiivdooside summa jääb allapoole NORM'i väljaarvamise piirmäära.



(a) Baasstsenaarium B1 – välitööd kestavad 2 kuud.



(b) Alternatiivstsenaarium A1 – välitööd kestavad 8 kuud.

Joonis 3. Graptoliitargilliit välitingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus ühe aasta jooksul.

Tabel 6. Graptoliitargilliit välitingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus ühe aasta jooksul.

(a) Baasstsenaarium B1 – välitööd kestavad 2 kuud.

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	1.58E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.78E-03	0.011	0.161
0.20	1.58E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.78E-03	0.011	0.160
0.50	1.58E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.78E-03	0.011	0.160
0.75	1.57E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.78E-03	0.011	0.160
1.00	1.57E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.77E-03	0.011	0.160
Ajaline erinevus doos(t=1)/doos(t=0)	0.997		1.000		1.001		0.997		0.997

(b) Alternatiivstsenaarium A1 – välitööd kestavad 8 kuud.

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	5.92E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.38E-04	0.001	7.12E-03	0.012	0.602
0.20	5.91E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.37E-04	0.001	7.12E-03	0.012	0.602
0.50	5.91E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.37E-04	0.001	7.11E-03	0.012	0.602
0.75	5.91E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.37E-04	0.001	7.10E-03	0.012	0.601
1.00	5.90E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.37E-04	0.001	7.10E-03	0.012	0.601
Ajaline erinevus doos(t=1)/doos(t=0)	0.998		1.000		0.999		0.997		0.998

Tabel 7. Fosforiit välitingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus ühe aasta jooksul.

(a) Baasstsenaarium B2 – välitööd kestavad 2 kuud.

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.77E-04	0.023	0.025
0.20	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.76E-04	0.023	0.025
0.50	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.76E-04	0.023	0.025
0.75	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.75E-04	0.023	0.025
1.00	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.75E-04	0.023	0.025
Ajaline erinevus doos(t=1)/doos(t=0)	0.997		1.000		1.001		0.997		0.997

(b) Alternatiivstsenaarium A3 – välitööd kestavad 8 kuud.

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	9.05E-02	0.993	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.88E-10	0.000	0.091
0.20	9.04E-02	0.993	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.88E-10	0.000	0.091
0.50	9.03E-02	0.993	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.88E-10	0.000	0.091
0.75	9.03E-02	0.993	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.87E-10	0.000	0.091
1.00	9.02E-02	0.993	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.87E-10	0.000	0.091
Ajaline erinevus doos(t=1)/doos(t=0)	0.997		1.000		1.000		0.997		0.997

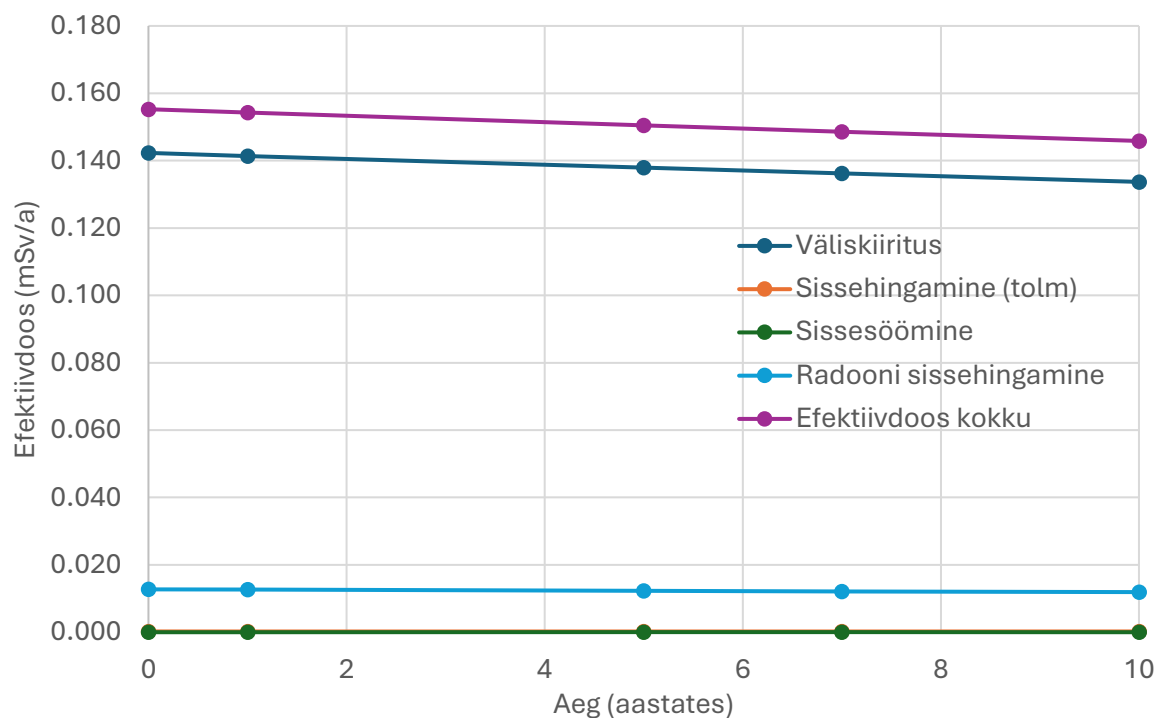
4.2. Materjali hoiustamine Arbavere uurimiskeskuses

