



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

RADOON JA SELLE MÕJU VÄHENDAMISE MEETMED

RADON AND MEASURES FOR ITS IMPACT REDUCTION

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Alo Toom

Üliõpilaskood 164201KAKB

Juhendaja: Marina Trapido, professor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“..31..” .mai..... 2021.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“..01.” ..juuni..... 2021..

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“..01.”.juuni....2021... .

Kaitsmiskomisjoni esimees Marina Trapido.....

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina

Alo Toom sündinud 05.12.1996

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose , „Radoon ja selle mõju vähendamise meetmed“

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Marina Trapido,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ *(allkiri)*

_____ *(kuupäev)*

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Alo Toom (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peaariala: KAKB02/14 Keemia- ja keskkonnakaitse tehnoloogia
(kood ja nimetus)

Juhendaja(d): professor, Marina Trapido, 620 2855 (amet, nimi, telefon)

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Radoon ja selle mõju vähendamise meetmed

(inglise keeles) Radon and measures for its impact reduction

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaate radooni põhiomadustest
2. Tuua esile radooniga seotud terviseriskid ja keskkonnaprobleemid
3. Analüüsida radooni mõju vähendamise meetmeid sh radooni eemaldamine põhjaveest ning ehituslikud tõkestusmeetodid

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjandusega tutvumine ja selle analüüs	12.03.2021
2.	Tulemuste analüüs, bakalaureusetöö kirjutamine	30.04.2021
3.	Lõputöö viimistlemine (eesti ja inglise keelsed kokkuvõtted, vormistus)	20.05.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: ".01.."..juuni...2021.a

Üliõpilane: Alo Toom ".08.".jaanuar..2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Marina Trapido "..08.."..jaanuar...2021.a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....202....a
/allkiri/

Programmijuht: Marina Trapido "..08.".jaanuar..2021.a
/allkiri/

SISUKORD

1	SISSEJUHATUS.....	6
2	KIIRGUSE LIIGID.....	7
2.1	Kiirgusest üldiselt	7
2.2	Radioaktiivse kiirguse liigid	8
3	RADOONI OLEMUS. KEEMILISED- JA FÜÜSIKALISED OMADUSED.....	10
3.1	Keemilised- ja füüsilised omadused	10
3.1	Radoon Eestis.....	12
4	RADOONIST TULENEV TERVISERISK.....	14
4.1	Radoon põhjavees.....	14
4.1.1	Radooni eraldamine joogiveest.....	16
4.2	Radooni koosmõju suitsetamisega	19
5	RADOONI MÕÕTMINE	21
5.1	Radooni mõõtmine otse pinnasest või pinnaseõhust.....	22
5.2	Radoonitaseme mõõtmine siseruumides.....	23
6	EHITUSLIKUD TÕKESTUSMEETODID.....	24
6.1	Kuidas saab radoon majja.....	24
6.2	Tõkestusmeetmed radooniohu korral.....	25
6.2.1	Laialdasemalt kasutuselolevad tõkestusmeetmed.....	27
6.3	Kuidas valida õigete karakteristikutega radooni pumpa?.....	32
6.4	ERV ja HRV.....	32
7	KOKKUVÕTE.....	34
8	ABSTRACT	35
9	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	36

1 SISSEJUHATUS

Elu üheks osaks on kiirgus meid ümbritsevas keskkonnas. Kiirguseks nimetatakse energiavoogu või aineosakeste kogumit, mis levib elektromagnetlainete või osakestena keskkonnas – kiirgus on võimeline läbima ka erinevaid materjale ja kehasid. Kiirgused võib jagada kahte kategooriasse – tehislikud ja looduslikud. Tehislikest võib näidetena tuua röntgenkiirguse ja raadiolained. Looduslike kiirguste hulka kuulub kosmiline kiirgus ja valguskiirgus. Need on vaid vähesed näited kõikvõimalikest kiirgustest meie ümber. Kiirgused võivad põhjustada kahju erinevatele inimkudedele, aga võimalik kahju sõltub reeglina otseselt kehale või kehaosale mõjunud kiirguse suuruselt ehk **kiirgusdoosist**. Kiirgusdoosi alla kuuluvad absorbeerunud doos, ekvivalentdoos ja efektiivdoos.[1] Antud töös seisab põhiline rõhk ekvivalentdoosil, kuna ekvivalentdoosi abil on sätestatud kõik piirmäärad ning normid kiirguse suhtes.

Eestis esineb radooniga probleemi Põhja-Eesti rannikul ja kohati ka Tartumaal. Põhja-Eestis on oht tingitud aluskivimites olevast kivimist nimega argiilitgraptoliit ja Tartumaal kujutavad endast ohtu jääajal sinna uhutud sette kivimid.

Töö käigus selgitatakse välja mismoodi ja kust kohast tekib radoon ning kuidas on võimalik ennast kaitsta sellise loodusest pärineva kiirguse eest. Kuna pole võimalik end täielikult eraldada ümbritsevast kiirgusest, on väga tähtsale kohale asetatud ehituslikud tõkestusmeetodid ja aspektid, mille alusel teha valik õige tõkestusmeetodi kasuks. Ühtlasi tuleb juttu Eestis kiirguse suhtes kehtestatud seadustest ja piirnormidest.

2 KIIRGUSE LIIGID

2.1 Kiirgusest üldiselt

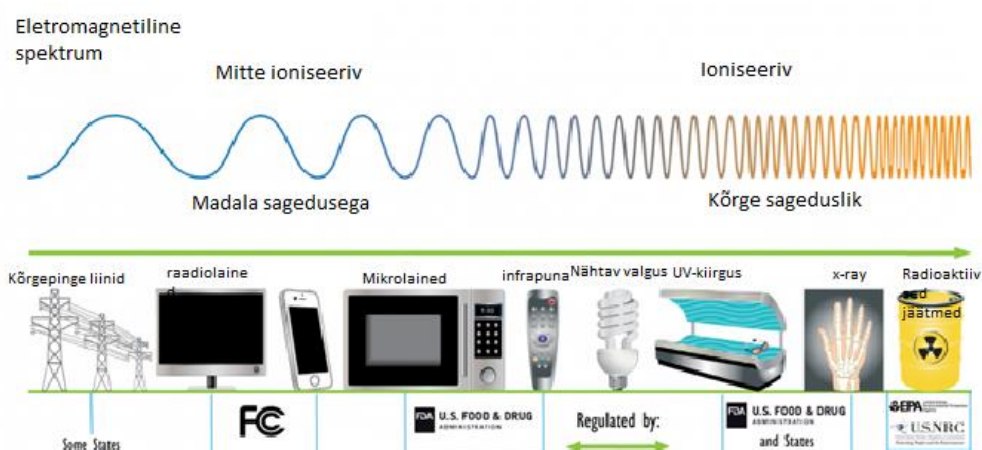
Kiirgus eksisteerib kõikjal meie ümber. Neeldunud kiirguse kogust mõõdetakse doosides. Üks ekvivalentdoos on mõõteks kiirguse kogusele koele, mille neeldumise korral on võimalikud ioniseerivast kiirgusest põhjustatud erinevad bioloogilised mõjud.[2] Kiirgus on üks paljudest energialiikidest. Kiirgus tekib tehislikult või materjalide radioaktiivse lagunemise tulemusena.

Veel võib jaotada kiirguse kaheks – mitteioniseerivaks ja ioniseerivaks kiirguseks.

Esimese juhu puhul kiirgusega kokkupuutel on võimalik, et aatomid molekulis vahetavad oma asukohta või hakkavad võnkuma. Näidetena igapäevaelust võib tuua esile raadiolained, mikrolained ja inimsilmale nähtav valgus. Mitteioniseeriv kiirgus ei kahjusta kudesid, aga pikem kokkupuude võib kahjustada nahka ja silmi.

Ioniseeriv kiirgus on niivõrd energiarikas, et on suuteline lööma elektrone aatomitest välja. Elektronide väljumisel aatomist saab aatom laengu ehk ioniseerub, millest tulenebki nimi ioniseeriv kiirgus. Ioniseeriva kiirguse ohtlikkus seisneb aspektis, et kokkupuutel eelnevalt mainitud kiirgusega on tehtud kahju elusorganismide sisemistele kudedele ja DNA'le geenides. Looduslikult tekib ioniseeruv kiirgus radioaktiivsete ainete lagunemisel.[3][4]

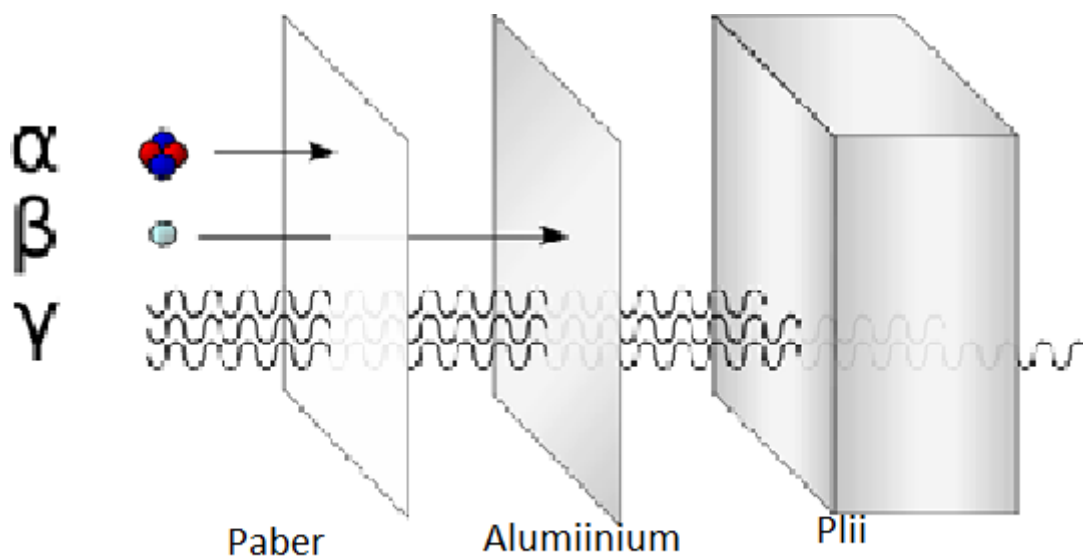
Erinevaid kiirgusi kirjeldab lähemalt järgnev joonis 1.



Joonis 1. Elektromagnetiline spektrum.[modifitseeritud 58]

2.2 Radioaktiivse kiirguse liigid

Üldvõttes jaotatakse kiirgused kaheks – looduslikult tekkinud kiirgused (radioaktiivsetest materjalidest) ja tehiskult esile kutsutud kiirgus ehk röntgenkiirgus. Looduslik radioaktiivne kiirgus jaguneb neljaks - α -, β -, γ - ning neutronkiirgus (joonis 2).



Joonis 2. Radioaktiivsete osakeste läbistamisvõime. [modifitseeritud, 59]

Alfakiirgus eraldub aine radioaktiivsel lagunemisel ning koosneb heeliumi positiivsetest laengutuumadest. Laengu ja massi olemasolust tulenevalt ei levi alfaosakesed kaugemale kui paar sentimeetrit läbi õhu. Üldiselt ei ole alfakiirgus ohtlik, aga oht tekib, kui sissehingamisel esineb õhus alfaosakesi, mille sissehingamise tulemusena võivad kopsud või sisekoed saada suure kiirgusdoosi.[3]

Beetakiirguse osakesed on väga väikesed suure kiirgusega levivad osakesed, mis omavad negatiivset laengut ja eralduvad aatomituumast radioaktiivse lagunemise vältel. Taolisi osakesi kiirgavad ebastabiilsed aatomid. Näitena võib tuua tritiumi, süsiniku massinumbriga 14 (C-14) ning strontsiumi.

