



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Viktor Moseitšuk

**ERINEVATE BETOONIST
PROOVIKEHADE
VALMISTAMINE NING
DIFUSIOONI KATSETAMINE**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2022

Viktor Moseitšuk

**ERINEVATE BETOONIST
PROOVIKEHADE VALMISTAMINE NING
DIFUSIOONI KATSETAMINE**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehitus õppekava

Juhendaja: Rein Koch

Tallinn 2022

Mina, Viktor Moseitšuk, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Rein Koch, */allkirjastatud digitaalselt/*

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Viktor Moseitšuk
sünnikuupäev: 20.04.1996

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Erinevate betoonist proovikehade valmistamine ning difusiooni katsetamine

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/



Ehitusinstituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: Viktor Moseitšuk
Õpperühm: HE81
Eriala: Hoonete Ehitus
Lõputöö teema: Erinevate betoonist proovikehade valmistamine ning difusiooni katsetamine

Lähteandmed töö koostamiseks:

Measurement of radioactivity in the environment- Air: radon 222- ISO/TS11665-13

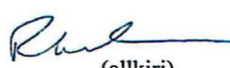
AlphaGuard Professional Radon Monitor Types D50, D2000, DF2000

Radon Eye Plus2

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mis on radoon, radooni mõõtmehikud ja normid, Eesti pinnase radoonriski kaart, radooni mõju tervisele, radoon hoonetes, radooni levimine, difusioon, survetugevuse ja difusiooni katsete läbiviimine ja kirjeldamine, tulemuste analüüs, järelduste tegemine.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht: teoreetiline ja eksperimentaalne osa koos analüüsiga 40-60 lk.

Lõputöö juhendaja:	Rein Koch (nimi)	 (allkiri)	03.02.2022 (kuupäev)
Lõpetaja:	Viktor Moseitšuk (nimi)	 (allkiri)	03.02.2022 (kuupäev)
Kinnitaja:	Aivars Alt ehitusinstituudi direktor	 (allkiri)	21.02.2022 (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 03.02.2022

Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2022

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1 RADOON.....	8
1.1 Mis on radoon?	8
1.2 Radooni kontsentratsiooni mõõtühikud ja normid	9
2 RADOONI MÕJU INIMESE TERVISELE	10
3 EESTI PINNASE RADOONIRISKI KAART	11
4 RADOON HOONETES.....	13
4.1 Hoonete radoonist kaitsmise viisid.....	13
5 RADOONI LEVIMINE	16
6 BETOONI KIVISTUMINE	17
6.1 Betooni kivistumine vees.....	17
7 DIFUSIOON	18
7.1 Difusioonikoefitsient	18
8 EKSPERIMENTAALNE OSA.....	19
8.1 Betoonisegu koostis.....	19
8.2 Betoonist kettakujuline proovikeha valmistamine	20
8.3 Betoonist kuubikute valmistamine	21
8.4 Vees kõvenenud betoonist katsekehade purustusjõu ja survetugevuse määramine	23
8.5 Vees kõvenenud betoonist kettakujulise katsekeha difusiooni uurimine	26
8.6 Mõõteseadmed.....	27
8.6.1 AlphaGuard DF2000	27
8.6.2 Viivisvoolik.....	28
8.6.3 Difusioonikamber.....	28
8.6.4 Radon Eye Plus2	29
8.7 Difusiooni katse käiguse kirjeldus.....	29
8.8 Difusiooni katsete tulemused ja analüüs	30
8.9 Katsekeha ühepoolse difusiooniteguri leidmine.....	35
9 JÄRELDUSED.....	39
KOKKUVÕTE.....	40
SUMMARY	42
VIIDATUD ALLIKAD.....	44

SISSEJUHATUS

Tänapäeval hoonete ehituses kasutatakse palju tehnoloogiaid inimeste tervise ohutuse tagamiseks. Suurt tähelepanu pööratakse sellele, et parandada ja tugevdada ehitusmaterjale ja hoonete tehnoloogilisi lahendusi, et vältida ohtlike ainete jõudmist eluhoonetesse. Tervist mõjutavad väga paljud erinevad tegurid. Mõned ained nagu gaasid võivad kahjustada meie tervist märkamatuks. Selline on ka radoon – gaas, mille pole lõhna, värvi ega maitset ning ilma keskkonna uuringuteta ja radoonitaseme mõõtmiseta ei saa sellest teada ka.

Tänapäeval kasutatakse hoonetes radooni kontsentratsiooni vähendamiseks erinevaid ehitusmeetmeid, mis sõltuvad hoonete tüübist ja maapinna õhu radooni kontsentratsioonist. Radoonitõrje meetodid sõltuvad olukorrast ning võivad olla nii lihtsad kui ka keerulised. Samuti radoonitõrje meetodid võivad olla erineva maksumusega. [1]

Radioaktiivse radooni kahjulikku mõju inimeste tervisele märgati juba 16. sajandil. Tšehhi ja Saksamaa piiril asuva Joachimstahli uraani kaevanduste kaevurite esines kopsuhaigus, mida nimetati mäehaiguseks. Kaevurite suremus sellesse kopsuhaigusesse oli umbes 50 korda suurem võrreldes ülejäänud elanikkonna suremusega. Selle haiguse põhjus oli leitud ja seletatud alles sajandeid hiljem. Kaevurite mäehaiguse põhjuseks oli radioaktiivne lõhnatu ja värvitu gaas – radoon, mille kontsentratsioon kaevanduste õhus oli väga kõrge. [2]

Viimaste aastate uuringud on näidanud, et üle 60% ioniseeriva kiirguse doosist saab inimene looduslikest kiirgusallikatest ning sellest 50% pärineb radoonist ja tema lagumisproduktidest [2].

Käesoleva lõputöö teooria osas räägitakse radoonist, tema kontsentratsiooni mõõtühikust ja normidest, radooni mõjust inimeste tervisele, radooni hoidumisest, radooni levimisest keskkonnas ja difusioonist hoonetesse. Lisaks räägitakse teooria osas difusiooni koefitsiendi määramise meetodist ning esitatud Eesti pinnase radoonriski kaart.

Lõputöö eksperimentaalses osas räägitakse läbiviidud katsetest. Kirjeldatakse betoonsegu koostist, ketta- ja kuubikukujuliste katsekehade valamisprotsessi, katsete läbiviimist, kasutatud seadmeid ning saadud tulemusi tabelite ja graafikutena. Lõpuks eksperimendi analüüsi osas on esitatud saadud tulemused.