4.2.1. Graptoliitargilliit sisetingimustes

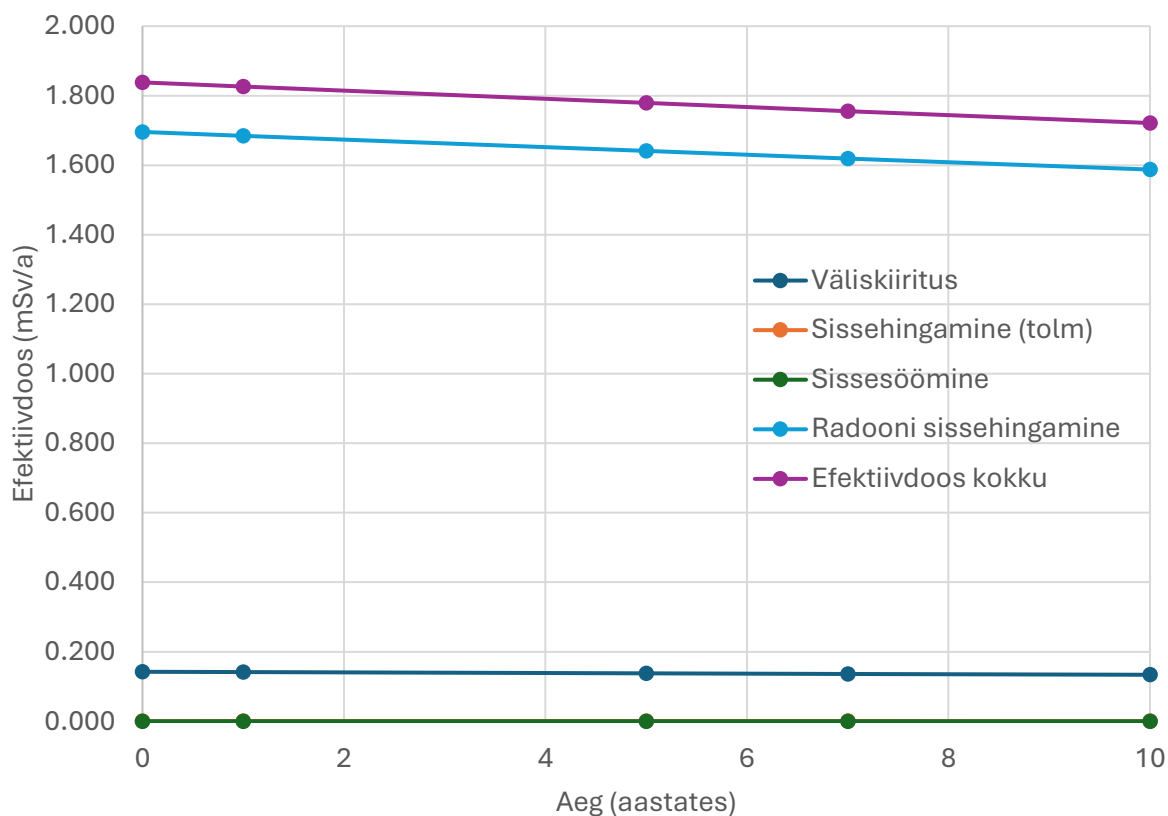
Graptoliitargilliidist põhjustatud efektiivdoosi hinnangu baasstsenaariumi (B3) tulemused sisetingimustes on kujutatud joonisel 4(a), arvväärtused on esitatud tabelis 8(a). Kümne aasta pikkuse perioodi jooksul on juba tuvastatav väike langus doosi väärtustes seoses radionukliidide radioaktiivse lagunemisega, kuid see ei oma kiirguskaitse vaatepunktist olulist efekti. Seega esitame ka kümne aasta pikkuse perioodi modelleerimise korral tabelis 10 vaid alghetke dooside väärtused.