Gammaosakesed on kaaluta energia kogumikud. Gammaosakeste ja alfa- ning beetaosakeste peamine erinevus seisneb selles, et gammaosakestel puudub laeng ja mass – tegemist on puhta energiaga. Gammakiired sarnanevad nähtava valgusega,

ent omavad palju suuremat kogust energiat. Tihtipeale eraldub koos gammakiirgusega ka alfa- ja beetaosakesi. Gammakiirgus on väga suure läbistavusega ning on võimeline läbistama tervet inimese keha, mille tulemusena saavad kahjustada koed ning DNA. Sellise kiirguse eest sobib varjestuseks vaid mitme sentimeetri paksune pliiikiht või betooni kaitsev sein.[3]

Neutronkiirguse puhul on tegemist protsessiga, mis võimaldab muuta vastava kiirgusega kokkupuutel asju radioaktiivseks. Suure läbistatavuse tõttu teiste materjalide suhtes on neutrokiirguse vastu sobilik kaitse ainete/materjalide näol, mis sisaldavad suurtes kogustes vesinikku.[69] Kaitset pakub näiteks paks betoonikiht või vesi.[69]

3 RADOONI OLEMUS. KEEMILISED- JA FÜÜSIKALISED OMADUSED

Radoon esineb looduses gaasilise aienena ja kuulub vääriskaaside hulka. Sulamistemperatuur on normaaltingimustel $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja keemistemperatuur on $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maksimaalne tihedus on väärtusega $4,4\text{ g/cm}^3$ temperatuuril -62°C . Radoon kiirgab intensiivselt 3 erinevat kiirgust – α -, β - ning γ –kiirgust, millest α -kiirgus levib kõige lähemal distantstil ja γ -kiirgus on kõige läbistavam ja ohtlikum.[5][6]

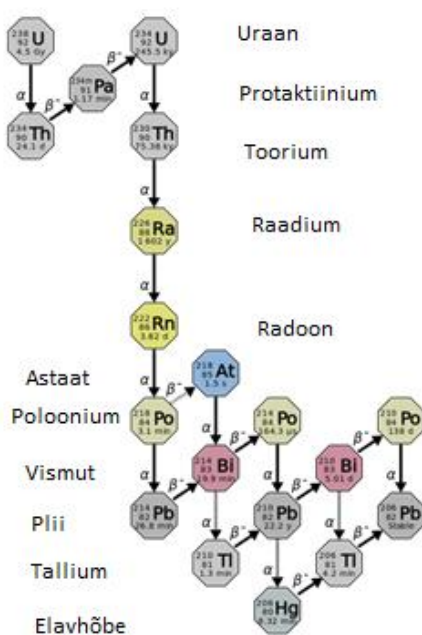
3.1 Keemilised- ja füüsikalised omadused

Radoon on keskkonnas esinev radioaktiivne gaas, millel puudub maitse, lõhn ning värvus. Radooni massiarv on 222 ja ta kuulub vääriskaaside klassi, mis tähendab, et tegemist on mittereageeriva aienega. Ühtlasi on tegemist looduses leiduva kõige suurema tihedusega gaasiga, mille tiheduseks on märgitud $9,73\text{ g/L}$. [6] Gaasi esineb looduslikus keskkonnas 3 isotoobina – aktinoonina (219), toroonina (220) ja radoonina (222), millest viimane on stabiilseim mainitutest. [7] Radooni teke saab alguse uraani looduslikust radioaktiivsest lagunemisest maapinnas. Uraani lagunemisel tekib raadium, millest omakorda lagunemise tulemusena eraldub tekkinud reaktsiooni käigus gaasiline radoon, mis oma suure levikuala tulemusena jõuab maapinnale ja hoonete siseruumidesse.

Nagu eelnevalt sai mainitud tekib radoon ümbritsevasse keskkonda raadiumi lagunemise tulemusena (joonis 3). Väga vähesel määral eksisteerib igal pool pinnakivimites uraani suurusjärgus $1 - 3\text{ ppm}$, mis tähendab, et iga $1\ 000\ 000$ osakese kohta eksisteerib kivimis $1 - 3$ uraani osakest. [7] Uraani sisaldus kivimites sõltub kivimi tüübist ning materjalist, näiteks vulkaanide purskamisel tekkinud kivimid, erinevad sette- ning moondekivimid - selliste kivimite uraanisisaldus võib olla kuni 100 korda suurem kui tavatingimustes olevatest kivimitest. [7]

Raadium laguneb alfa-osakesteks, mille aatomituumad koosnevad kahest neutronist ja kahest prootonist. Raadiumi tuuma lagunemisel tekib 2 komponenti – radooni tuum ja alfa-osake. Märkimisväärne on asjaolu, et lagunemisel pörkuvad alfa-osake ning radooni tuum üksteisest vastassuundadesse, mis etteruttavalt ongi põhjus radooni eraldumiseks raadiumist. [7] Omaette küsimus on, kas radoon pääseb mineraalide

pooride vahele, kustkaudu tal oleks võimalik tungida kivimitevahelistesse pragudesse. See sõltub asjaolust, kus kohas mineraali terakese sees toimus lagunemine ja kuhu suunda eraldus radooni tuum. Soodsatel tingimustel toimub lagunemine nii, et alfaosake liigub mineraalitera tuuma suunas samal ajal, kui radoon seetõttu pääseb mineraalist välja kivimitevahelistesse pragudesse.[7] Radooni väljumisel kivist on edasi võimalikud 2 valikut - suure eraldumise energia tõttu võib radooni aatom lennata kaugele ja kinnituda järgmise kivimi külge; teise võimalusena esineb olukord, kus kivimi poorides olev vesi aeglustab oluliselt radooni osakese liikumist ja tõenäoliselt jääb osake poori kinni.[7]



Joonis 3. Radooni teke raadiumist.[modifitseeritud 60]

Tänu oma gaasilisele olekule on radoon palju liikuvam maapõues, kui seda on raadium tahkel kujul. Radooni levikukaugus kui selline sõltub paljuski pinnase omadustest ja kas pinnas on uraanirikas või mitte. Tähendab, et uraanirohke pinnas ei kujuta endast ilmtingimata suurt levikuala ja vastupidi.

Üldjuhul kehtib reegel, mida poorsem ja väiksema tihedusega materjal, seda lihtsam on radoonil jõuda maa seest maapinnale. Väga heaks näiteks materjalide hulgast on kruus ja liiv, sest poore on palju ja õhk saab võrdlemisi vabalt liikuda.[7] Vastukaaluks raske läbitavusega on erinevad savid, mille loomulik niiskus ei lase levida radoonil vabalt.[7] Nagu eelnevalt sai mainitud, siis levib radoon paremini kuivades ja õhulistest

tingimustes. Niisketes tingimustes on radoon võimeline levima kuni 15 cm kaugusel samal ajal kui kuivades tingimustes võib radoon levida kuni 2 m kaugusele enne täielikku lagunemist.[7]

Lisaks eelnevale leidub radooni ka põhjavees, kuhu ta on sattunud raadiumi lagunemise käigus, ja looduslikes ehitusmaterjalides.

Radoonist eralduva kiirguse ohtlikkus seisneb asjaolus, et radioaktiivsete osakeste jõudmine inimorganismi põhjustab ioniseeriva efekti olemasolul rakumutatsioone. Mutatsioonide tekkel võib organism hakata üritama kahjustunud rakke parandada kas edukalt või edutult, mis võib omakorda viia rakkude tekke väljakaldumiseni normaalolukorrast. Protsessi lõppväljundiks on pahaloomuliste rakkude teke, mis viib välja vähi tekkeni organismis. [8]

Inimorganismi võib sattuda radoon kas hingamise, vee või toitainete ja ka naha kaudu. Enamasti satub radoon organismi just hingamisteid pidi. Tavatingimustes on inimesele lubatud kiirgusdoos 2 mSv/a. Välja toodud kiirgusdoosist moodustab 18,5% kosmiline kiirgus, 23 % ehitusmaterjalidest tulenev gammakiirgus, 11,5% inimese kehas olevad radionukliidid ning tervelt 46% katab radoon koos tütarelementidega. Tavatingimustes on inimesel määratud kiirgusdoos suurusega 2 mSv/a, mis tähendab, et inimene võib aasta jooksul saada kiirgusdoosi maksimaalse suurusega 2mSv. Radooni sisalduse mõõteühikuks on Bq/m³, mis näitab mitu bekerelli õhu kuupmeetri kohta on radooni õhus.[9] Bekerelli nimetatakse ühikut, mis vastab ühele iseeneslikule tuumasiirdele sekundis. Mida suurem on tuuma lagunemine, seda suurem on kiirgus.

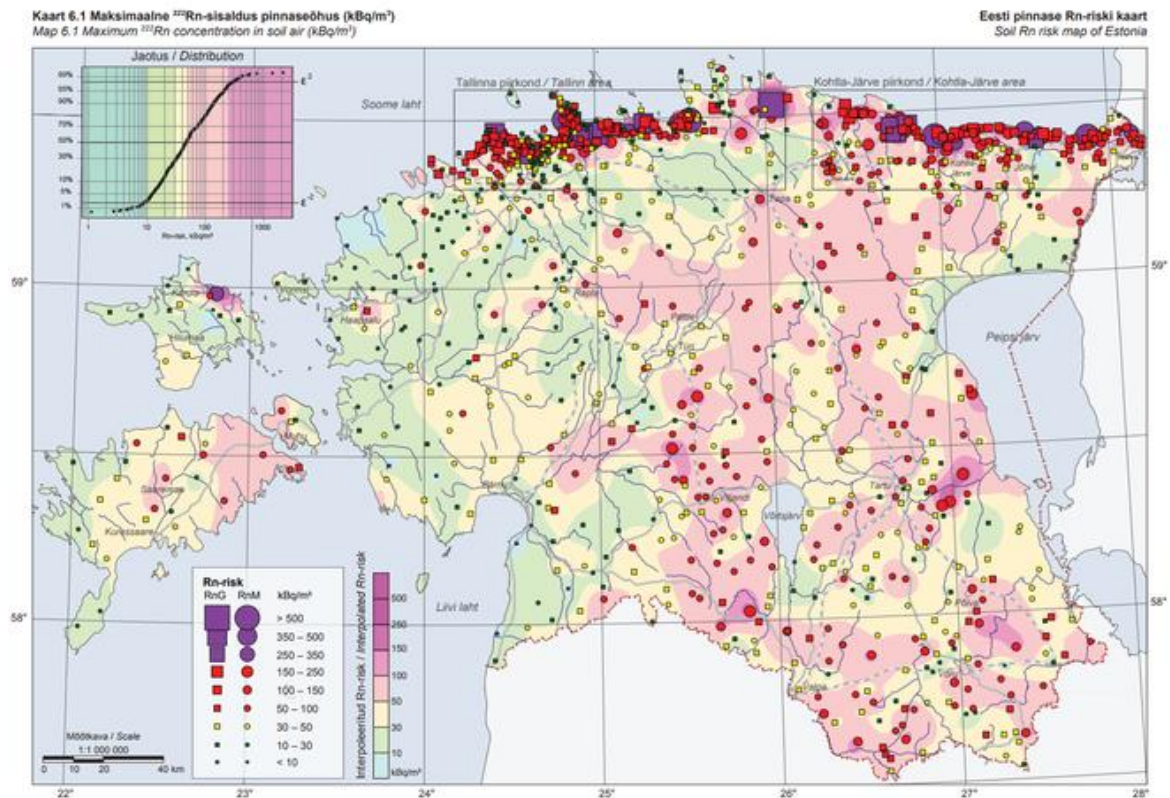
3.1 Radoon Eestis

Eestis on kõige suurem radoonioht Põhja-Eestis, aga radoonioht on olemas ka Lääne-Virumaal ja Tartumaal. Põhja-Eestis seisneb otsene oht asjaolus, et maapõues uraanirikka diktüoneemaargilliidi kihi peal on suures osas paekivikiht, mis soodustab radooni levikut maapinnale. Lääne-Virumaal ja Tartumaal põhjustavad ohtu jääajast siia kandunud setted.[37]

Diktüoneemaargilliit teise nimega graptoliitargilliit on settekivimite hulka kuuluv kivim, mida leidub Eesti põhjarannikul (joonis 4).[10] Lisaks uraanile, mille lagunemisena eraldub raadium ja radoon, on kivimis veel erinevaid metalle nagu vanaadium

jms.[10] Peale asjaolu, et tegemist on settekivimiga, mis on radooni levikuks soodustav tingimus, on veel arvestatav aspekt, et selle kivimi kokkupuutel veega jõuavad erinevad keemilised ained põhjavette.