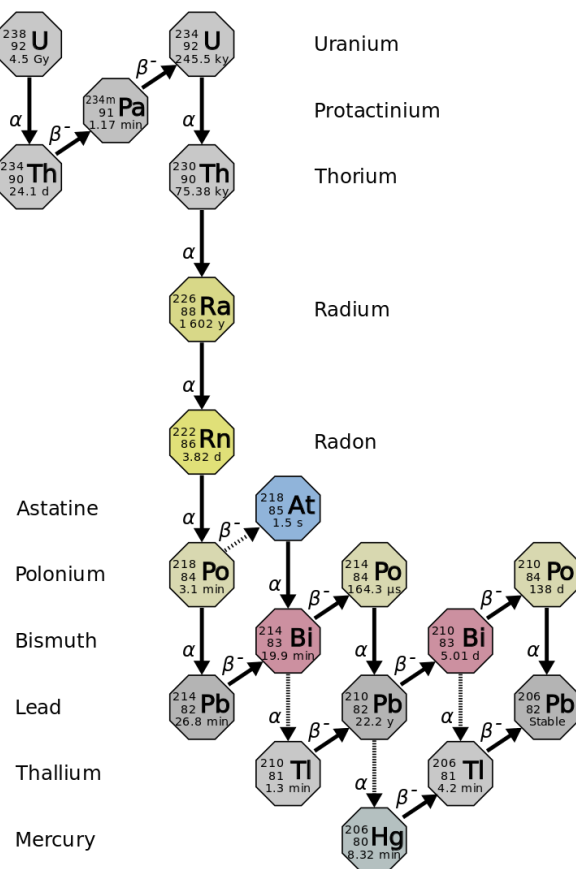
Esitatud töö eesmärgiks on välja leida radooni difusiooni omadusi vees kakskümmend kaheksa päeva kivilinenud, ilma lisanditeta, betooni korral ning võrrelda neid kuivas keskkonnas kivilinenud

betooni omadega. Samuti uuritakse selliselt valminud katsekehade survetugevust. Eksperimendi käigus saadud tulemusi analüüsitakse ning saadud tulemuste põhjal antakse soovitusi praktilise radoonitõrje teostamiseks.

1 RADOON

1.1 Mis on radoon?

Radoon on lõhnatu, värvitu inertne õhust ligi 8 korda raskem radioaktiivne gaas, mille eluiga on 3,8 päeva. Radoon tekib looduslikult uraani radioaktiivsel lagunemisel (Joonis 1). Looduslikku uraani leidub mineraalides, kivimites, setetes, mullas; samuti ka suuremal või vähemal määral mineraalse koostisega ehitusmaterjalides. Kõigile radioaktiivsetele elementidele on omane ebastabiilsus: nad lagunevad sünnitades uusi radioaktiivseid või mitteradioaktiivseid aineid ning eraldades samas ioniseerivat kiirgust. Kiirguskaitse seisukohalt on ioniseeriv kiirgus selline kiirgus, mis on võimeline tekitama bioloogilises koes ionipaare. Radooni radioaktiivsel lagunemisel tekkivad alfa-kiirgus ja radooni tütarproduktid. Sageli kasutatakse mõistet radoon tähenduses radoon pluss radooni tütarproduktid. Radooni teine looduses levinud isotoop, radoon 220 – toroon, tekib toorium 232 lagunemisereas. Kuna torooni eluiga 55,6 sekundit, on palju väiksem uraani lagunemise reas tekkiva radooni poolestusajast (3,8 päeva), siis loetakse radooniks seadusandluse mõttes uraani rea radooni. [3]



Joonis 1. Uraani lagunemise skeem [4]

1.2 Radooni kontsentratsiooni mõõtühikud ja normid

Radioaktiivsuse mõõtühikuks on bekrell (Bq). Radooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtühikuna õhus kasutatakse Bq/m³. 1 Bq/m³ tähendab, et ühes kuupmeetris õhus laguneb iga sekundi jooksul keskmiselt üks radooni aatom. Vastavalt Eesti standardile EVS 840:2017, peab aasta keskmine radooni kontsentratsioon eluruumide, puhkeruumide või tööruumide õhus olema mitte suurem kui 300 Bq/m³. Radooniohutute hoonete ehitamiseks tuleb juhinduda Eesti standardist EVS 840:2017 (Juhised radoonikaitse meetmete kasutamiseks uutes ja olemasolevates hoonetes). Radooni kontsentratsiooni vähendamiseks valmis hoonetes on olemas mitmeid erinevaid ehitusmeetmeid. Sõltuvalt hoonete tüübist ja radooni kontsentratsioonist, võivad kasutatavad radoonitõrje meetmed olla nii lihtsad kui ka keerulised, nii odavad kui ka kallid. Radooni tõrje meetmete valikul lähtutakse otstarbekust. [1]

2 RADOONI MÕJU INIMESE TERVISELE

Tervise Arengu Instituudi andmetel registreeritakse Eestis aastas umbes 650 - 700 esmast kopsuvähki haigestumist. Umbes 70 - 100 neist võib seostada radooniga. [5]

Radoon vabaneb maapinnast õhku ja laguneb koos radioaktiivsete osakeste moodustumisega. Kui me sissehingame, ladestuvad osakesed hingamisteedes epiteelirakkudele ning võivad seal tekitada rakkude DNA-le kahjustusi, mis võib põhjustada kopsuvähki. Raku kahjustused avalduvad suurenenud tõenäosusena haigestuda eluea jooksul vähki või saada defektidega järglasi. Haiguse kulg ei sõltu doosi suurusest, küll aga sõltub doosi suurusest haigestumise tõenäosus. [6]

Tinglikult võib inimese poolt saadava kiirgusdoosi jagada kaheks: looduslikest ja tehislimest kiirgusallikatest põhjustatuks. [5]

Tehislimest kiirgusallikatest saab inimene aasta jooksul keskmiselt [5]:

- meditsiinist (0.40 mSv);
- tuumaelektrijaamade tööst (0.001 mSv).