Analoogselt välitingimustega on suures siseruumis (640 m^2) kõige olulisem kiiritusrada väliskiiritus. Graptoliitargilliidis sisalduva Ra-226 radioaktiivsel lagunemisel tekkiv gaasiline Rn-222 suurendab siseõhu radoonisisaldust 5 Bq/m^3 võrra. Selline siseõhu radoonisisalduse muutus on vaevu detekteeritav. Summaarne aastane efektiivdoos – $0,155 \text{ mSv}$ – jääb allapoole NORM'i väljaarvamise piirmäära 1 mSv .

Väikese hoiuruumi puhul, mida on kujutatud alternatiivstsenaariumina A4, on doosihinnangu tulemused oluliselt erinevad (vt joonis 4(b), tabel 8(b)). Sellises olukorras kujuneb kõige olulisemaks kiiritusrajaks radooni sissehingamine. Väikeses siseruumis, kus graptoliitargilliidiga täidetud BigBag kotid võtavad enda alla 25% ruumi põrandast, põhjustab radooni sissehingamine 92,2% summaarsest efektiivdoosist. Juba ainuüksi radoonist põhjustatud doos – $1,7 \text{ mSv/a}$ – ületab NORM'i väljaarvamise doosipiirmäära. Radooni kontsentratsiooni vähendab efektiivselt ruumi õhuvahetuse parandamine. Ruumi õhuvahetuse kiiruse suurendamine väärtuseni 1 h^{-1} võimaldab efektiivdoosi tuua NORM'i väljaarvamise piirmäära tasemeni (alternatiivstsenaarium A5).



(a) Baasstsenaarium B3 – BigBag kotid Arbavere hoidlas (ruumi kõrgus 4 m, pindala 640 m²).



(b) Alternatiivstsenaarium A4 – BigBag kotid väiksemas ruumis (ruumi kõrgus 2,5 m, pindala 8 m²).

Joonis 4. Graptoliitargilliit sisetingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus kümne aasta jooksul.

Tabel 8. Graptoliitargilliit sisetingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus kümne aasta jooksul.

(a) Baasstsenaarium B3 – BigBag kotid Arbavere hoidlas (ruumi kõrgus 4 m, pindala 640 m²).

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	1.42E-01	0.916	2.36E-04	0.002	5.31E-06	0.000	1.27E-02	0.082	0.155
1.00	1.41E-01	0.916	2.35E-04	0.002	5.28E-06	0.000	1.26E-02	0.082	0.154
5.00	1.38E-01	0.917	2.34E-04	0.002	5.35E-06	0.000	1.23E-02	0.082	0.150
7.00	1.36E-01	0.917	2.34E-04	0.002	5.38E-06	0.000	1.22E-02	0.082	0.149
10.00	1.34E-01	0.917	2.33E-04	0.002	5.42E-06	0.000	1.19E-02	0.082	0.146
Ajaline erinevus doos(t=10)/doos(t=0)	0.940		0.988		1.021		0.936		0.939

(b) Alternatiivstsenaarium A4 – BigBag kotid väiksemas ruumis (ruumi kõrgus 2,5 m, pindala 8 m²).