Eestis on keskmine pinnaseõhus mõõdetud radooni sisaldus 23-75 kBq/m³. Eranditena esineb juhte, kus sisaldus ületab 500 kBq/m³ piire (joonis 4).[11]



Joonis 4. Radooni kaart Eestis [61]

Radoonisaldus siseõhus on suurem talvel. Põhjustena võib tuua välja järgnevad asjaolud. Suvel hoitakse majade aknaid lahti, et jahutada majasisest temperatuuri. Ühtlasi toimub protsessi läbi õhuvahetus ja tänu sellele radoon ei saa koguneda majja. Teise põhjusena võib välja tuua talvise majade kütmise. Maja küttes õhk soojeneb, muutub kergeks ja kerkib ülesse ja pääseb välja läbi katuse. Rõhu tasakaalustamiseks tuleb õhku juurde saada ja enamasti tuleb see õhk maja alt maa seest või läbi vundamendi. Koos õhuga siseneb majja ka radoon. Kolmanda aspektina saab välja tuua fakti, et talvel maa külmub ja kohati tekib jäätunud kiht maapinnale. Jäätunud kiht ei lase radoonil naturaalsel viisil maapinnast väljuda ning seepärast siseneb radoon majja läbi vundamendi.[12]

4 RADOONIST TULENEV TERVISERISK

Radoonist tulenev radioaktiivne kiirgus on põhjuseks mitmetele tervisega seotud probleemidele. Mõju tervisele avaldub tüüpjuhtudel ajaliselt pikematel perioodidel. Otsene risk seisneb radooni sisse hingamises – gaasi sisse hingamisel jõuab radoon õhu abil kopsudesse, kus levitab kiirgust kopsude sissekudedesse. Tulemusena kops kahjustub ja pikemas perspektiivis tekitab see kopsuvähki.[13]. Ei ole välistatud, et radooni sissehingamisel ei saa ka teised sisemised organid kätte doosi, mis kahjustaks tervist. Kuigi radooni esmaseks ohuks on suurendada kopsuvähi tekke tõenäosust, on viidud läbi aja jooksul erinevaid uuringuid, mis on ka leidnud seoseid leukeemia ja radooni vahel.[14]

Kokkuvõttena saab öelda, et kopsuvähi juhtudest on radooni mõju vähi tekkele kaasaaitamises olnud vahemikus 3-14%. [14] Radoon võib põhjustada ka muid terviseprobleeme, aga järjepidevust pole tõendatud. Kindlat alampiiri, millest alates radooni kopsuvähki haigestumise riski ei suurenda, pole kindlaks määratud. Valdav osa haigusjuhtudest on saadud madalate või keskmistest radooni kontsentratsioonidest.[14]

4.1 Radoon põhjavees

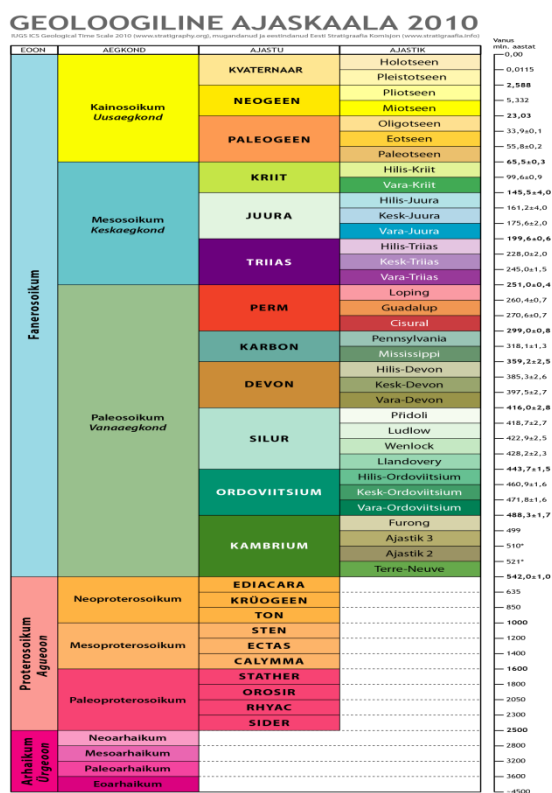
Radooni leidub lisaks õhus veel vees. Veeest rääkides saame eristada kahte erinevat tüüpi – pinnavesi ja põhjavesi. Esimesena mainitud juhul ei ole vees sisalduvate radionukliidide kogused suured ja ei tekita probleemi, kuigi ka Eestis on joogivee- ja kvaliteedinõuete all ära märgitud indikaatorite all radioloogilised näitajad.[15]

Põhjavees on suurem radooni kontsentratsioon kui pinnavees. Kokkuvõtvalt satub joogivette rohkem radionukliide nendes piirkondades, kus kasutatakse põhjavett joogiveeks pinnavee asemel.[16]. On olemas kohti, kus kehtestatud piirväärtused on ületatud kuni neli korda. Piirväärtuste ületamine on sagedasem põhjavett kasutavates piirkondades, näiteks Nõmme, Pirita jpm.[16]. Eestis on seadustes joogivee kvaliteedi- ja kontrollnõuete all kehtestatud efektiivdoosi määraks 0,1 mSv/aastas. Piirmäär 0,1 mSv/aastas ei sisalda aga endas radooni ega ka radooni laguprodukte. [15][17] Põhjus, miks ikkagi juuakse selliste näitajatega vett on järgmine - piirmäär

ületamisel teostatakse terviseriski ja riskianalüüs ja kui tulemustest selgub, et selliste näitajate puhul ohtu tervisele ei lisandu, võib ikkagi vett kasutada joogiveena.[16]

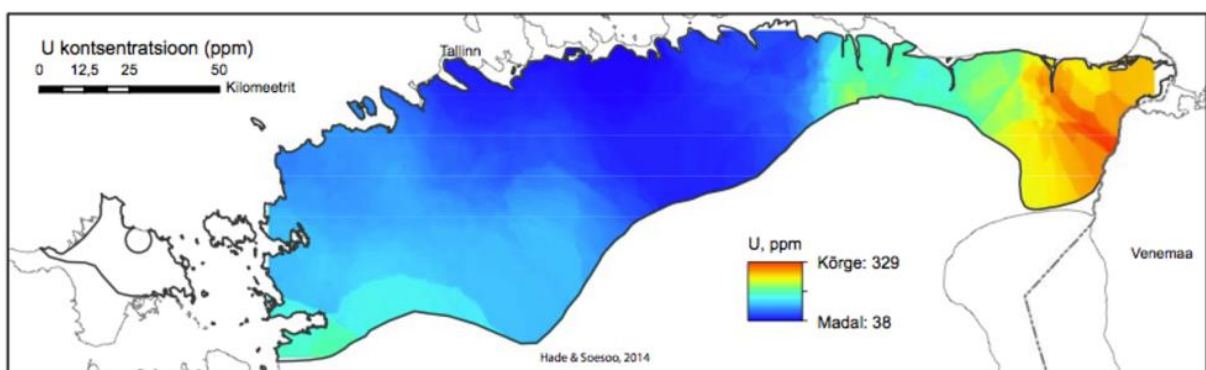
Põhjaveest joogivee ammutamiseks on kasutusel peamiselt 2 põhjaveekihti – Ordoviitsium-Kambrium ja Kambrium-Vendi.[16] Kahest valikust probleemseks on osutunud Kambrium-Vendi põhjaveekiht.

Kambrium-Vendi põhjaveekihist rääkides tuleb lähtuda tema geoloogilisest asetusest. Kambrium-Vendi põhjaveekiht Kambrium ja Ediacara piiri peal. Kiht asetseb aegkonna poolest Paleosoikumi ja Neoproterosoikumi kihtide vahel.[18] Jooniselt 5 võib näha, et ei ole mainitud nime Vend – Rahvusvahelise Geoloogiainstituudi tunnustuse puudumisel see termin pärast aastat 2004 kasutusel ei ole.[18] Sellegipoolest on see põhjavett ammutav kiht tuntud nime all Kambrium-Vendi põhjaveekiht. Nüüd rääkides aspektist, miks esineb probleem radooni olemasoluna selles põhjaveekihis, tuleb vaadata, millistest kivimitest koosneb Kambrium-Vendi pealolev kiht ehk Paleosoikumi kiht. Suurim keskkonnaoht tuleneb Paleosoikumi kihis olevast kivimist nimega Grapoliitargilliid. Nagu peatükis *Radoon Eestis* sai mainitud sisaldab kivim endas mitmeid metalle, mille leostumise tulemusena satubki radoon põhjavette.[19] Põhjaveekihi ja Paleosoikumi kihi omavaheliseks seoseks on välja toodud joonis 5.



Joonis 5. Eesti geoloogiline ajaskaala[62]

Aastal 2005 viis Kiirguskeskus läbi uuringu [20] hindamaks radioaktiivsusest tulenevat terviseriski olemasolu ja suurusjärku Kambrium-Vendi põhjavett ammutavates kaevudes. Läbiviidud uuringu käigus mõõdeti radioaktiivsust põhjavee kompleksides ja selgus, et ligi 14% Eesti elanikkonnast tarbivad lubatust kõrgema radionukliidide sisaldusega joogivett.[20] Ühe tulemusena tehtud tööst selgus, et valdavalt oli põhjavee kõrge radioaktiivsus kahes piirkonnas – Tallinn ja tema lähiümbrus ning põhjapoolne Lääne-Virumaa.[20] Aastal 2014 publikseeriti teadusartikkel, kus toodi välja ülevaade Eesti geoloogilisest ehitusest ja graptoliitargilliidist.[21] Artikli ühe osana oli esile tõstetud ka Põhja-Eesti geoloogilisest ehitusest sõltuvalt erinevate metallide sisaldus aluskivimites, sh uraani sisaldus. Uraani sisaldust kirjeldab joonis 6.



Joonis 6. Uraani sisaldus graptoliitargilliidist. [modifitseeritud 63]

Jooniselt võime näha seost, miks 2005. aastal korraldatud uuringust leiti, et just Lääne-Virumaal on tegemist suurema radioaktiivsuse kontsentratsiooniga põhjavee kompleksis.

Sellest kihist hakati joogivett ammutama 1950. aastatel, sest kiht oli pindmise reostuse eest kaitstud ja keemilised omadused olid sellel veel head. **Tolleaegne efektiivdoos oli 10 korda kõrgem, mille tulemusena loeti joogivee radionukliidide sisaldus normi piiresse jäävaks.**[16]

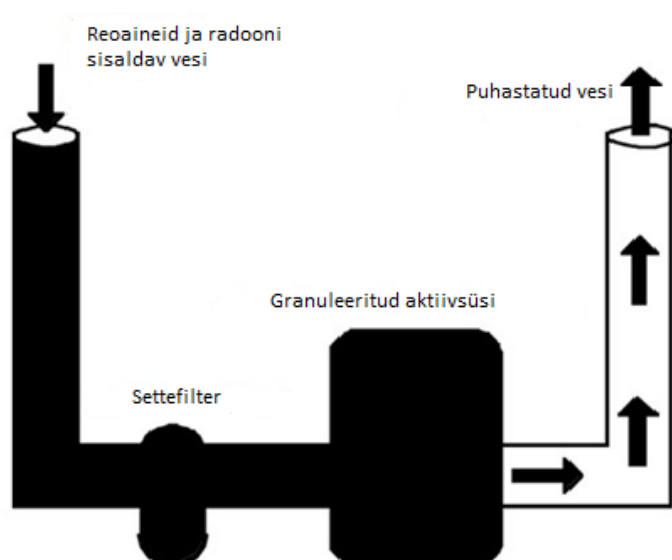
4.1.1 Radooni eraldamine joogiveest

Radooni vees olemise kahtlustuse puhul on võimalik lasta sooritada vastavad mõõtmised. Radioloogiliste osakeste sisaldust saavad Eestis määrata TÜ tuumaspektroskoopia labor ja Keskkonnaameti Kiirguskeskuse labor. [22]

Probleemi ilmnemisel on võimalik kasutusele võtta järgnevad meetmed.