Looduslikest kiirgusallikatest pärinev aasta keskmine elanikudoos koosneb üldiselt [5]:

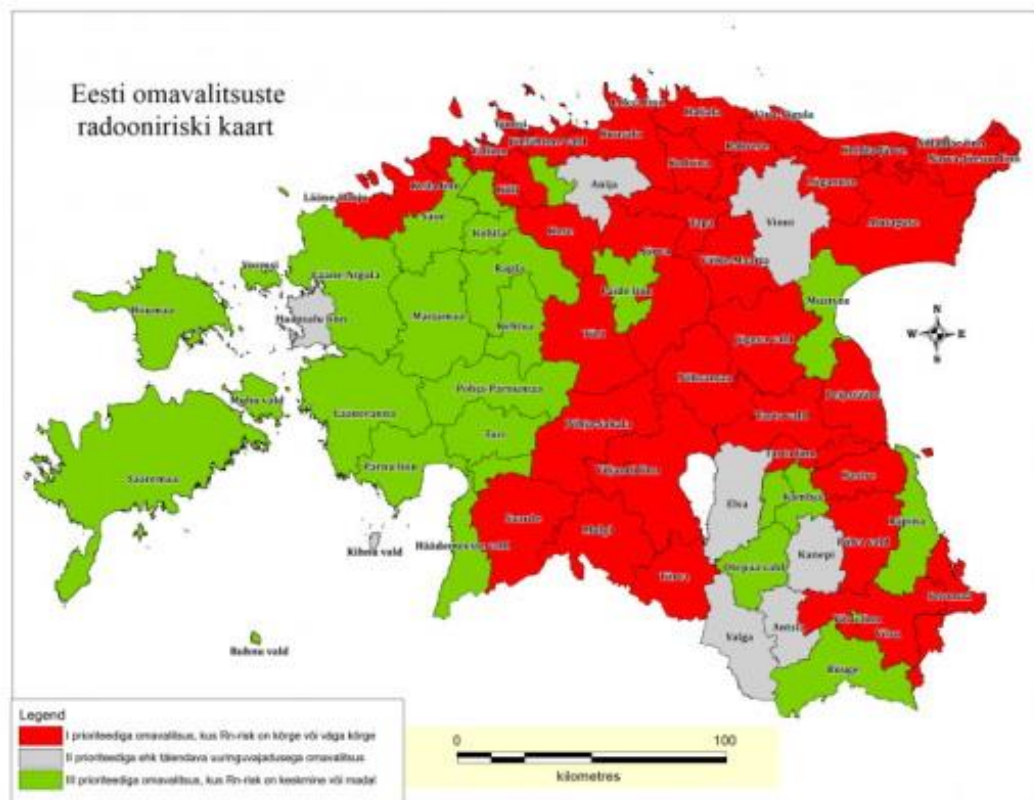
- kosmilisest kiirgusest (0.3 mSv);
- gamma-kiirgusest maapinnast ja ehitusmaterjalidest (0.3 mSv);
- radioaktiivsetest elementidest inimese kehas, põhiliselt kaalium-40 (0.3 mSv);
- radoonist (1.2 mSv).

Eesti kuulub Euroopas keskmisest kõrgema radooniriskiga riikide hulka. Radoon on suitsetamise järel teisel kohal kopsuvähki haigestumise põhjustest. Eestis haigestub aastas umbes 100 - 150 elanikku kopsuvähki, mille on põhjustanud nende elukeskkonnas leiduv radoon, seda on ca kaks korda rohkem kui hukkub aastas inimesi liikluses. Eriline risk on aga suitsetajatel, tingituna suitsetamise ja radooni sünergilisest efektist. [7]

Radooni aktiivsuskontsentratsioon välisõhus on üldjuhul madal, sest radoon hajub välisõhus ning ei kujuta seetõttu tervisele ohtu. Kuid aluspinnasest siseruumidesse sattuv radoon võib õhu radoonisisalduse tõsta määrusega kehtestatud normidest oluliselt kõrgema tasemeni. [7]

3 EESTI PINNASE RADOONIRISKI KAART

Eesti pinnase radooniriski kaarti täiendati 2020. aasta radooniuuringute andmetega (Joonis 2) [8].



Joonis 2. Eesti omavalitsuste radooniriski kaart [8].

Radooniriski kaardi koostamisel on kasutatud enam kui 3000 väliuuringupunkti andmeid üle Eesti. Need uuringutulemused on kogunenud viimase seitsmeteistkümne aasta jooksul Eesti Geoloogiakeskuse ja praeguse Eesti Geoloogiateenistuse poolt läbi viidud radoonimõõtmiste tulemusena. [8]

Radooniriski kaardil ei kuvata uuringupunktide täpseid asukohti, kuna see on tundlik informatsioon. Suur andmehulk võimaldab tulemusi aga interpoleerida ning kuvada kaardil erineva radooniriskiga alasid. Interpoleeritud kaarti kuvatakse kuni mõõtkavani 1:300 000. Kaarti on plaanis uute andmete lisandumisel uuendada. [8]

Radooniriski kaardi koostamisel mõõdeti radoonisisaldust uuringupunktides kahe paralleelse meetodiga: pinnaseõhust otsemõõtmisel ja pinnases mõõdetud eU ehk raadiumiga tasakaalus oleva uraani kontsentratsiooni järg. Kuna mõlemal meetodil on omad tugevad ja nõrgad küljed, on kaardil radooniriski kahest mõõtmistulemusest kõrgem. [8]