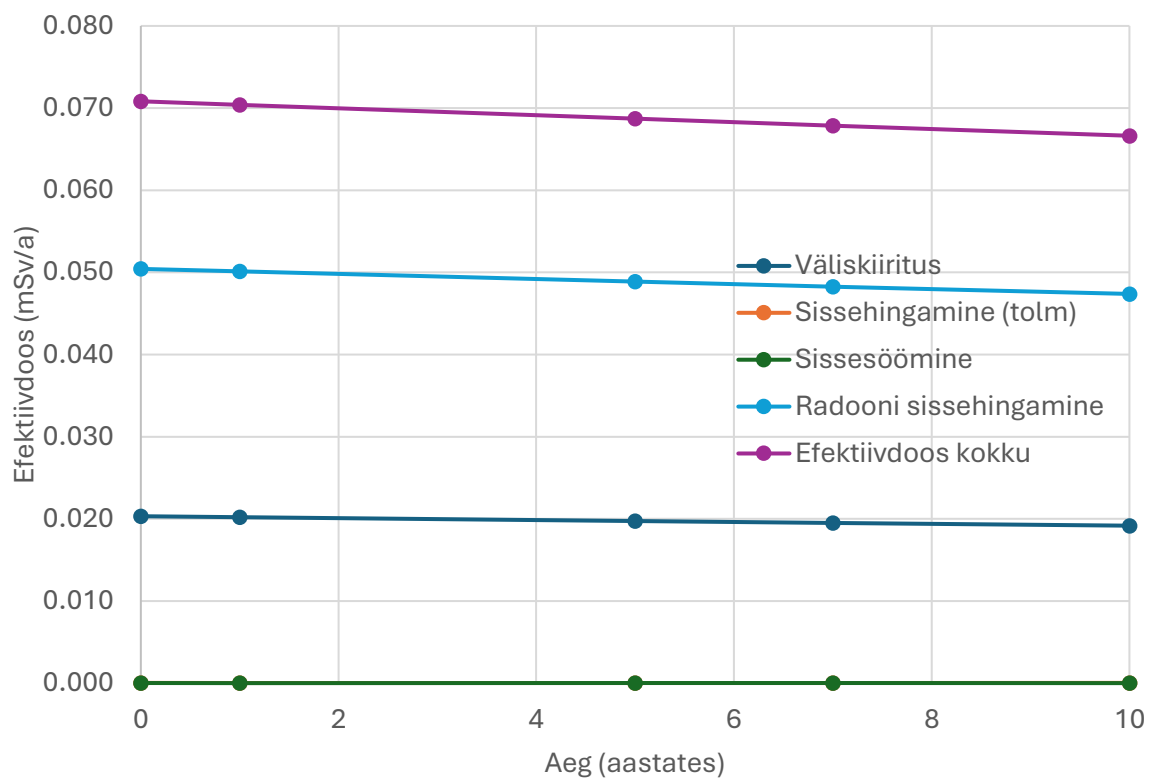
Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	1.42E-01	0.077	2.36E-04	0.000	5.31E-06	0.000	1.70E+00	0.922	1.838
1.00	1.41E-01	0.077	2.35E-04	0.000	5.28E-06	0.000	1.68E+00	0.922	1.826
5.00	1.38E-01	0.078	2.34E-04	0.000	5.35E-06	0.000	1.64E+00	0.922	1.779
7.00	1.36E-01	0.078	2.34E-04	0.000	5.38E-06	0.000	1.62E+00	0.922	1.756
10.00	1.34E-01	0.078	2.33E-04	0.000	5.42E-06	0.000	1.59E+00	0.922	1.721
Ajaline erinevus doos(t=10)/doos(t=0)	0.940		0.988		1.021		0.936		0.936