Radooni eemaldamiseks veest on võimalik kasutada näiteks erinevaid veefiltreid. Üheks selliseks filtriks on granuleeritud aktiivsöe filter. Tööprintsip seisneb erinevate setete kogumises (sh ka radooni) ja väljasõelumises. Filtreerimisprotsessis läbib majja sisenev vesi esiteks settefiltrit ja seejärel klaaskiududest aktiivsöe graanulitega täidetud paaki.[23] Tänu aktiivsöe osakeste omasustele adsorbeeruvad erinevad reoained aktiivsöe külge ja ei jõua lõpptarbijani. Miinustena saab välja tuua asjaolu, et filtrite tööiga pole igavene ja neid tuleb vahetada kord aastas, et vähendada akumulunud radioaktiivsete osakeste eraldumist õhku.[23]

Paremaks aktiivsöefiltri mõistmiseks on olemas joonis 7.

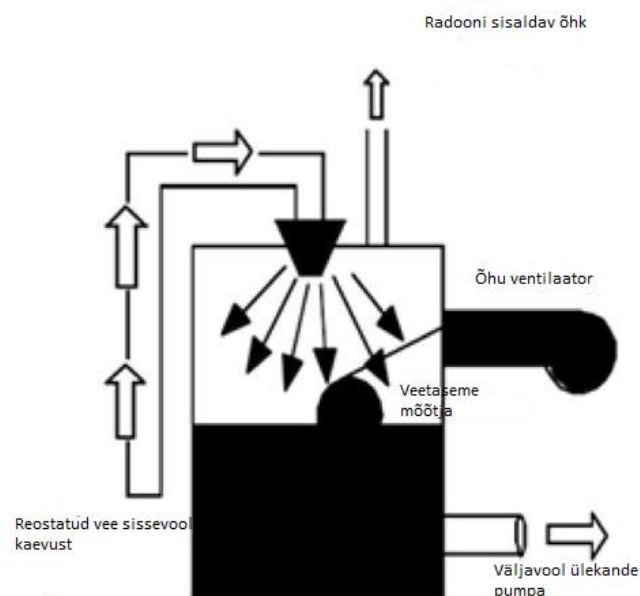


Joonis 7. Aktiivsöe filtri tööprintsip. [modifitseeritud 64]

Teise võimalusena saab kasutada aeratsiooniprotsessi. Ameerika Ühendriikide Keskkonnakaitse Agentuur (EPA) sõnul on tegemist parima saadavaloleva radooni eraldava tehnoloogiaga.[23] Täna saadavalolev tehnoloogia on nii hea, et on võimeline eemaldama veest 99,9% radooni.[23] Aeratsiooni põhimõte seisneb õhu juhtimises vette, mille tulemusena radoon eraldub veest. Õhk juhitakse mööda spetsiaalselt ehitatud torustikku kambrist välisõhku, kus radoon hajub ümbritsevas keskkonnas.

Aeratsiooni tööpõhimõtte kirjeldamiseks on olemas järgnev joonis 8.

Negatiivseks pooleks on asja finantsiline külg. Nimelt kui vees on lisaks radoonile ka palju muid reoaineid võib vajalik olla vee eeltöötlemine, mis oleks lisakulu aeratsiooniseadmele endale.[23]



Joonis 8. Radoonisisaldusega vee aeratsioon. [modifitseeritud 64]

Eestis on välja töötatud tehnoloogia, mille tööpõhimõtte seisnes kahe protsessi – filtreerimise ja õhustamise omavahelises kombineerimises.[24] Tegemist on väga uudse ja hea tehnoloogiaga, sest nagu pilootkatsetest selgus, siis antud tööprotsessi kasutamisel vähendati vastavaid näitajaid EU normidele vastavasse piirnormidesse.[24] Tulemusi kirjeldab allolev tabel 1.

Tabel 1. Filtreerimise tulemused[24]

Näitaja	Piirväärtus	Toorvesi	Filtraat	Vähene mine %
$\Sigma\alpha$, Bq/l		0,7	0,1	86
$\Sigma\beta$, Bq/l		0,8	0,33	59
Efektiivdoos mSv/a	0,10	0,45	0,08	82
Fe, mg/l	0,20	0,3	0,02	93
Mn, mg/l	0,05	0,1	0,02	80
NH ₄ , mg/l	0,50	0,78	0,2	74

Lisaks saab välja tuua veel madalad käitluskulud võrreldes ioonivahetus- ja pöördosmoosi tehnoloogiat kasutades; ka energiat kulub vähe ja kemikaale eelmainitud protsessis vaja ei ole.[24]

4.2 Radooni koosmõju suitsetamisega

Eraldi peatükina võib esile tõsta radooni koosmõju suitsetamisega. Radooni mõju kopsuvähi tekkele on 2. kohal pärast suitsetamist. Rohkem kui 85% radoonist põhjustatud kopsuvähiga lõppenud surmasid on nimelt suitsetajate hulgas.[25]

Eestis olevate andmete kohaselt sureb Eestis kopsuvähki ligikaudu 700 inimest igal aastal.[26] Tabelis 2 esitatud andmed kirjeldavad seost suitsetaja ja mittersuitsetaja tõenäosust surra seitsmekümne viiendaks eluaastaks sõltuvalt radoonisaldusest eluruumis.

Tabel 2. Suitsetaja ja mittersuitsetaja kopsuvähki haigestumise tõenäosus radooni kontsentratsioonist tulenevalt[26]

	0 Bq/m ³	100 Bq/m ³	800 Bq/m ³
Mittersuitsetaja	0,4%	0,5%	1%
Suitsetaja	10%	12%	22%

Võimalikult täpse radooni koosmõju suitsetamise kirjelduse saamiseks peab rääkima taustinformatsiooniks suitsetamisest endast ja tubaka tootmisest.

Tubakakasvatajad kasutavad saagi suuremaks nõudluseks erinevaid väetisi, et saada kätte rohkem produkti ehk tubakat. Peasjalikult kasutatakse selleks otstarbeks fosfaatväetisi. Väetised sisaldavad enda komponentide hulgas looduslikke radionukliide nagu radium ja tema lagunemisel tekkinud laguprodukte.[28] Väetise kasutamise tulemusena sisenevad taime lisaks maapinnas olevale looduslikule radoonile veel väetises olevad radionukliidid, mis osaliselt jäävad tubakaproduktidesse ka pärast töötlemist. Suurima riskiga on radooni üks tütarproduktidest Poloonium-210.[28]

Poloonium on toksiline raskemetall, mille avastas 19.sajandil Marie Curie. Tegemist on ülimalt surmava toksiiniga. Võrreldes vesiniktsüaniidiga on poloonium 250 000 korda toksilisem. Poloonium-210 poolestusajaks loetakse 140 päeva.[27] Lagunemisel tekib uus metall plii. Radioaktiivsel lagunemisel eraldub kõrge energia sisaldusega kiirgus, aga eralduvateks osakesteks on alfa-osakesed, mis tähendab, et levimiskaugus ei ole suur ning kiirguse peatab väiksemgi takistus. Poloonium tekitab tervisele ohtu just sissehingamisel, kus ta ladestub kopsude seintele ning kahjustab kudesid.[27]

Veel tasub ära mainida, et tubakas kui taim on tavalisest kõrgema vastuvõtlikkusega raskemetallide suhtes.[68] Radioaktiivsetel ainetel on 2 võimalust tubakataime sisse pääsemiseks – otse läbi kasvupinnase ja õhu kaudu.

Esiteks sisenevad taime koos väetise ja toitainetega radioaktiivsed osakesed – ühed pärinevad looduslikust olust endast ja teine pool tuleb tänu väetise olemasolule. Teise võimalusena saavad radioaktiivsed osakesed kinnituda taimetele õhu kaudu.[28] Tubakalehtede alumine külg on kaetud tihedalt väikeste trihhoomide ehk karvakestega. Trihhoomide funktsiooniks on enamjaolt kaitsefunktsioon, taime areng ja hiljem ka seemnete laiali hajutamine.[29] Trihhoomide külge kinnituvad väikesed tolmuosakesed ja tolmuosakeste külge kinnituvad omakorda radioaktiivsed osakesed, mis tekivad radioaktiivse lagunemise tulemusena. Vihma all osakesed trihhoomide küljest lahti ei tule ja nii võibki jõuda radioaktiivsete ainete sisaldusega tubakas tarbija kätte.

Üleüldised soovitused radooni ja suitsetamise koosmõju vältimiseks on seega järgmised. Tuleks vältida igasuguseid tubakatooteid, kui ollakse suitsetaja ja tuleks loobuda esimesel võimalusel.[28] Teise abinõuna tuleks vältida passiivset suitsetamist ehk vältida väljahingatava suitsu uuesti sissehingamist, sest radioaktiivsed osakesed kinnituvad lihtsasti suitsu osakeste külge.

5 RADOONI MÕÕTMINE

Radooni on võimalik mõõta nii sise- kui välisõhus. Välisõhus radooni taseme mõõtmisest võime rääkida kui ennetavast meetodist, mis välistab või vähemalt kahandab radooni levikut siseõhku. Radooni taset välisõhus mõõdetakse üldjuhul enne ehituse alustamist, et määrata kindlaks probleemi olemasolu ja panna paika vahetud radoonileviku takistamiseks vajalikud abinõud. Radooni mõõtmist välisõhus käsitletakse lähemalt järgmises peatükis.

Siseõhus on võimalik radooni mõõtmine jagada laias laastus kaheks – pikaajaline ja lühiajaline mõõtmine.

Lühiajaline mõõtmine on maksimaalse pikkusega kuni paar päeva, pikaajaliseks mõõtmiseks loetakse mõõteperioodi minimaalse pikkusega 2 kuud.[30]

Lühiajalise mõõtmise tulemused ei ole niivõrd täpsed kui pikaajalise mõõtmise tulemused, vaid sellise mõõtmise eesmärk on määrata ära probleemi olemasolu. Probleem on olemas, kui radoonitase ületab viitetaset.

Viitetasemeks nimetatakse radoonisisaldust õhus, millest kõrgemat taset ei peeta lubatavaks kavandada, kuigi tegemist ei ole piirmääraga, mille ületamine pole lubatud.[30] Viitetaseme ületamisel on mõistlik kaaluda radoonitõkestusmeetmeid, mis aitaks viia radooni sisalduse siseõhus nii madalale kui ratsionaalseid abinõusid kasutades võimalik.[30] Radooni mõõtmiseks on kasutusel nii väikesed detektorid kui ka erinevad seireseadmed. Väga üldistavalt võib jagada radoonidetektorid kaheks – passiivseteks ja aktiivseteks.[31] Kuigi lõppülesanne on mõlemal puhul sama ehk määrata kindlaks radoonisisaldus õhus, on tööprintsip pisut erinev.