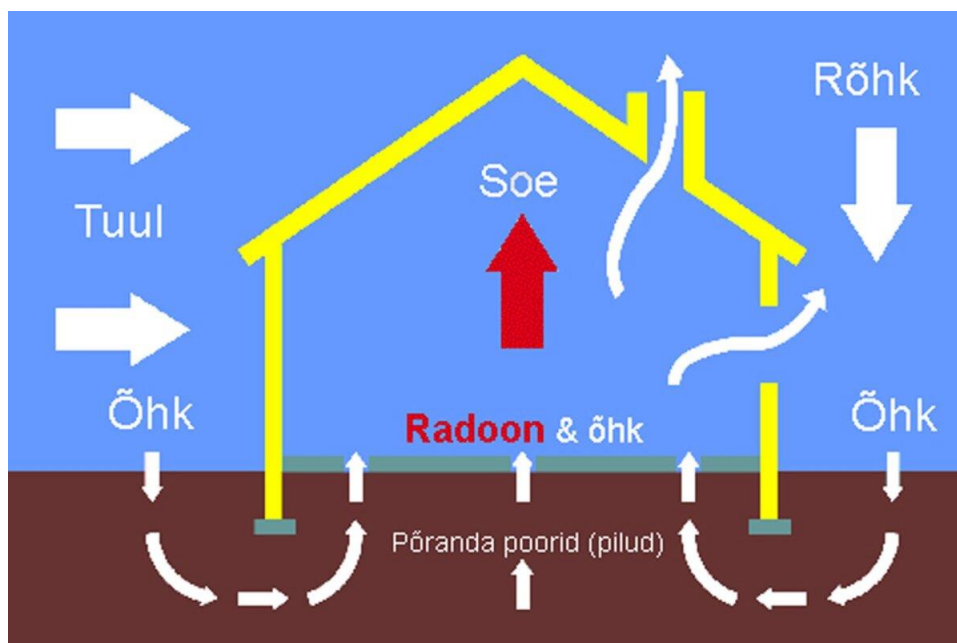
Eestis varieerub pinnaseõhus mõõdetud radoonisisaldus enamasti 23 - 75 kBq/m³ piirides, kuid võib ületada kohati 500 kBq/m³ piiri. Selleks, et radoonisisaldus majade siseõhus ei ületaks paljudes EL riikides tunnustatud viitetaset 300 Bq/m³, peaks radoonisisaldus pinnaseõhus olema väiksem kui 50 kBq/m³. [8]

Eestis on kõrge ja eriti kõrge radooniriskiga alad iseloomulikud Põhja-Eesti klindivööndile Narvast kuni Pakri saarteni. Kõrge radooniriskiga (>50 kBq/m³) alasid esineb ka Kagu- ja Lõuna-Eestis, mujal Eestis harvemini ja hajutatult. [8]

4 RADOON HOONETES

Hoone all olevast pinnasest eralduva radooni hulk sõltub paljudest teguritest (Joonis 3) [9]:

- radioaktiivsete elementide hulgast maapinnas;
- maapinna struktuurist;
- pinnase pealmiste kihtide gaasiläbilaskvusest ja veeküllastusest;
- kliimatingimustest.



Joonis 3. Radooni liikumine hoones [10].

Kõige suuremat radooni kontsentratsioonide väärtusi hoonete siseõhus mõõdetakse talvel. Talvel püütakse vähendada ruumide ventilatsiooni, et säilitada eluruumides soojust. Termilise rõhkude erinevuse tõttu koguneb rohkem radoonirikast pinnaseõhku hoonete alla ja tungib sealt ülesse, hoone ruumidesse. Talvekuudel on maapind hoone ümber külmunud, mis takistab radooni ekshalatsiooni atmosfääri, mis tõttu hoonealusest pinnasest hoonesse tungiva radooni hulk suurem. Suvisel ajal on hoones asuvad eluruumid hästi ventileeritud (hoitakse aknaid ja uksi rohkem lahti) ning õuest tulev radoonivaene õhk vähendab siseruumide õhu radoonitaset oluliselt. [9]

4.1 Hoonete radoonist kaitsmise viisid

Hoonete eluruumide kaitsmiseks radooni eest kasutatakse põhiliselt kahte meetodit [9]:

- Teostatakse maapinna kokkupuutuvate ehituskonstruktsioonide gaasiisolatsioon, mis takistab gaasi tungimist maapinnast hoonesse;

- Projekteeritakse hoonealuse pinnase või hoonealuste ruumide tuulutus.

Radoon siseneb hoone ruumidesse hoone alusest pinnasest või kasutatavast põhjaveest ning tulenevalt sellest esineb radoon peamiselt keldrites ja esimesse korruse ruumides. Radoonisisaldus siseõhus kõigub väga suurtes piirides. Mida gaasikindlam on hoone vundament, seda vähem pääseb radooni hoonesse. Radoonitase hoone siseõhus sõltub ilmastikust, õhurõhust, tuule suunast, maapinna niiskusest, maapinna külmumisest jms. Lisaks mõjutab radooni taset hoones ventilatsioon ning selle kasutamise viis, akende ja uste avamine, hoones kasutatavad küttekolded jne. Mida pikemaajaliselt radoonitaset siseõhus monitoorida, seda täpsema tulemuse saab. [7]

Radoonivoolu vähendamiseks elamute põrandate kaudu siseruumidesse teostatakse ehituskonstruksioonide gaasiline isoleerimine (tihendamine). Tavaliselt kombineeritakse gaasiisolatsioon hoone maa-aluste ja keldriosade hüdroisolatsiooniga. Selline kombinatsioon ei tekita raskusi, kuna hüdroisolatsiooniks kasutatavad materjalid takistavad tavaliselt ka gaase. [9]

Aurutõkkekiht võib toimida ka radoonitõkkena. Tuleb märkida, et polümeerkiled, eriti polüetüleen, läbivad radooni hästi. Seetõttu on hoone keldri gaas-hüdro-aurutõkkena vaja kasutada polümeeri - bituumenrullmaterjale ja mastiksit. [9]

Kui majal on kelder, mida kasutatakse inimeste pikaajaliseks viibimiseks või keldrisse on sissepääs esimese korruse elamuosast, siis keldripindade gaasi- ja hüdroisolatsioon tuleks teostada tugevdatud variandis. [9]

Keldrita majas, mille põrandad on maapinnal, teostatakse gaasi- ja hüdroisolatsioon hoolikalt esimese korruse ettevalmistuskonstruksioonide tasemel. [9]

Kvaliteetne gaasi-hüdroisolatsioon teostatakse konstruksioonide liimimise teel spetsiaalsete hüdroisolatsioonimaterjalidega. Kuivatatud gaasi-hüdroisolatsioonimaterjalide vuugid tuleb tihendada kleeplindiga. [9]

Horisontaalsete pindade gaasi- ja hüdroisolatsioon tuleb hermeetiliselt ühendada vertikaalsete konstruksioonide sarnase kattega. Erilist tähelepanu pööratakse sidetorustike lagede ja seinte läbipääsukohtade hoolikale tihendamisele. [9]

Pinnase kaitsmiseks radooni eest korraldatakse radooni eest kaitstud ruumi all asuva ruumi väljatõmbeventilatsioon. Selline ventilatsioon eemaldab kahjuliku gaasi teel kaitstud ruumi kuni gaasitõkkeni. Gaasitõkke ees olevas ruumis vähendatakse gaasirõhku või tekib isegi vaakumtsoon,

mis vähendab ja isegi takistab gaasi voolu kaitstud ruumi. Tavapärane väljatõmbeventilatsioon kaitstud ruumides imeb õhku väljastpoolt ruumi, mis suurendab gaasiisolatsiooni defektide korral radooni voolu maapinnast. [9]