4.2.2.Fosforiit sisetingimustes

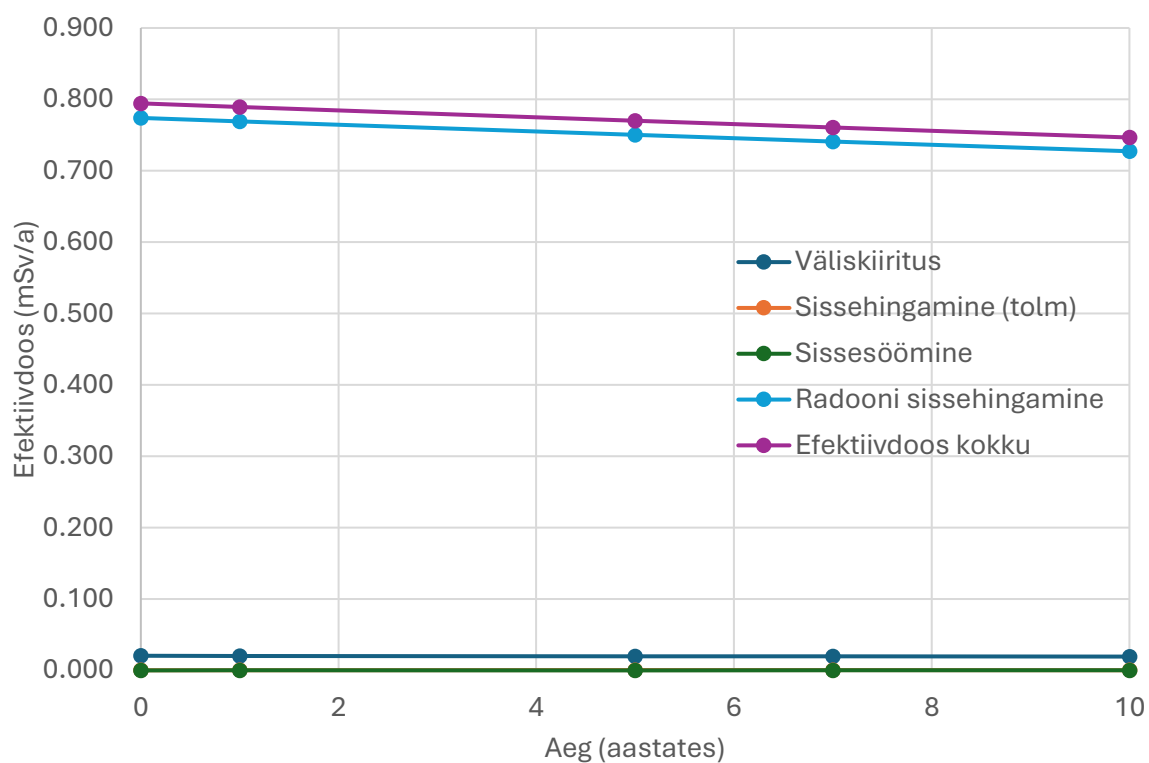
Fosforiidist põhjustatud efektiivdoosi hinnangu baasstsenaariumi (B4) tulemused sisetingimustes on kujutatud joonisel 5(a), arvväärtused on esitatud tabelis 9(a). Kõige olulisem kiiritusrada on radooni sissehingamine põhjustades 71,2% summaarsest efektiivdoosist. Summaarne efektiivdoos – 0,071 mSv/a – jääb alla NORM'i väljaarvamise piirmäära 1 mSv.

Alternatiivstsenaariumina (A6) analüüsiti hoiustamist väiksemas ruumis, kus fosforiidiga täidetud BigBag kotid võtavad enda alla 75% ruumi põranda pinnast (joonis 5(b), tabel 9(b)). Taas on kõige olulisem kiiritusrada radooni sissehingamine, mis põhjustab 97,4% summaarsest efektiivdoosist. Siiski jääb efektiivdoos alla 1 mSv piiri. Samas tasub silmas pidada, et halva ventilatsiooni korral (õhuvahetus $0,25\text{ h}^{-1}$, vt alternatiivstsenaarium A7 tabelis 10) võib ka fosforiit siseruumis põhjustada nii kõrge radoonisisalduse, et saadav doos ületab NORM'i väljaarvamise piirmäära 1 mSv.

Materjali sisetingimustes hoiustamise baasstsenaariumite analüüs näitab, et Arbavere hoidla puhul ei ole vajadust kehtestada piiranguid graptoliitargilliidi ja fosforiidi hoiustamisele samas ruumis. Samas hoidlas hoiustamise korral oleks graptoliitargilliidist ja fosforiidist saadav doos kokku 0,23 mSv/a.



(a) Baasstsenaarium B4 – BigBag kotid Arbavere hoidlas (ruumi kõrgus 4 m, pindala 640 m²).



(b) Alternatiivstsenaarium A6 – BigBag kotid väiksemas ruumis (ruumi kõrgus 2,5 m, pindala 67 m²).

Joonis 5. Fosforiit sisetingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus kümne aasta jooksul.

Tabel 9. Fosforiit sisetingimustes: erinevate kiiritusradade põhjustatud efektiivdoos ning selle muutus kümne aasta jooksul.

(a) Baasstsenaarium B4 – BigBag kotid Arbavere hoidlas (ruumi kõrgus 4 m, pindala 640 m²).