Passiivsed seadmed ei vaja töötamiseks voolu ja sellisteks seadmeteks loetakse alfaosakesi tuvastavaid, süsi anumaid kasutatavaid ja vedelsüsi vilkumisi tuvastavaid detektoreid. Veel üheks ühisjooneks on asjaolu, et pärast mõõtmisi peab detektorid saatma laborisse, kus tuvastatakse kohaste seadmetega mõõtetulemused.[31]

Aktiivsete detektorite hulka kuuluvad aparaadi vastupidiselt passiivsetel kasutatavad voolu ja võimaldavad täpsemaid mõõtmistulemusi kui passiivsed. Aktiivsete seireseadmete kasuks räägib asjaolu, et elektrooniliselt mõõtev seade võimaldab inimesel lühikese aja jooksul näha radoonimõõtu ja lisaks uuendab seade andmeid reaalsajas.[32] Passiivsete detektorite kasuks tuleb aga madal hind, mis võibki olla kaaluvaks asjaoluks. Eestis kasutatakse mõõtmiseks üldjuhul väikesemõõtmelisi plastist tehtud radoonidetektoreid.

Taolise detektori tööpõhimõte seisneb selles, et detektori enda sees asub alfa-kiirgusele tundlikust materjalist filmitükk, millele jäävad jäljed kokkupuutel alfaosakestega. Detektor saadetakse hiljem kileümbrikus vastavasse asutusse, kus algselt teenust osutati ning laboris määratakse vastava seadmega kindlaks mõõtetulemus. Kiirgusmõõtmise testi osutavad Eestis erinevad asutused k.a. Keskkonnaameti kiirgusosakond ja eraettevõtted.[30]

5.1 Radooni mõõtmine otse pinnasest või pinnaseõhust

Ehituse planeerimisel tuleks arvestada maapinnas olevat radooni sisaldust. Radoonisaldus maapinnas annab võimaluse ehituse käigus võtta kasutusele erinevaid meetmeid, et tagada inimeste ohutus õhus oleva radooni vastu. Erinevatest ehitus-/ohutusmeetmetest tuleb juttu hiljemalt.

Radooni on võimalik mõõta järgnevate seadmete ning meetoditega.

Radooni kaardi koostamisel on kasutatud meetodit, kus mõõdetakse radooni otse pinnaseõhust ja sama-aegselt oli ka kasutusel meetod, mille abil mõõdeti eU pinnases. eU'ks loetakse uraan-238 kogust pinnases, arvestatuna Ra-226 sisalduse põhjal ning eeldades sekulaarset tasakaalu uraan-238 ja raadium-226 vahel.[33] Mõõteühikuks loetakse kBq/m^3 , mis tähendab radioaktiivse lagunemise mõõtmist ühe kuupmeetri õhu kohta.

Kuigi meetod on oma olemuselt lihtne, ei pruugi olla mõõtetulemus kõige täpsem, sest pinnaseõhu kättesaamisel võib osa pinnaseõhust olla juba segunenud välisõhuga. Probleem kerkib esile eriti liivastes-kruusastes pinnastes.

Täpsemaks seireks kasutatakse protseduuri, kus kaevatakse 80 cm sügavusega auk, mille põhjas mõõdetakse gammaspektromeetriga raadiumiga tasakaalus oleva uraani sisaldus (mg/kg) ja saadud tulemusest on võimalik välja arvutada potentsiaalne võimalik pinnases olev radooni sisaldus.[11] Lisamärgisena võib välja tuua punkti, et kaevis põhjakivist tulenevalt määratakse ära pinnakatte materjal, mis sisaldab endas olulist teavet gaasi liikumise kohta pinnases.[11]

5.2 Radoonitaseme mõõtmine siseruumides

Radooni mõõtmiseks jaotatakse siseruumid kahte erinevasse kategooriasse – eluruumid ja tööruumid.

Eristatakse kahte erinevat mõõtmist – pidevmõõtmist ja integreeritud mõõtmist. Mõõtmise eesmärgiks on teada saada ruumiõhu radoonisisaldus aasta lõikes ja määrata kindlaks radoonisisaldus konkreetsetes punktides ruumides ning tuvastada võimalikud radooni lekkekohad.[33] Eelnevalt mainitud aktiivdetektoreid kasutatakse pidevmõõtmiste näol ja sellised detektorid kuvavad tulemuse oma ekraanile teatud aja tagant. Integreeritud mõõtmine sisaldab endas radoonitundliku materjali hilisemat analüüsi laboris.

Viitetasemed jagunevad järgmiselt: tööruumides võib viitetaseme olla 300 Bq/m^3 , kui valdkonda reguleerivas õigusaktis pole muud moodi sätestatud [30]; koolides ja lasteaedades on sama viitetaseme madalam ehk 200 Bq/m^3 . [34]

Eluruumis on mõttekas teostada mõõtmine pikema perioodi vältel, et teha adekvaatne hinnang radoonisisalduse kohapealt. Mõõtmiseks sellisel juhul kasutatakse üldjuhul 2 väikest detektorit, mis paigutatakse magamistuppa ning elutuppa.[33] Lisaks tuleb lähtuda veel punktist, et mitme korruse ja keldri omamisel tuleb mõõtmine teostada ka nendes ruumides, kui tegemist on igapäevakasutust leidvate ruumidega.[33] Olgu öeldud, et elurütm ja igapäevane tegevus ei tohi muutuda mõõteperioodil, vastasel juhul pole mõõtmisest kasu. Ühtlasi peab vähemalt poolt mõõteperioodist langema kokku kütteperioodiga, sest just sel ajahetkel on radooni sisseimbumine suurim.[33]

Tööruumides olevat radoonisisaldust loetakse viitetasemel vastavaks, kui kogu mõõtmise vältel jääb tulemus viitetaseme piiresse või 1. novembrist kuni 30. aprillini mõõtmise tulemus ei ületa viitetaseme rohkem kui 20% ning seda juhul, et mõõtmine on toimunud katkematult.[35] Jätkuva ohutuse kindlustamiseks töökohades tuleb teostada kordusmõõtmisi. Viitetaseme normidesse jäämise puhul tuleb teostada uus mõõtmine iga 10 aasta tagant ja viitetaseme ületamise puhul on nõutud kordusmõõtmine iga 5 aasta järel.[35] Avalikes ruumides ja töökohtades kehtib nõue teostada mõõtmine 1. korrusel ja ka keldrikorrusel, kui seal asetsevad tööruumid. Peale selle tuleb läbi viia mõõtmised kõikides erinevate ventilatsioonisüsteemidega ruumides. Suurte ruumide puhul ($>200\text{m}^2$) tuleb panna üks mõõteseade iga 200 m^2 kohta.[33]

6 EHITUSLIKUD TÕKESTUSMEETODID

Erinevate ehituslike tõkestusmeetodite kasutus on vajalik, kuna Eesti maismaa pinnast ligikaudu 1/3 loetakse radooniohtlikuks.[36] Valdav osa riskipiirkonnast sisaldab endas Põhja-Eesti regiooni, aga oht esineb veel lisaks Lääne-Virumaal ja kohati ka Tartumaal.[37] Riski põhjustajaks on erinevad pinnasele iseloomulikud omadused. Tuues mõned konkreetset näited Eestist, võib esineda oht karstialadel pinnases olevatest rõhuerinevustest, mis on soodustav tegur radooni sisenemiseks majja.[38] Savi ja kivipinnasel on oht olemas, aga võrdlemisi väike, sest täidetud peavad olema järgnevad tingimused: savipinnasel ehitamine muutub ohtlikuks, kui savi ise on raadiumirikas; kivipinnasel tekib risk, kui pinnases esineb murdeid või pragusid.[38]

Asukohast ja pinnase omadustest tulenevalt võib radooni sisseimbumist veel mõjutada hoone allapandava täitematerjali kogus ja selles olevate radionukliidide sisaldus.[38] Maapinna õhuvahetus sõltub otseselt hoone allapandava täitematerjali kogusest. Ehitusmaterjalidega ümberkäimine on mõnes mõttes lihtsam – nendest tulenev kiirgus on rangelt reguleeritud. Ehitusmaterjalide aktiivsuskontsentratsiooni indeks peab olema väiksem kui 1, kui Keskkonnaamet pole andnud luba kõrgema kiirgustasemega materjali kasutuseks.[39] Vastasel juhul pole vastava ehitusmaterjali kasutamine seadusega kooskõlas.

6.1 Kuidas saab radoon majja

Radooni majja imbumiseks on olemas palju võimalusi. Kuigi radoon otseselt läbi materjali ei tule, piisab materjali poorsusest, et radoon saaks levida läbi takistuse. Kõikvõimalikud väikesed praod ja ehituskonstruktiooni liideskohad on piisavad selleks, et radoon satuks maja alla, kust ta ajapikku liigub ülespoole eluruumidesse. Sisenemisvõimaluste hulka kuuluvad veel erinevad kaabli ja toru maa-alused sisenemiskohad.[65] Radooni majja sissepääsemisvõimalusi kirjeldab järgnev joonis 9.

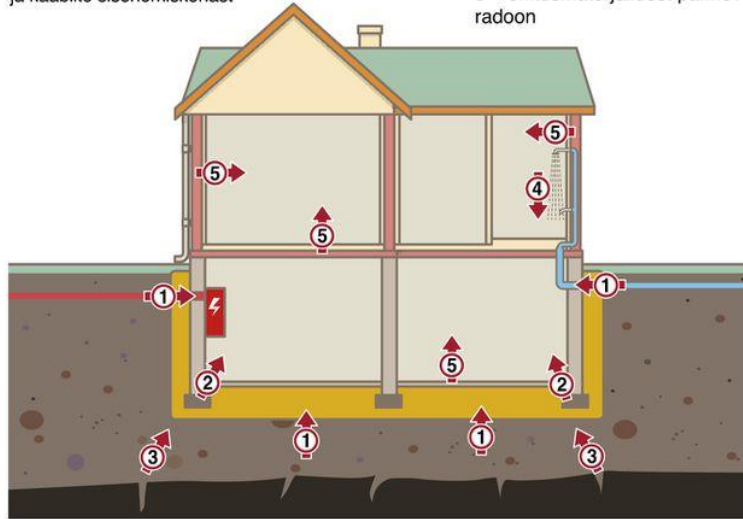
Radooni sissepääsuteed hoone siseõhku

1 ja 2 – maaalusest pinnasest pärinev radoon, mis pääseb sisse keldri, vundamendi ja seinte vahelistest pragudest või maa-aluste juhtmete ja kaablite sisenemiskohast

3 – süvapäritoluga radoon

4 – põhjaveest pärinev radoon

5 – ehitusmaterjalidest pärinev radoon



Joonis 9. Radooni peamised sisenemiskohad majja [65].

6.2 Tõkestusmeetmed radooniohu korral

Laias laastus jaguneb tegevus kaheks – on olemas nõ põhjuse kõrvaldamine (enne hoone ehitust) ja tagajärgedega tegelemine. Tihtipeale võib radooni tõkestamine osutuda kallimaks tegevuseks juba olemasolevas majas, kui seda oleks radooni tõkestamine uues majas. Seega, alati on kõige otstarbekam teostada esimese sammuna pinnaseuringud, mis määravad kindlaks, kas radoonioht on aktuaalne ja vajab lisameetmeid ohu vähendamiseks.

Vastavalt standardile EVS EVS 840:2017 [40] jagunevad pinnase tasemed neljaks erinevaks ohukriteeriumiks.