5 RADOONI LEVIMINE

Tahketes mineraalsetes teradesraadiumi lagunemisel tekkivad radooni aatomid ei jõua tõenäoliselt kõik atmosfääri, kuna neil on tahketes ainetes väga madal difusioonikoefitsient. Aga kui nad on sattunud teradevahelisse vabasse ruumi, on võimalus, et nad migreeruvad edasi pinnale. Siin võib radooni eraldumisel atmosfääri jälgida järgmist protsesside seeriat. [1]

Emanatsioon: raadiumi lagunemisel moodustunud radooni aatomid väljuvad teradest (peamiselt raadiumi lagunemisel väljalendava alfaosakese tagasilöögi tõttu) teradevahelisse ruumi [1].

Transport: difusiooni ja konvektiivse liikumise teel jõuavad vabanenud radooni aatomid aine pinnale [1].

Ekshalatsioon: radooni aatomid, mis on jõudnud aine pinnale, vabanevad atmosfääri [1].

6 BETOONI KIVISTUMINE

Betooni kivistumise protsessis toimuvad hüdratatsioonireaktsioonid, mille jooksul tsemendi segus olevad mineraalid, koosmõjus veega, moodustavad uued ühendid. Betooni varajane veetustamine aurustamise tagajärjel võib aeglustada või peatada kõvenemisprotsessi ning põhjustada tugevusepuudust. [11]

Heade kõvenemistingimuste korral suureneb betooni tugevus pidevalt. Betooni normaalseks kõvenemiseks on vajalik positiivne temperatuur 18 – 22 °C ning suhteline õhuniiskus mitte vähem kui 90%. [11]

6.1 Betooni kivistumine vees

Kui betooni kivistumine toimub vees, siis selle betooni tugevus on suurem võrreldes kuivas keskkonnas kivistunud betooniga. Betooni kivistamisel kuivas keskkonnas vesi aurustub betoonist mõne kuu pärast ning seejärel kivistumine praktiliselt peatub. Seda seletatakse olukorraga, et enamuse tsemenditerade osa sisemuses ei jõua reageerida veega. [11]

7 DIFUSIOON

Difusiooniks nimetatakse ainete iseeneslikku segunemist nende koostisosakeste soojusliikumiste tagajärjel. Difusioon esineb nii gaasilistes ainetes (ühes toanurgas pihustatud lõhnaaine täidab peagi terve ruumi), vedelikes (vedelikku tilgutatud värv „lahustub“ ning täidab mõne aja möödudes ühtlaselt terve anuma) kui ka tahkiste korral. Kui asetada kaks peegelsiledaks lihvitud metallpinda tihedasti kokku, siis pika aja möödudes kasvavad need metalltükid kokku – ühe osakesed tungivad teise vahele. Gaasides, kui soojusliikumine on kõige intensiivsem toimub difusioon kõige kiiremini, samas tahkistes on see kõige aeglasem. [12]

7.1 Difusioonikoefitsient

Difusioonikoefitsient (D_r) on samuti niiskuse tundlik funktsioon. Selle koguse hindamiseks niiskusesisalduse teabe põhjal on välja töötatud mitu korrelatsiooni. Radooni difusioonikoefitsienti jäägis (D_r) võib hinnata ka empiirilise valemi (1) abil, mille on esitanud Rogers ja Nielson (1991), mis on esitatud järgmiselt [1]:

$$D_r = D_{ma} n_T \exp(-6mn - 6m^{14} n_T), \quad (1)$$

- kus D_{ma} – radooni molekulaarne difusioonikoefitsient õhus;
 n_T – kogupoorsus, mille põhjal saab arvutada $n_T = 1 - (\rho_b / \rho_g)$;
 ρ_b – kuiv puistetihedus;
 ρ_g – jääkmaatriksi tera tihedus ($\sim 2700 \text{ kg/m}^3$);
 m – veega täidetud pooriruumi osa, mis on antud seosega ($m = \rho_b \theta_d / 100 \rho_w n_T$);
kus (θ_d) on niiskusesisaldus kuivmassi alusel ja (ρ_w) on vee tihedus (kg/m^3).

8 EKSPERIMENTAALNE OSA

Käesoleva lõputöö käigus betoonist katsekehade valmistamine, nende läbivaradooni difusiooni mõõtmised ja betoonist kuubikute purustusjõu ja survetugevuse määramine teostati Tallinna Tehnikakõrgkooli radooni laboratooriumis koostöös üliõpilaste Megida Mägiga ja Britt Abbasiiga. Analüüsiks ja võrdlusteks kasutas töö autor üliõpilaste Megida Mägi ja Britt Abbasi poolt saadud survetugevuse katsete tulemusi ning üliõpilane Britt Abbasi difusioonikatsete tulemusi. Üliõpilane Megida Mägi poolt tehtud katsekehad olid kaks betoonkuubikut (SK1P ja SK2P) 2% hüdrofoobse lisandiga. Difusiooni katse analüüsi ja võrdluse tegemise jaoks kasutati üliõpilase Britt Abbasi poolt saadud erinevaid katsete tulemusi. [13], [14]

8.1 Betoonisegu koostis

Selle töö eesmärgiks on uurida radooni difusiooni ning purustusjõudu ja survetugevust erinevates betooni kivistumise tingimustes. Difusiooni katsetamiseks oli töö autori poolt tehtud tavalisest betooni segust kettakujuline proovikeha ning kaks ilma lisanditeta kuubikut purustusjõu ja survetugevuse katsetamiseks. Teise kettakujulise proovikeha ning kaks kuubikut SK1P ja SK2P 2% hüdrofoobse lisandiga REBA DM firmalt Remei valmistas kaasüliõpilane Megida Mägi. Kõik proovikehad pandi 28 päevaks vette kivistuma. [13]

Betoonisegu koostis tavalisest betoonist 2 cm kettakujulise proovikeha jaoks difusiooni katsetamiseks on järgmine:

- graniitkivi fraktsiooniga 1,0 - 2,0 mm: 400 g;
- segu Weber 3D 145 - 2: 2000 g;
- vesi: 360 g (18% segu massist).