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	2.03E-02	0.287	4.78E-05	0.001	1.91E-05	0.000	5.04E-02	0.712	0.071
1.00	2.02E-02	0.287	4.77E-05	0.001	1.90E-05	0.000	5.01E-02	0.712	0.070
5.00	1.98E-02	0.287	4.75E-05	0.001	1.92E-05	0.000	4.89E-02	0.712	0.069
7.00	1.95E-02	0.288	4.74E-05	0.001	1.94E-05	0.000	4.83E-02	0.711	0.068
10.00	1.92E-02	0.288	4.72E-05	0.001	1.95E-05	0.000	4.74E-02	0.711	0.067
Ajaline erinevus doos(t=10)/doos(t=0)	0.943		0.989		1.022		0.940		0.941

(b) Alternatiivstsenaarium A6 – BigBag kotid väiksemas ruumis (ruumi kõrgus 2,5 m, pindala 67 m²).

Aeg (a)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
0.00	2.03E-02	0.026	4.78E-05	0.000	1.91E-05	0.000	7.74E-01	0.974	0.794
1.00	2.02E-02	0.026	4.77E-05	0.000	1.90E-05	0.000	7.69E-01	0.974	0.789
5.00	1.98E-02	0.026	4.75E-05	0.000	1.92E-05	0.000	7.50E-01	0.974	0.770
7.00	1.95E-02	0.026	4.74E-05	0.000	1.94E-05	0.000	7.41E-01	0.974	0.761
10.00	1.92E-02	0.026	4.72E-05	0.000	1.95E-05	0.000	7.27E-01	0.974	0.747
Ajaline erinevus doos(t=10)/doos(t=0)	0.943		0.989		1.022		0.940		0.940

Tabel 10. Kokkuvõte erinevatest doosihinnangu stsenaariumitest.

Stsenaariumi nr ja kirjeldus		Radooni aktiivsus- kontsentratsioon (Bq/m ³)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
B1	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit välitingimustes, tööd kestavad 2 kuud	0.83	1.58E-01	0.983	8.42E-04	0.005	1.43E-04	0.001	1.78E-03	0.011	0.16
A1	Alternatiivstsenaarium: Graptoliitargilliit välitingimustes, tööd kestavad 8 kuud	0.83	5.92E-01	0.982	3.16E-03	0.005	5.38E-04	0.001	7.12E-03	0.012	0.60
A2	Alternatiivstsenaarium: Graptoliitargilliit välitingimustes, tööd kestavad 8 kuud, 2 korda suurem ala	2.18	6.47E-01	0.965	3.40E-03	0.005	1.08E-03	0.002	1.87E-02	0.028	0.67
B2	Baasstsenaarium: Fosforiit välitingimustes, tööd kestavad 2 kuud	0.27	2.41E-02	0.970	1.27E-04	0.005	3.43E-05	0.001	5.77E-04	0.023	0.02
A3	Alternatiivstsenaarium: Fosforiit välitingimusest, tööd kestavad 8 kuud	0.27	9.05E-02	0.969	4.77E-04	0.005	1.29E-04	0.001	2.31E-03	0.025	0.09
B1+B2	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit + fosforiit välitingimustes	1.10	1.82E-01	0.981	9.69E-04	0.005	1.78E-04	0.001	2.36E-03	0.013	0.19
A1+A3	Alternatiivstsenaarium: Graptoliitargilliit + fosforiit välitingimustes	1.10	6.82E-01	0.980	3.63E-03	0.005	6.66E-04	0.001	9.43E-03	0.014	0.70