Madalaks nimetatakse pinnases olevat radoonitaset, mis jääb alla $10\,000\text{ Bq/m}^3$. Vastava taseme puhul ei ole hoones vajalikud ohutusmeetmete rakendamine, küll aga tuleks veenduda, et hoone ehitamisel oleks tagatud kõrge ehituskvaliteet.[40]

Normaalseks radoonitasemeks pinnases on vahemik $10\,000 - 50\,000\text{ Bq/m}^3$. Vajalikud on erinevad ohutusmeetmed ja ekspertide hinnangul tuleks alates $45\,000$

Bq/m³ kohta mõelda radoonitakistusmeetoditele. Abinõudena on laialdaselt kasutusel ventileeritavad põrandad või maast kõrgemal asuv põrandaalune tuulutus.[41] **Kõrgeks** tasemeks liigitatakse pinnas, kui radoonisisaldus on vahemikus 50 000 – 250 000 Bq/m³ ja **ülikõrgeks**, kui sisaldus on > 250 000 Bq/m³. [41] Mõlema kriteeriumi puhul on vajalikud radoonikindlad lahendused ja ülikõrge sisalduse puhul lisanduvad veel komplekssed radoonikaitse meetmed.[41] Komplekssete meetmete alla liigituvad üldiselt vahendid, mis nõuavad suurt finantsilist kulu ja vajadust muuta olemasolevat ehituskonstruksiooni [42], näiteks, erinevad õhupuhastid ja ventilatsioonisüsteemid.

Ülikõrge pinnase radoonisisaldusega on näiteks osa Piritast, Viimsi poolsaar ja lähedamalt Haabersti linnaosa.[43] Väiksema probleemseusega piirkondade alla kuuluvad näiteks Nõmme ja Kristiine piirkond.[43] Rangelt soovituslik on siiski teostada pinnaseuuringud enne ehitust, sest esineb ka juhtusid, kus normaalse tasemega piirkonda on sattunud ülikõrge radoonisisaldusega pinnas.[43]

Kokkuvõtvalt on vastavad pinnase radoonisisaldused välja toodud allolevas tabelis 3.

Tabel 3. Radoonisisaldus pinnases[41]

Pinnase radoonisisaldusetase	Pinnase radoonisisaldus, Bq/m ³	Meetmed radooni hoonesse sattumise vältimiseks
Madal	alla 10 000	Tavaline hea ehituskvaliteet
Normaalne	10 000 – 50 000	Tarinditeradoonikindlal lahendused (õhutihedad esimese korruse tarindid ja/või alt ventileeritav betoonplaatpõrand või maapinnast kõrgemal asuva põrandaaluse tuulutus)
Kõrge	50 000 – 250 000	Tarindite radoonikindlad lahendused (õhutihedad esimese korruse tarindid ja/või alt ventileeritav betoonplaatpõrand või maapinnast kõrgemal asuva põrandaaluse sundventilatsioon)
Ülikõrge	üle 250 000	Eriti hoolikas ehituse teostus, kompleksed radoonikaitse meetmed

6.2.1 Laialdasemalt kasutuselolevad tõkestusmeetmed

Järgnevas osas räägin lähemalt, kas ja kuidas on võimalik tõkestada radooni sisenemist majja tuginedes erinevatele abinõudele.

Tõkestusmeetmed jagunevad taaskord kaheks – aktiivsed ja passiivsed. Põhiline erinevus tuleb aspektist, et passiivsed tõkestusmeetodid vajavad toimimiseks minimaalselt elektrit kui üldse. Neid on otstarbekas rakendada madala kuni mõõdukate radooni sisalduste korral.[44] Sinna alla kuuluvad näiteks ventileeritavad põrandad, erinevad radoonikiled ja põrandaalune tuulutussüsteem, millest saabki koheselt ülevaate.

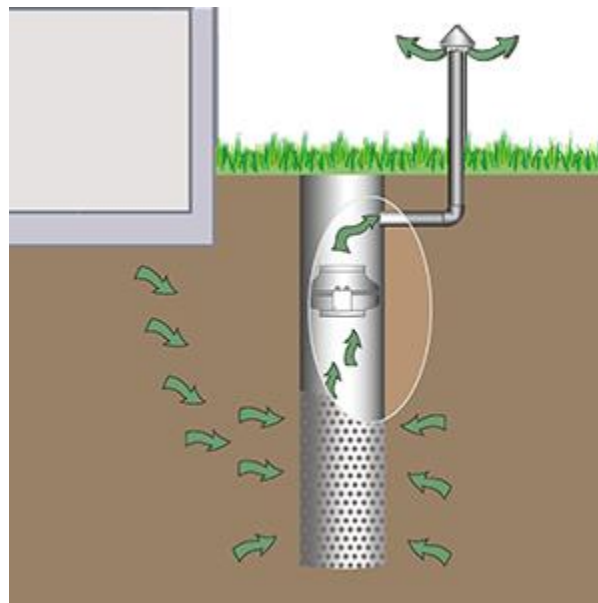
Radoonikilesid on müügil mitmesuguseid. Valikus on nii sarrustatud kui ka mitmekihilisi kilesid. Materjal on valmistatud madala tihedusega polüetüleenist, kuhu lisatakse juurde erinevaid füüsikalisi-keemilisi omadusi parendavaid lisandeid. Tulemuseks saadakse kile, mis on gaasi-, auru- ja veekindel.[45]

Suur rõhk on kile paigaldamisel – valesti paigaldusel ei ole radoonikilest lihtsalt kasu. Tavalise kile puhul ei ole õige paigaldamise seisukohast kõige tähtsam lõpptulemus, aga radoonikile korral tuleb teha kõik paigaldusega seotud protsessid äärmise täpsusega – vastasel juhul pole antud tõkestusmeetodist lihtsalt kasu. Tavalise kile paigaldamisel betooni peale ei ole vahet, kas tegemist on õhukindla konstruktsiooni elemendiga või mitte. Radoonikile aga tuleb pärast betoonile paigaldamise kinni teipida ja kile ääred peab tõmbama üle vundamendi äärte. Viimane aspekt tagab võimaliku radooni tõkestuse ka seinu kaudu.[46]

Keldriga maja puhul tuleb kogu kelder ümbritseda radoonikilega nii, et kileotsad tuleksid uuesti nähtavalt alles maapinnal. Tuleb lähtuda sellest, et kõik kile läbistavad kohad oleks tihendatud ja ei tekiks pragusid kile ja muu konstruktsiooni vahele.[45] Pikemas perspektiivis on vajalik pöörata tähelepanu radoonikile jaoks potentsiaalsetele ohtudele nagu maja vajumine, soojuspaisumine jms.[45] Edukalt paigaldatud kile puhul jääb veel viimaseks sammuks akumulunud gaasi ära juhtimine tõkestuse alt. Väga hästi toimib radoonikaevude kasutamine, kus vundamentaluse torustiku abil juhitakse kogunenud gaas radoonikaevu, kust gaas pääseb vabalt maapinnale.[45] Kasutusel on nii passiivseid kui ka aktiivseid ehk ventilaatoritega radoonikaevusid.[47] Allolevad joonised 10 ja 11 aitavad luua pilti radoonikaevu tööpõhimõttest ja radoonikilest.



Joonis 10. Radoonikile paigaldus[66]



Joonis 11. Radoonikaev[67]

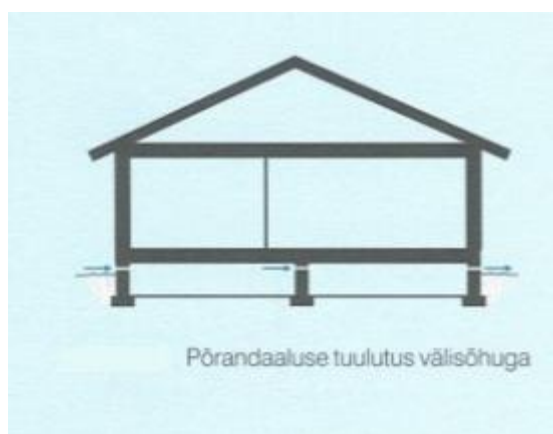
Veel on võimalik omavahel ühildada kahte süsteemi – nimelt hüdroisolatsiooni ja membraane. Maapind peab olema eraldatud vundamendist nii, et membraan kataks ühtse tervikuna keldrialuse pinna ja paigaldusel ei tohi tekkida liitekohtades rebendeid/pragusid jms.[48] Membraan liigitub oma tööpõhimõttest tulenevalt passiivsete meetodite alla. Eesmärgiks on tugevdada radoonikilega kaetud ala ja pakkuda kaitset radoonidifusiooni eest.[49] Radoonikile ja membraan tuleb omavahel ühendada üheks tervikuks nii, et põranda all tekiks õhutihe sektsioon.[49] Membraani ja radooni omavaheliseks liitmiseks on võimalik kasutada, kas kuuma õhuga kokku

keevitamise meetodit või kahepoolseid teipe.[49] Kokku kuumutamisel on oluline, et lähtutaks paigaldustemperatuurist, mis muudab membraani paigaldamise ajaks piisavalt elastseks. Membraane on olemas ka mitmekihilisi juhuks, kui on vaja kindlustada pikemaajalisem suurem koormustaluvus, teist sorti pinnast eralduvate gaaside vastu kaitse vms.[49]

Erilist tähelepanu vajavad aluspinna nurgakonstruktsioonid – seal on mõttekas kasutada õhemaid membraane nende parema painduvuse ja tihendamise tõttu.[49] Kõige kindlam on kasutada spetsiaalseid nurkade jaoks mõeldud detaile, mis tagavad õige paigalduse korral pikaajalise kaitstuse radooni eest. Suurenenud on ka tehases eeltoodetud toodete osakaal, kus vastavalt ehitise planeeringule keevitatakse kokku üks suur aluspinda kattev pind.[49] Erinevaid õhuavasid ja pragusid on ka võimalik täita mastiksite abil, mis õige paigaldamise tulemusena samuti toimivad radooni tõkestavalt.[50]

Teise võimalusena võib kasutada ka ventileeritavaid põrandaid või põrandaalust tuulutust.

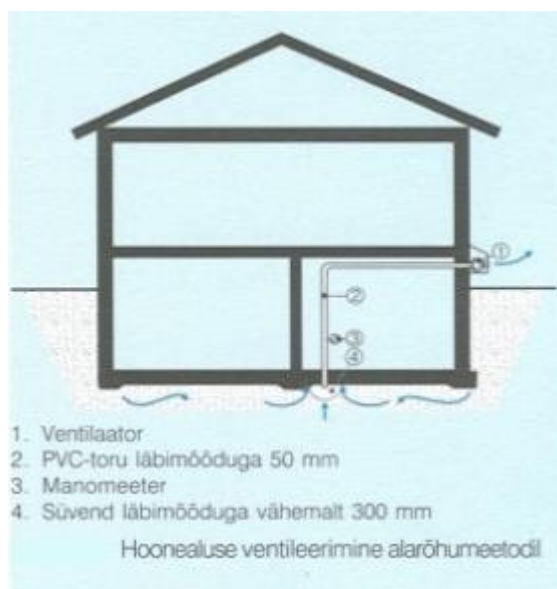
Põrandaaluse tuulutuse põhimõtte seisneb aspektis, et põrandat on maapinna suhtes tõstetud tekitamaks tuulutustavaid põranda ja pinnase vahele. Nõnda ei saa radoonisisaldav õhk koguneda ja ventileeritakse enne majja jõudmist välisõhku. Põrandaalust tuulutust kirjeldab järgnev joonis 12.