Betoonisegu koostis iga tavalisest betoonist kuubiku jaoks purustusjõu ja survetugevuse määramiseks:

- graniitkivi fraktsiooniga 1,0 – 2,0 mm: 400 g;
- segu Weber 3D 145 - 2: 3000 g;
- vesi: 570 g (17% segu massist).

2% hüdrofoobse lisandiga 2 cm kettakujulise proovikeha SK5P koostis difusiooni katsetamiseks [13]:

- graniitkivi fraktsiooniga 1,0 – 2,0 mm: 352 g;
- segu Weber 3D 145 - 2: 2000 g;

- vesi: 420 g (21% segu massist);
- lisand REBA DM: 2% (segu massist).

Betoonisegu koostis 2% hüdrofoobse lisandiga kuubiku SK1P ja SK2P jaoks purustusjõu ja survetugevuse määramiseks [13]:

- graniitkivi fraktsiooniga 1,0 – 2,0 mm: 400 g;
- segu Weber 3D 145 - 2: 3000 g;
- vesi: 570 g (17% segu massist);
- lisand REBA DM: 2% (900 g segu massist).

REBA DM on kõrgefektiivne lisand veetihedatele betoonidele ja mörtidele. Tema plastifitseerivad omadused muudavad segud hästi tihendatavaks. REBA DM väldib vee migreerumise betooni või mörti, sulgedes kapillaarid. [15]

8.2 Betoonist kettakujuline proovikeha valmistamine

Betoonisegu valmistati Tallinna Tehnikakõrgkooli Ehitusinstituudi inseneri Ando Pärteli juhendamisel. Betoonsegu valmistamist alustati graniitkillustiku purustamisega. Katse jaoks vajati 400 g graniiti fraktsiooniga 1,0 - 2,0 mm. Saadud vajaliku fraktsiooniga graniit segati kuivatsemendisega Weber 3D 145 – 2. Mõlemad betooni komponendid kaaluti kuivalt, lisati omavahelise vajaliku suhtega segunõusse ning segati betoonisegumikseriga. 30 sekundi jooksul segati betoonsegu betoonisegumikseris kuivalt, siis järgmise 30 sekundi jooksul lisati 320 g vett. Kui segu osutus liiga paksuks, siis lisati segu vedeldamiseks veel 40 g vett. Pärast segu segamist pandi saadud segu ümara põhjaga 30 cm läbimõõduga vormi ning vorm asetati omakorda vibrolauale, segu tihendamiseks. Pärast tihendamisest jäeti segu vormis kõvenema 24 tunniks (Foto 1). Selle aja möödudes võeti katsekeha vormist välja ja asetati 28 päevaks vette.



Foto 1. Kettakujuline proovikeha tavalise betooniga

8.3 Betoonest kuubikute valmistamine

Betoonisegu kuubikute jaoks valmistati koos üliõpilase Megida Mägiga Tallinna Tehnikakõrgkooli Ehitusinstituudi inseneri Ando Pärteli juhendamisel. Betoonisegu valmistamist alustati jälle graniitkillustiku purustamisega. Iga kuubiku jaoks vajati 400 g graniiti fraktsiooniga 0,5 - 1,0 mm. Pärast kaaluti iga kuubiku jaoks 3000 g segu Weber 3D 145 – 2. Kaalutud komponendid pandi nõudesse eraldi iga kuubiku jaoks (Foto 2).



Foto 2. Komponendid kuubikute jaoks

Töö autori poolt tehtavad kaks kuubikut valati tavalisest betoonisegust. Üliõpilase Megida Mägi kaks kuubikut valmistati 2% lisandiga REBA DM. Iga kuubik valati eraldi. Betoonisegu segati 30

sekundi jooksul betoonsegumikseris kuivalt, siis järgmise 30 sekundi jooksul lisati vett. Pärast segamist pandi saadud segu standardsetesse 1 dm³ mahuga terasvormidesse (kuup, küljepikkusega 1 dm) ning vormid asetati omakorda vibrolauale, segu tihendamiseks. Pärast tihendamist jäeti segu 24 tunniks vormis kõvenema (Foto 3). Selle aja möödudes võeti katsekeha vormist välja ning asetati 28 päevaks vette kivinema (Foto 4).



Foto 3. Betoonist katsekehad

Töö autori poolt valmistatud tavalisest betoonist kuubikud märgistati nimetustega SK3 ja SK4 (Foto 3). Üliõpilase Megida Mägi poolt valmistatud REBA DM lisandiga kuubikud märgiti nimetusega SK1P ja SK2P (Foto 3).



Foto 4. Vette 28 päevaks pandud proovikehad

8.4 Veet kövenenud betoonist katsekehade purustusjõu ja survetugevuse määramine

Vees kövenenud kuubi kujuliste katsekehade purustusjõu ja survetugevuse määramine toimus 4.05.2022 Tallinna Tehnikakõrgkooli ehitusmaterjalide laboris Ehitusinstituudi inseneri Ando Pärteli juhendamisel. Selle katse eesmärgiks on uurida, kuidas mõjutab hüdrofoobse lisandi lisamine betoonisegule sellest valmistatud katsekehade (betoonkuubikute) tugevusele. Kivistunud betoonist katsekehade purustusjõu ja survetugevuse katsetamine toimus vastavalt standardile EVS-EN 12390-3:2019. Katsekehi enne vormist vabastamist hoiti temperatuuril 22 °C ja 30% niiskuse juures, 24 tundi jooksul. Katsekehade hoiustamine peale vormist väljavõtmist toimus vees, 28 päeva jooksul temperatuuril 22 °C. Purustuskatse läbiviimiseks kasutati Itaalia firma Tecnotest modena pressi. Katsekeha koormamiskiirus oli 0,5 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \times \text{s}$). Purustusjõud ja survetugevus määrati kahe tavalise ja kahe 2% hüdrofoobse lisandiga betoonist valmistatud ning vees kövenenud betoonkuubikute jaoks (Foto 5).



Foto 5. Betoonkuubikud purustusjõu ja survetugevuse määramiseks

Käesolevas lõputöös on katse tulemused kirjeldatud ainult tavalisest betoonist katsekehade SK3 ja SK4 korral (Foto 6).