Stsenaariumi nr ja kirjeldus		Radooni aktiivsus- kontsentratsioon (Bq/m ³)	Väliskiiritus (mSv/a)	Osakaal	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Osakaal	Sissesöömine (mSv/a)	Osakaal	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Osakaal	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
B3	Baasstsenaarium: graptoliitargilliit sisetingimustes, Arbavere hoidla	5.40	1.42E-01	0.916	2.36E-04	0.002	5.31E-06	0.000	1.27E-02	0.082	0.155
A4	Alternatiivstsenaarium: Graptoliitargilliit sisetingimustes, väiksem ruum	719.02	1.42E-01	0.077	2.36E-04	0.000	5.31E-06	0.000	1.70E+00	0.922	1.84
A5	Alternatiivstsenaarium: Graptoliitargilliit sisetingimustes, väiksem ruum, õhuvahetuse kiirus 1 h ⁻¹	362.21	1.42E-01	0.143	2.36E-04	0.000	5.31E-06	0.000	8.54E-01	0.857	1.00
B4	Baasstsenaarium: Fosforiit sisetingimustes, Arbavere hoidla	21.38	2.03E-02	0.287	4.78E-05	0.001	1.91E-05	0.000	5.04E-02	0.712	0.07
A6	Alternatiivstsenaariumi: Fosforiit sisetingimustes, väiksem ruum	328.19	2.03E-02	0.026	4.78E-05	0.000	1.91E-05	0.000	7.74E-01	0.974	0.79
A7	Alternatiivstsenaarium: Fosforiit sisetingimustes, väiksem ruum, õhuvahetuse kiirus 0,25 h ⁻¹	646.70	2.03E-02	0.013	4.78E-05	0.000	1.91E-05	0.000	1.53E+00	0.987	1.55
B3+B4	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit + fosforiit siseruumis	26.78	1.63E-01	0.719	2.83E-04	0.001	2.44E-05	0.000	6.32E-02	0.279	0.23

5. Järeldused ja soovitused

Doosihinnangu baas- ja alternatiivstsenaariumid näitavad, et **välitingimustes ei ületata graptoliitargilliidi ega fosforiidi käitlemisel NORM'i väljaarvamise doosipiirmäära 1 mSv/a.** Välitingimustes on peamine kiiritusrada väliskiiritus. Analüüsi teostamisel on eeldatud, et materjal ei tolma olulisel määral. Tugevalt tolmava materjali puhul võivad siiski hakata doosi põhjustama ka osakeste sissehingamine ja tahtmatu allaneelamine. Tolmava materjaliga töötades on otstarbekas kanda respiraatorit. Võimalusel võib materjali niisutada tolmamise vähendamiseks.

Sisetingimuste baasstsenaariumite tulemused näitavad, et **efektiivdoos, mille töötajad võivad saada graptoliitargilliidi ja fosforiidi hoiustamisel Arbavere hoidlas, ei ületata NORM'i väljaarvamise doosipiirmäära 1 mSv/a.** Suures ruumis (640 m²) on kõige olulisem kiiritusrada graptoliitargilliidi puhul on väliskiiritus. Fosforiidist põhjustatud doos on üle kahe korra väiksem kui graptoliitargilliidist põhjustatud doos. Fosforiidi puhul on domineerivaks kiiritusrajaks materjalis sisalduva raadium-226 lagunemisel tekkiva radoon-222 sissehingamine.

Sisetingimuste alternatiivstsenaariumid

Väiksemates hoiuruumides, mida on modelleeritud alternatiivstsenaariumites A4-A7, kujuneb nii graptoliitargilliidi kui fosforiidi korral kõige olulisemaks kiiritusrajaks radooni sissehingamine. Graptoliitargilliidi puhul on väikeses ruumis kerge tekkima olukord, kus radoonisisaldus siseõhus ületab tunduvalt viitetaset 300 Bq/m³ ning põhjustab doosi üle 1 mSv/a. See olukord ei ole välistatud ka siis, kui väikeses siseruumis hoiustatakse suuri fosforiidi koguseid, kuigi uraanirea radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid fosforiidis ei küündi väljaarvamistasemeteni. Radooni kontsentratsiooni siseõhus aitab tõhusalt vähendada õhuvahtuse suurendamine. Kui laoruumides, kus graptoliitargilliidi ja fosforiidi proove hoiustatakse, ei ole võimalik pidevalt ventilatsiooni sees hoida, oleks hea praktika ruumid enne töö algust korralikult ära õhutada. Ideaalne lahendus oleks enne ruumis tööle asumist mõõta radoonimonitoriga ära siseõhu radoonisisaldus ning õhutada ruumi, kuni Rn-222 sisaldus langeb väärtuseni 300 Bq/m³ või alla selle. Sobiv aparatuur on radooni kontsentratsiooni jälgimiseks lühiajalisel skaalal on näiteks AlphaGuard (tootja Bertin Technologies, <https://www.bertin-technologies.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>) või odavam alternatiiv RadonEye (tootja Ecosense <https://ecosense.io/pages/radoneye>). Aparatuuri võiks mõõtmiseks paigutada asukohta, kus inimene hiljem tööle asub.