Joonis 12 . Põrandaalune tuulutus. [modifitseeritud 51]

Põrandaaluse tuulutuseks võib veel kasutada näiteks alarõhu meetodit (vt joonis 13). Protsessi käigus tekitatakse maja alla alarõhk, mille tulemusena hakkab rõhkude erinevusest tulenevalt kogunema õhk maja alla. Maja alla kogunenud õhk aga ventileeritakse torustiku abil maapinnale.[51] Efektiivsus pole üheselt määratud, sest

süsteemi kasutegur sõltub maapinna poorsusest ja põranda tihedusest. Miinustena antud protsessis saab välja tuua võimaliku põrandaaluse külmumise talvekuudel.[51]



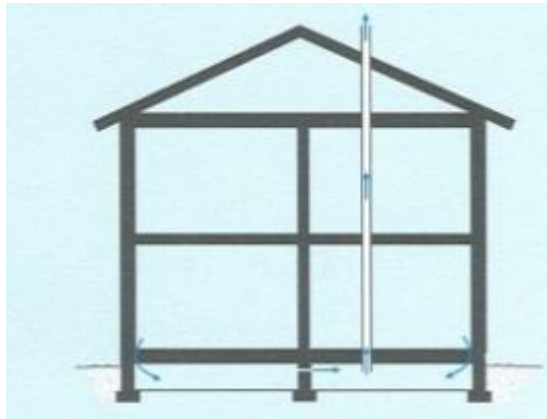
Joonis 13. Alarõhu meetod. [modifitseeritud 51]

Odavam võimalusena on võimalik kasutada põrandaaluse tuulutuse versiooni loomuliku õhutõmbe abil. Sisuline printsip jääb oma olemuselt samaks ehk siis toru abil tuulutatakse majaalust osa nii, et radoonisaldav õhk pääseks eluruumidesse sisenemata välisõhku. Alarõhu puhul oli tegemist teatud mõttes lihtsama lahendusega – ehituslikest tingimustest ei sõltunud efektiivsus nii palju kui loomuliku tõmbe korral.

Loomuliku õhuvahetuse puhul tuleks toru paigaldamisel jälgida, et toru paikneks majas kõrgema temperatuuriga osas. Kõrgem temperatuur tagab parema õhuvahetuse.[52] Toru võib tahtmise korral viia majast välja läbi korstna – seejuures tuleb jälgida, et enne lõplikku ventilatsioonitoru välja juhtimist jääks toru korstnalõõrist vähemalt 25 cm kaugusele.[52] Ühtlasi peaks torul olema minimaalses koguses torupõlvesid, sest nende olemasolu pärsib õhuvahetust.[52] Ideaalses olukorras tuleks kasutada PSV-meetodit. Lahtiseletatuna tähendab PSV *passive stack ventilation*'i, mis tõlgituna tähendab „passiivse šahti meetodit“.[53] Tegu on kõige efektiivsema loomulikku tõmme omava õhuvahetusprotsessiga. Protsessis on omavahel põimitud ristventilatsioon, sooja õhu kerkimise olemasolu ja Venturi efekt.[53]

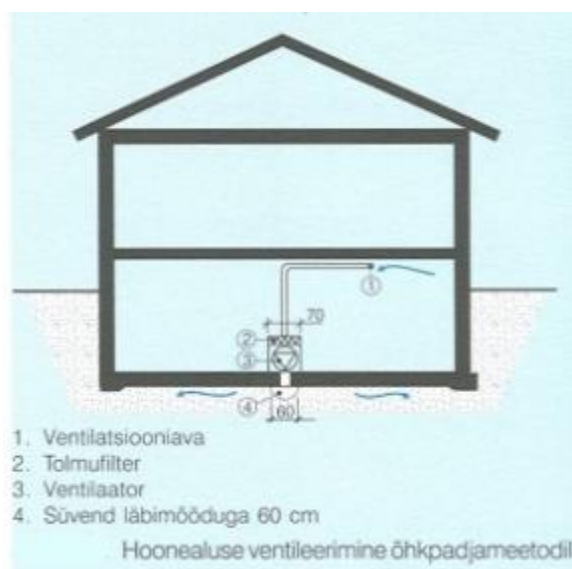
Soojemate tingimustega kliimas sõltub ventilatsiooni efektiivsus tuule parameetritest, toru materjalist, kui hästi päike soojendab toru jne.[52] Ventilatsiooni toru puhul tuleb jälgida, et toru ulatuks katusest välja vähemalt 30 cm[52], oleks kõige lähedamal

asuvast aknast või maja avausest minimaalselt 3 m kaugusel[52] ning samad tingimused kehtib ka kõrvalasuvate hoonete suhtes. Parema ülevaate saamiseks on olemas allolev joonis 14.



Joonis 14. Põrandaaluse ventileerimine loomuliku ventilatsiooniga. [modifitseeritud 51]

Veel saab rääkida õhkpadjameetodist (vt joonis 15), mis seisneb majaaluse pinna ventileerimises majastuleva õhuga. Põhimõte seisneb selles, et majast pärit õhk pumbatakse maja alla.[51] Tekkinud ülerõhu tõttu pressitakse radoon majast välja. Plussidena võib välja tuua meetodi puhul soojade põrandate olemasolu ja miinustena aspekti, et võimalike ebatiheduste tõttu võib protsess hoopis soosida radooni imbustumist majja.[51]



Joonis 15. Õhkpadja meetod.[modifitseeritud 51]

6.3 Kuidas valida õigete karakteristikutega radooni pumpa?

Aktiivse radoonieemaldussüsteemi paigalduse puhul tuleb lähtuda õige ventilaatori valikust – vastasel korral võib ühe probleemi lahendusega tekkida uus probleem. Ühe võimaliku probleemina võib välja tuua hallituse tekke.[54] Radooni süsteemi optimeerimata lahenduse puhul võib küll vabaneda radoonist, aga selle tulemusena võib kas ventilaatori ületöötamise või ebaproportsionaalse ventilaatori suurusel tulenevalt hakata tekkima hallitus hoonesse.[54] Seepärast ongi tähtis valida õigete karakteristikutega radooni pump.

Suures pildis võib radooni ventilaatorid jaga kolmeks: madalsurvelised, kesksurvelised ja kõrgsurvelised pumbad.[55] Madalsurvelisi pumbasid kasutatakse siis, kui süsteemi puhul on tegemist loomuliku õhuvahetusega või maja all on täitepinnaseks 10 – 15 cm paksune kruusakiht.[55] Sellise pumba näiteks saab võtta mudeli RP140, mille puhul ventilaatori võimsus on vahemikus 14-20 W. [55][56] Kesksurvepump on võimeline imema võrdlemisi suuri õhukoguseid ja seejuures ei kuluta selleks palju energiat. Suurema jõudluse tõttu esineb oht aspektis, et pump võib imeda õhku veel lisaks läbi poorsete materjalide (näiteks betoonplaadid ja -blokid) ja väiksemate pragude. Selliste ventilaatorite hulka kuulub näiteks mudel XP201, mille võimsus jääb vahemikku 45-65 W.[55][56] Pumbaruum peab olema ehitatud õhutihedaks. Kui tegu ei ole just madalsurvelise pumbaga, on võimalus ka müra tekkeks. Seetõttu peaks mõtlema ka müra vähendamise peale, mis on eraldi kulu.[55]

Kõrgsurve pump sobib hästi siis, kui majaalune pinnas on suure tihedusega ja kogu majaalune pindala on suur. Kõrgsurve pumpade mudelite hulka kuulub näiteks GP401, mis töötab võimsusega 60 - 120 W.[56] Alarõhu paremaks saavutamiseks maja all on võimalik veel mitmest kohast konstrueerida õhu sissevool.[55]

6.4 ERV ja HRV

Alati ei pruugi sobida kõige tavalisem radoonieraldus süsteem hoonesse. Põhjusteks võib olla majaalusele raske ligipääsetavus, olukorrast sõltuvalt ebaefektiivsus jms. ERV ja HRV (*Energy Recovery Ventilation* ja *Heat Recovery Ventilation*) puhul on

tegemist kahe erineva õhuvahetusprotsessiga, millele võib boonusena lisanduda ka radooni takistamine majja sisenemisel.

HRV süsteem toimib põhimõttel, et majasolev seismajäänud õhku kasutatakse õuest värske õhu eelsoojendamiseks toatemperatuurini, mistõttu ei kulu nii palju energiat õhu soojendamiseks ja mis omakorda säästab raha kütmise arvelt.[57] Kasutegur jääb sel juhul enamasti 55 – 75% piiresse.[57]

ERV puhul toimub samuti õhuvahetus sise- ja välisõhu vahel, aga lisaks sellele tekib hoone sees ka kerge ülerõhk. Ülerõhu puhul väheneb võimalus pinnaseõhul end sisse suruda maja alt ja seetõttu väheneb ka radoonisisaldus siseõhus.[44] ERV puhul toimub ka pidev õhusoleva niiskussisalduse tasakaalus hoidmine. Niiskuse tasakaalustamine töötab nii suvel kui talvel.[57] Kahe süsteemi vahel valides sõltub kõik inimese enda soovist ja ümbritsevast kliimast. ERV sobib paremini sooja ja kuiva kliimasse ning HRV aitaks külmemas kliimas vähendada siseõhu niiskussisaldust.[57]

7 KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli koostada ülevaade, kuidas looduslik radioaktiivne kiirgus mõjutab inimeste tervist ja nende elukorraldust. Töös on välja toodud radooni tekke võimalikud põhjused ja kuidas radooni olemasolul peaks tegutsema. Samuti on koostatud ülevaade kehtivast seadustikust radoonisisaldusele õhus ning nõutud joogivee kvaliteedi nõuetest, kus mõlemad sätestavad piirnormid.

Radoon on looduslik radioaktiivne gaas, mis tekib maapõues uraani sisaldavate kivimite lagunemisel. Kui uraani sisaldav kivim laguneb, eraldub kivimist keemiline element radium, mille lagunemine ongi looduslikuks radooni tekke põhjuseks. Suurema osa radooniohtlikust alast Eestist moodustab Põhja-Eesti rannik, aga probleem on olemas ka Tartumaal.

Töös on käsitletud erinevad radooni mõõtmise meetodid pinnases, pinnasevee ning õhus.

Lisaks õhus sisalduvale radoonile satub inimorganismi radooni ka läbi joogivee. Probleemikoht seisneb just põhjavett tarbivas kasutajaskonnas – pinnavees üldjuhul probleemi ei esine, sest radoon pääseb pinnaveest vabalt välisõhku.

Täielikult ennast ümbritsevast kiirgusest pole võimalik eraldada, küll aga on võimalik erinevaid ehituslikke tõkestusmeetmeid kasutades viia saadav kiirgusdoos miinimumini. Ehituslikud meetmed võib suures pildis jagada kaheks – passiivsed meetodid ja aktiivsed meetodid.

Passiivsete meetmete alla kuuluvad erinevad ehituslikud aspektid, mis aitavad takistada radoonil eluhoonetesse sattumist. Taolised meetmed on radoonikile paigaldamine; põrandaaluse tuulutuse väljaehitus jms.

Aktiivsed meetodid nagu nimeski mainitud aitavad reaalajas hoida radoonisisaldus siseõhus normide piires kasutades vastavaid vahendeid. Suure osa aktiivsetest meetmetest moodustavad erinevad ventilatsiooni süsteemid – alarõhumeetod, ülarõhumeetod ja loomulik ventilatsioon.

8 ABSTRACT

The aim of the work was to compile an overview how natural radiation can affect people's health and their lifestyle. The possible causes of radon formation and how to act in the presence of radon are presented in the work. An overview of the current limits for radon content in the air and the required drinking water quality requirements have also been featured, both of which set limit values.

Radon is a natural radioactive gas produced by the decay of uranium-bearing rocks in the earth's crust. When uranium-containing rock decays, the chemical element radium is released from the rock, which is the natural cause of radon formation. Most of the radon-hazardous area in Estonia is the coast of North Estonia, but the problem also exists in Tartu County.

Different methods of measuring radon in soil, groundwater and air are discussed in the work.

In addition to the radon in the air, radon also enters the human body through drinking water. The problem lies within the user who consumes groundwater - there is usually no problem in surface water, because radon is freely released into the ambient air from surface water.

It is not possible to completely separate itself from the surrounding radiation, but there are possibilities to minimize the resulting radiation dose by using various structural containment measures. Structural measures can be broadly divided into two - passive methods and active methods.

Passive measures cover various structural aspects that help prevent radon from entering residential buildings. Such measures include the application of radon pellicle, construction of underfloor ventilation, etc.