Foto 6. Katsekehad SK3 ja SK4 pressi all

Purustusjõu ja survetugevuse katsete tulemused on järgmised (Tabel 1):

Tabel 1. Vees kõvenenud tavalisest betoonist katsekehade purustusjõu ja survetugevuse katsed

Katsekeha	Maht mm ³	Proovikeha mass g	Mahumass kg/m ³	Purustavjõud kN	Survetugevus N/mm ²	Keskmine survetugevus N/mm ²
SK3	1000	2152,9	2,152	448,74	44,87	44,84
SK4	1000	2123,4	2,123	448,05	44,81	

Katsekehade saadud purunemistüüp vastab standardsele purunemistüübile (Foto 7).

Saadud tulemusi võrreldi katsekehadega SK1P ja SK2P saadud purustusjõu ja survetugevuse katsete tulemustega. SK1P korral oli purustusjõud 323,5 kN ning survejõud 32,40 N/mm². SK2P korral oli purustavjõud 316,07 kN ning survejõud 31,61 N/mm². Niisiis 2% hüdrofoobse lisandiga REBA DM betoonist katsekehade SK1P ja SK2P keskmine survetugevus on 32,00 N/mm², mis on 29% vähem võrreldes selles töös valminud tavalisest betoonist katsekehadega. Võrreldes saadud andmeid üliõpilane Britt Abbasi lõputöös toodud sama koostisega katsekehade survetugevuse keskmistatud katseandmetega (33,93 N/mm²), on käesoleva töös saadud tulemused 24% suuremad. Erinevuse põhjuseks võib olla katsekehadel pärast vormi valamist kasutatud erinevad tihendamise tingimused. [13], [14]



Foto 7. Purustatud katsekehad SK3 ja SK4

8.5 Veepõhine betoonist kettakujulise katsekeha difusiooni uurimine

Vees kõvenenud tavalisest betoonist kettakujulise katsekeha KKTB (Foto 8) läbiva difusiooni uurimiseks tehti kaks katset.



Foto 8. Tavalisest betoonist kettakujuline katsekeha KKTB

Esimese katse kestis 20 päeva: 30.04.2022 - 20.05.2022. Selle katse eesmärgiks on määrata katsekeha difusiooni teel läbinud radooni kontsentratsioon difusiooni mõõteseadme ülemises kambris. Radooni generaatoriks kasutati esimese katse juures ühte tseoliidi kotti (Foto 9). AlphaGuardiga mõõdetud radooni radoonikontsentratsioon alumises kambris oli $14247 \pm 1400 \text{ Bq/m}^3$. Kuna selle katse käigus (18 päeva), ülemises kambris katsekehast läbi difundeerunud radooni ei täheldatud (katse tulemus on toodud graafikul (Joonis 4)), siis otsustati alumises kambris radooni kontsentratsiooni tõsta. Teiseks katseks asetati alumisse kambrisse 10 kotti tseoliiti. Katse kestis 6 päeva: 25.05.22 - 31.05.22. Alumises kambris radooni kontsentratsioon sellel korral oli $122100 \pm 12000 \text{ Bq/m}^3$. Katse tulemus on esitatud graafikul (Joonis 7).

Lisaks katsekeha läbiva difusiooni kiiruse mõõtmisele hinnati ka katsekehasse difundeeriva radooni kiirust. Katseks asetati alumisse kambrisse mõõteseadme Radon Eye Plus2 ning pumbati sinna välisest generaatorist (graptoliitargiliidi täitega balloonist) radooni sisaldav gaasi. Katse käigus vaadeldi radooni kontsentratsiooni vähenemist 2 päeva vältel alumises kambris, mida võrreldi samasugustes tingimustes tehtud katsega pleksiklaasist katsekehaga.



Foto 9. Tseoliidi kotid

8.6 Mõõteseadmed

8.6.1 AlphaGuard DF2000

Difusiooni kiiruse mõõtmiseks kasutati monitори AlphaGuard DF2000 (Foto 10). AlphaGuard DF2000 on professionaalne õhus radooni ja torooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmise riist, mis võimaldab mõõta eraldi radooni ja torooni sisaldust õhus. Mõõtmise tulemused salvestatakse mõõteriista mälli. Need tulemused saab kergesti kätte saada läbi DataView arvuti programmi USB, RS232 või Bluetooth ühenduse kaudu. AlphaGuard DF2000 mõõdab radooni kontsentratsiooni mõõtevahemikus ($2-2000000 \text{ Bq/m}^3$). AlphaGuard DF2000 ionisatsioonikambri maht on 0,56 liitrit. Samamoodi mõõdetakse ja salvestatakse ümbritseva õhu temperatuur, niiskussisaldus ja õhurõhk. AlphaGuard DF2000 mõõdeti radooni kontsentratsiooni alumisest kambrist, kuhu oli pandud kottides radooni eskhaleeriv materjal. [16]



Foto 10. AlphaGuard DF2000

8.6.2 Viivisvoolik

Katses ühendati katseseadme kambriid AlphaGuardiga voolikute abil (Foto 11). Kasutati 100 m pikkust voolikut, mille sisemine läbimõõt on 4,5 mm (maht on 0,4 liitrit), sellise arvestusega, et võimalik radoonigeneraatorist tekkinud toroon selles voolikus voolamise ajal jõuaks laguneda. Torooni poolestusaeg on 55 sekundit, aga radoonil 3,8 päeva. Voolukiiruse 2 l/min korral on tagatud, et viivisvooliku kasutamisel toimub ainult radooni kontsentratsiooni mõõtmine. Iga mõõtmise järel tuulutatakse viivisvoolik radoonist suruõhu abil, et vältida selle mõju järgmisele mõõtmisele.



Foto 11. Viivisvoolik

8.6.3 Difusioonikamber

Difusioonikamber kujutab endast kahte metallist kambrit, mille vahele on asetatud kettakujuline katsekeha (Foto 12). Kambrite servad on kaetud vaakumkummiga. Kambrite mahtuvus on 12 liitrit. Mõõtekambrite sisemine diameeter on 23,7 cm ja katsekehal diameeter on 30 cm. Alumisse kambris asetatakse radooni ekshaleeriv materjal või juhitakse sinna ühendusvooliku kaudu radooni sisaldavat gaasi. Ülemisse kambris pannakse radooni kontsentratsiooni mõõtmise seade Radon Eye Plus2, millega toimub ühendus Bluetoothi kaudu. Kahe kambri vahel asetsev katsekeha surutakse kambrite vahele kinni nelja tõmmitsa abil.