Alternatiivne lahendus efektiivdoosi vähendamiseks on vähendada tööaega potentsiaalselt kõrge radoonisisaldusega ruumis. Sisetingimuste doosihinnangu stsenaariumid eeldasid, et proovide hoiuruumides viibitakse aastaringselt keskmiselt kaheksa tundi nädala kohta. Kui tegelikult on töö võimalik ära teha poole lühema ajaga, ei olegi ruumide korralik ventileerimine enne töö algust kriitilise tähtsusega.

Ka siseruumides on asjakohane tähelepanu pöörata materjali tolmamisele. Tolmava materjaliga töötades kanda respiraatorit, et minimeerida tahkete osakeste sissehingamisest ja allaneelamisest põhjustatud doosi.

6. Kokkuvõte

Doosihinnangu baasstsenaariumid väli- ja sisetingimustes annavad kinnitust, et graptoliitargilliidi ja fosforiidi käitlemiseks ning hoiustamiseks FIONA uuringu raames ei ole kiirgustegevusluba vaja. Hoolimata sellest, et uraan-238 lagunemisrea radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid graptoliitargilliidis ületavad väljaarvamistaseme väärtusi, jääb materjalist põhjustatud efektiivdoos allapoole NORM'i väljaarvamise piirmäära 1 mSv (vt tabel 11).

Tabel 11. Doosihinnangu baasstsenaariumid.

Stsenaariumi nr ja kirjeldus		Väliskiiritus (mSv/a)	Sisse- hingamine (tolm) (mSv/a)	Sisse- söömine (mSv/a)	Radooni sisse- hingamine (mSv/a)	Efektiivdoos kokku (mSv/a)
B1	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit välitingimustes, tööd kestavad 2 kuud	0.158	8.42E-04	1.43E-04	0.002	0.16
B2	Baasstsenaarium: fosforiit välitingimustes, töö kestavad 2 kuud	0.024	1.27E-04	3.43E-05	0.001	0.02
B1+B2	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit + fosforiit välitingimustes	0.182	9.69E-04	1.78E-04	0.002	0.19
B3	Baasstsenaarium: graptoliitargilliit sisetingimustes, Arbavere hoidla	0.142	2.36E-04	5.31E-06	0.013	0.16
B4	Baasstsenaarium: Fosforiit sisetingimustes, Arbavere hoidla	0.020	4.78E-05	1.91E-05	0.050	0.07
B3+B4	Baasstsenaarium: Graptoliitargilliit + fosforiit siseruumis	0.163	2.83E-04	2.44E-05	0.063	0.23

7. Kasutatud kirjandus

Argonne National Laboratory, 2001. User's Manual for RESRAD Version 6. Environmental Assessment Division Argonne National Laboratory, ANL/EAD-4.

Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.), European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

Eesti Geoloogiateenistus, 2023. Exploration of phosphorite and black shale in North-Eastern Estonia / EGF 9594.

Eesti Geoloogiateenistus, 2024. FIONA uuringu üldgeoloogilise uurimistöö loa taotlus ja seletuskiri.

IAEA, 2013. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. Technical Reports Series No. 474.

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

Keskkonnaministri määrus nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“. Vastu võetud 30.07.2018, redaktsiooni jõustumise kuupäev 16.07.2023. <https://www.riigiteataja.ee/akt/113072023061>

Keskkonnaministri määrus nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“. Vastu võetud 30.07.2018, redaktsiooni jõustumise kuupäev 16.07.2023. <https://www.riigiteataja.ee/akt/113072023061?leiaKehtiv>

Keskkonnaministri määrus nr 40 „Kiirgustegevuses kasutatavate või tekkivate radioaktiivsete ainete väljaarvamise ja vabastamise tingimused ning väljaarvamise ja vabastamise taotlusele esitatavad nõuded“. Vastu võetud 25.08.2021, redaktsiooni jõustumise kuupäev 30.08.2021. <https://www.riigiteataja.ee/akt/127082021006>

Kiirgusseadus. Vastu võetud 08.06.2016, Redaktsiooni jõustumise kuupäev 01.07.2023. <https://www.riigiteataja.ee/akt/130062023026>

Ujic' et al., 2010. „Internal exposure from building materials exhaling ^{222}Rn and ^{220}Rn as compared to external exposure due to their natural radioactivity content“, Applied Radiation and Isotopes 68 (2010), pp 201–206 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.10.003>