Active methods, as it is stated in the name, help to keep the radon content in the indoor air within the limits in real time, using appropriate tools. A large part of the active measures are various ventilation options - vacuum method, overpressure method and natural ventilation.

9 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] ICRPaedia, 2019 : http://icrpaedia.org/Absorbed,_Equivalent,_and_Effective_Dose (15.02.21)
- [2] Radiopaedia: <https://radiopaedia.org/articles/equivalent-dose> (15.02.21)
- [3] United States Environmental Protection Agency (EPA): Radiation Basics: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics> (15.02.21)
- [4] Netherlands Foundation of Scientific Research Institutes (NWO-I): What are the risks of ionising radiation? : <https://www.nwo-i.nl/en/employees/working-conditions/ionising-radiation/what-are-the-risks-of-ionising-radiation/> (15.02.21)
- [5] Lenntech: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/rn.htm> (18.02.21)
- [6] ThoughtCo: Radon Chemical and Physical Properties <https://www.thoughtco.com/radon-facts-606584> (18.02.21)
- [7] U.S. Department of the Interior/ U.S. Geological Survey: <https://pubs.usgs.gov/gip/7000018/report.pdf9> (19.02.21)
- [8] National Center for Biotechnology Information: Molecular and Cellular Mechanisms of Radon-Induced Carcinogenesis <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230503/> (23.02.21)
- [9] ICRPaedia : Radon : Units of Measure http://icrpaedia.org/Radon:_Units_of_Measure (23.02.21)
- [10] Vikipeedia: Graptoliitargillid <https://et.wikipedia.org/wiki/Graptoliitargillid> (24.02.21)
- [11] Eesti pinnase radooniriski kaart <https://gis.egt.ee/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=638ac8a1e69940eea7a26138ca8f6dcd> (26.02.21)
- [12] DuPage Radon Contractors: <https://dupageradon.com/are-radon-levels-higher-in-winter-or-summer/> (27.02.21)
- [13] WebMD : Cancer Center: <https://www.webmd.com/lung-cancer/radon-health-effects> (27.02.21)
- [14] National Center for Biotechnology Information : Health effects of radon <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143219/> (28.02.21)
- [15] Riigiteataja: Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimetodid : <https://www.riigiteataja.ee/akt/12782324> (28.02.21)
- [16] Tallinna Vesi: Põhjavee kvaliteet: <https://tallinnavesi.ee/ettevete/pohjavee-kvaliteet/> (04.03.21)

- [17] Radon Legislation and National Guidelines:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/004/31004182.pdf
(05.03.21)
- [18] Vikipeedia: Eesti geoloogiline ehitus:
https://et.wikipedia.org/wiki/Eesti_geoloogiline_ehitus (07.03.21)
- [19] ERR: Novaator: Eesti mudakivi ehk graptoliitargilliit – kas oht või kasulik maavara?
<https://novaator.err.ee/260236/eesti-mudakivi-ehk-graptoliitargilliit-kas-oht-voi-kasulik-maavara> (07.03.21)
- [20] Keskkonnaamet: JOOGIVEE RADIOAKTIIVSUSEST PÕHJUSTATUD TERVISERISKI HINNANG : <https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/public/kiirgus/joogivesi.pdf>
(08.03.21)
- [21] Soesoo, Hade 2014: Estonian graptolite argillites revisited: a future resource?
<https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/ce9f951a-ccc3-4892-bb48-8a5be6ed89ca> (08.03.21)
- [22] Ecoclean OÜ: Radionukliidide eemaldamine veest
<http://pohjavesi.ee/radionukleiidide-eemaldamine-veest/> (12.03.21)
- [23] Pennstate Extension: Reducing Radon in Drinking Water
<https://extension.psu.edu/reducing-radon-in-drinking-water> (12.03.21)
- [24] Keskkonnatehnika: Uudne keskkonnasõbralik tehnoloogia radionukliidide kõrvaldamiseks põhjaveest <https://keskkonnatehnika.ee/tehnoloogia-radionukleiidide-korvaldamiseks-pohjaveest/> (13.03.21)
- [25] National Center for Biotechnology Information: Radon, Smoking, and Lung Cancer: The Need to Refocus Radon Control Policy
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3673501/> (15.03.21)
- [26] Keskkonnatehnika: Mida on hea teada radoonist?
<https://keskkonnatehnika.ee/radoon-ja-mida-on-radoonist-hea-teada/> (16.03.21)
- [27] MedicalNewsToday: Polonium-210: Why is Po-210 so dangerous?
<https://www.medicalnewstoday.com/articles/58088> (17.03.21)
- [28] United States Environmental Protection Agency: Radioactivity in Tobacco
<https://www.epa.gov/radtown/radioactivity-tobacco> (19.03.21)
- [29] Nature plants: Development: A new function of plant trichomes
<https://www.nature.com/articles/nplants201696> (20.03.21)
- [30] Keskkonnaministeerium: seminar - Õigusaktidest tulenevad nõuded radoonile töökohtadel ja hoonetes. Runnel, Polt 2019:
https://www.envir.ee/sites/default/files/oigusaktidest_tulenevad_nouded_radoonile_to_okohtadel_ja_hoonetes.pdf (21.03.21)
- [31] Schaefer Inspection Service: Different types of Radon Testing:
<https://mhschaefer.com/different-types-radon-testing/> (25.03.21)

- [31] Kansas State University: National Radon Program Services: <https://sosradon.org/devices>) (25.03.21)
- [32] UKRadon Ltd: Electronic and passive radon detectors compared: <https://ukradoninfo.co.uk/detection/electronic-and-passive-radon-detectors-compared/> (27.03.21)
- [33] Keskkonnaministeerium: Radooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmine (RAM 2016): https://www.envir.ee/sites/default/files/radooni_mootmise_juhend.pdf (27.03.21)
- [34] Riigiteataja: Tervisekaitsenõuded koolieelse lasteasutuse maa-alale, hoonetele, ruumidele, sisustusele, sisekliimale ja korrashoiul <https://www.riigiteataja.ee/akt/111102011003> (02.04.21)
- [35] Tööruumide õhu radoonisisalduse viidetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118122020010> (02.04.21)
- [36] Eesti pinnase radooniriski ja looduskiirguse atlas: https://www.envir.ee/sites/default/files/eesti_rn_atlas_2017_kyljendatud.pdf (06.04.21)
- [37] Keskkonnaministeerium: Radoon: <https://www.envir.ee/et/radoon> (06.04.21)
- [38] Keskkonnaministeerium: seminar – Hoonete radoonisisalduse vähendamise meetodid, Pesur: https://www.envir.ee/sites/default/files/radooniseminar_1_pesur.pdf (08.04.21)
- [39] Riigiteataja: Ehitusmaterjalidele ja -toodetele esitatavad nõuded ja nende nõuetele vastavuse tõendamise kord: <https://www.riigiteataja.ee/akt/110112020012?leiaKehtiv> (08.04.21)
- [40] Radoonitõrjekeskus: Radoonikaitse hoonetes: <https://radoonitorjakeskus.ee/radoonikaitse/> (08.04.21)
- [41] Keskkonnaministeerium: seminar – Standard „Radooniohutu hoone projekteerimine“, Pesur: https://www.envir.ee/sites/default/files/radooniseminar_3_pesur_2.pdf (13.04.21)
- [42] Waterburyheating: Radon: <https://waterburyheating.com/radon/> (13.04.21)
- [43] Tallinn.ee: Tallinna pinnase radooni sisalduse kaart: <https://www.tallinn.ee/est/keskkond/TInRn> (17.04.21)
- [44] National Radon Defence: <https://www.nationalradondefense.com/> (17.04.21)
- [45] Keskkonnatehnika: Kuidas ehitada radoonikindlat maja: <https://keskkonnatehnika.ee/radoon-kuidas-ehitada-radoonikindlat-maja/> (18.04.21)
- [46] „Radoon radooniohtlike alade lasteasutustes“, Pesur 2006: <https://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/3621/1/Pesur2006.pdf> (18.04.21)

- [47] Radoonitõrjekeskus:
https://www.envir.ee/sites/default/files/vahendamise_meetmed.pdf (18.04.21)
- [48] „Siseõhu radoonisisaldused Tallinna lasteasutustes“, Preiman 2009:
https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/public/bannerid/2008_2009_uuring_OlgaPreiman_loputoo.pdf (20.04.21)
- [49] Finestum, 2017:
https://issuu.com/finestumehitusekspertiisid/docs/radooni_20va_cc_88hendamise_2017_ahen (20.04.21)
- [50] „Radoonitase lasteasutustes Ida- ja Lääne-Virumaal“, Nazimova 2011:
https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/public/bannerid/2011_uuring_Viktorija_Nazimova_loputoo.pdf (20.04.21)
- [51] „Radooniohutu elamu“, Jõgioja 2004:
https://www.envir.ee/sites/default/files/radooniohutu_elamu.pdf (21.04.21)
- [52] United States Environmental Protection Agency: Building Radon Out, 2001:
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/buildradonout.pdf> (21.04.21)
- [53] Building Product Design: Passivevent: <https://www.passivent.com/cross-flow-and-passive-stack-ventilation> (22.04.21)
- [54] Airthings: Radon System: How to Reduce Radon in Your Home?:
<https://www.airthings.com/resources/radon-system> (22.04.21)
- [55] American Radon Mitigation: How to Choose A Radon Fan:
<https://www.americanradonmitigation.com/choosing-radon-fan/> (22.04.21)
- [56] Infiltec: Radon Fan Guide: <http://www.infiltec.com/inf-fanr.htm> (22.04.21)
- [57] Ecohome: Choosing between Hrv and an ERV:
<https://www.ecohome.net/guides/2276/choosing-between-an-hrv-and-an-erv/> (25.04.21)
- [58] EPA: United States Environmental Protection Agency: Electromagnetic Spectrum:
https://www.epa.gov/sites/production/files/styles/large/public/2017-05/electromagnetic-spectrum_0.png (25.04.21)
- [59] Wikimedia:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg/1200px-Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg.png (25.03.21)
- [60] Wikipedia: Radium :
[https://en.wikipedia.org/wiki/Radium#/media/File:Decay_chain\(4n+2,_Uranium_series\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Radium#/media/File:Decay_chain(4n+2,_Uranium_series).svg) (22.03.21)
- [61] Eesti pinnase radooniriski kaart:
https://f7.pmo.ee/uaV_vYkJDqUWV8UaJ8egBNIJ7Js=/685x0/smart/nginx/o/2017/12/20/7423321t1ha067.png (22.04.21)

- [62] Eesti Stratigraafia Komisjon, 17 September 2012: https://et.wikipedia.org/wiki/Eesti_geoloogiline_ehitus (19.04.21)
- [63] Hade, Soesoo 2014: <https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/ce9f951a-ccc3-4892-bb48-8a5be6ed89ca>(20.04.21)
- [64] Pennstate Extension: Reducing Radon in Drinking Water: <https://extension.psu.edu/reducing-radon-in-drinking-water> (16.04.21)
- [65] Postimees: Radoon – salajane mürkgaas, mis levib kodudes üle Eesti: <https://heureka.postimees.ee/6837534/radoon-salajane-murkgaas-mis-levib-kodudes-ule-eesti> (17.04.21)
- [66] Õhtuleht: Ohtlikku radooni võib leiduda paljudes kodudes – kuidas end selle eest kaitsta? <https://www.oh tuleht.ee/826180/kuldne-sugis-oh tlikku-radooni-voib-leiduda-paljudes-kodudes-kuidas-end-selle-eest-kaitsta> (25.04.21)
- [67] Östberg: Radon Well: <https://fsp.ostberg.com/category/show/129/radon-well/?region=se&lang=en> (17.03.21)
- [68] National Center for Biotechnology Information: Levels of heavy metals in the raw and processed Ethiopian tobacco leaves <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4771704/> (07.05.21)
- [69] United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC) : Radiation Basics : <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/radiation-basics.html#neutron> (12.05.21)