Foto 12. Difusioonikamber ja Radon Eye Plus2

8.6.4 Radon Eye Plus2

Radon Eye Plus2 on portatiivne, aga suure tundlikkusega täpne, sisemise mäluga radooni mõõteseade (Foto 12). Tema detektoriks oleva ionisatsiooni kambri maht on 200 cm^3 . Radon Eye Plus2 mõõtepiirkond on $7\text{-}9435 \text{ Bq/m}^3$. Tootja poolt lubatud seadme mõõtemääramatus jääb alla 10%. [17]

8.7 Difusiooni katse käiguse kirjeldus

28 päeva vees kivilinenud 2 cm paksune tavalisest betoonist katsekeha võetakse veest välja ja kuivatatakse. Kuivanud katsekeha pinnalt eemaldatakse surveõhupuhuriga lahtine tolmu. Katsekeha ja kambri tihendi vaheline ala kaeti vahaga, et tagada tihendite õhukindlus. Kahe kambri tihendite vahel asetsev katsekeha surutakse nende vahele kinni nelja tõmmitsa abil. Labori päevikusse märgitakse üles kambrite sulgemise aeg. Alumisse kambris asetatakse kas radooni eraldav radoonigeneraator (tseoliiti sisaldav kotikene) või juhitakse sinna radooni välisest generaatorist. Alumises kambris oleva radooni kontsentratsiooni määramiseks kasutatakse seadet AlphaGuard DF2000. Radon Eye Plus2 abil jälgitakse ülemises kambris kambris difundeerunud radooni kontsentratsiooni. Kinnises süsteemis, alumine kamber, viivisvoolik ja AlphaGuard DF2000 olev radooni kontsentratsioon taandatakse algselt alumises kambris olnud radooni kontsentratsiooniks. Katse kestvus sõltub radooni difusiooni kiirusest läbi katsekeha. Katse võib kesta kuni kolm nädalat.

8.8 Difusiooni katsete tulemused ja analüüs

Üldise difusiooni λ arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit (2) [1]:

$$\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_{leke} + \lambda_{dif}, \quad (2)$$

kus λ_{Rn} - radooni lagunemiskoeffitsient;
 λ_{leke} - radooni lekkekoefitsient;
 λ_{dif} - radooni difusioon.

Eelnevast valemist tuletatakse järgmine valem λ_{dif} arvutamiseks (3) [1]:

$$\lambda_{dif} = \lambda - \lambda_{Rn} - \lambda_{leke}, \quad (3)$$

kus λ - üldine difusioon;
 λ_{Rn} - radooni lagunemiskoeffitsient;
 λ_{leke} - radooni lekkekoefitsient.

Radooni puhul arvestame radioaktiivse lagunemise seadust, mis väljendub valemis, kus arv N väljendub eksponentsiaalse vähenemise seaduspärasusena (4) [18]:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda \times t}, \quad (4)$$

kus N_0 - radooni algne kontsentratsioon, Bq/m³;
 t - aeg, s;
 λ - radooni radioaktiivse lagunemise konstant.

Radooni suhtelist vähenemist tunni aja jooksul ehk radooni kadu tunnis Δ tuletame järgmisest valemist (5) [1]:

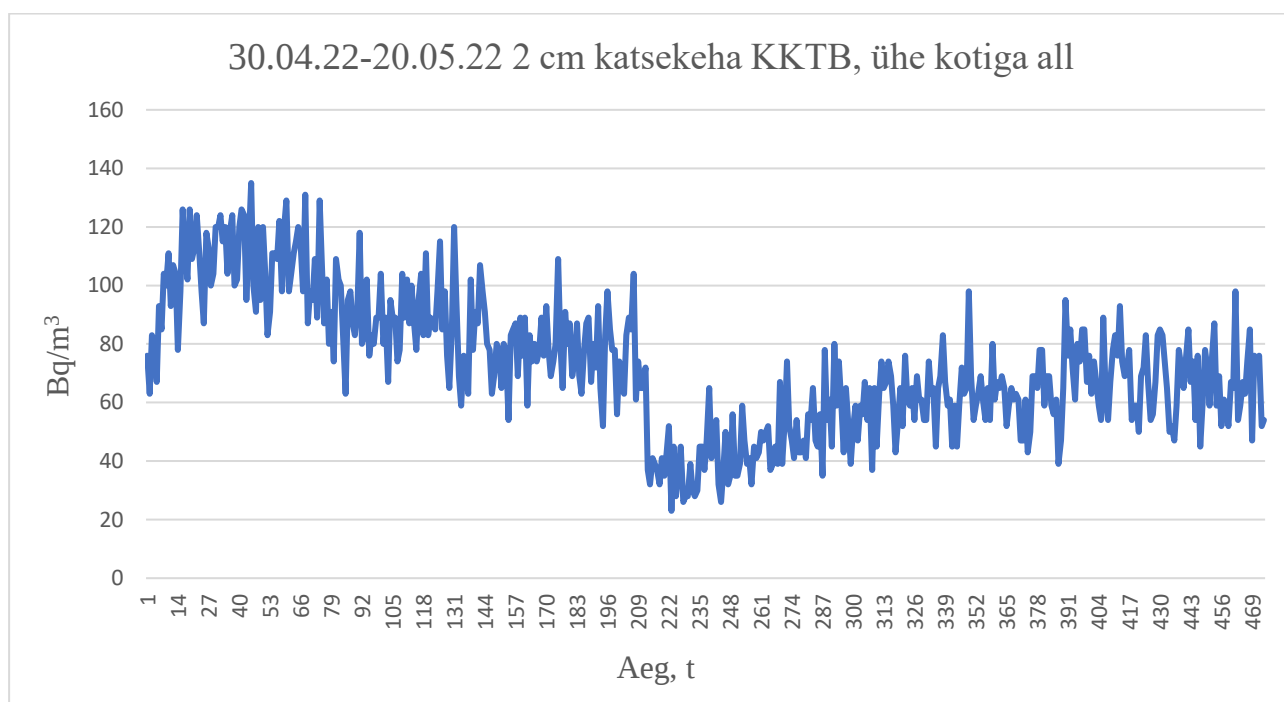
$$\frac{(N_0 - N)}{N_0} = (1 - e^{-(\lambda_{dif} \times t)}). \quad (5)$$

Radooni difusiooni suhteline voog D (1/(m²×s)) katsekehasse arvutatakse järgneva valemiga (6) [1]:

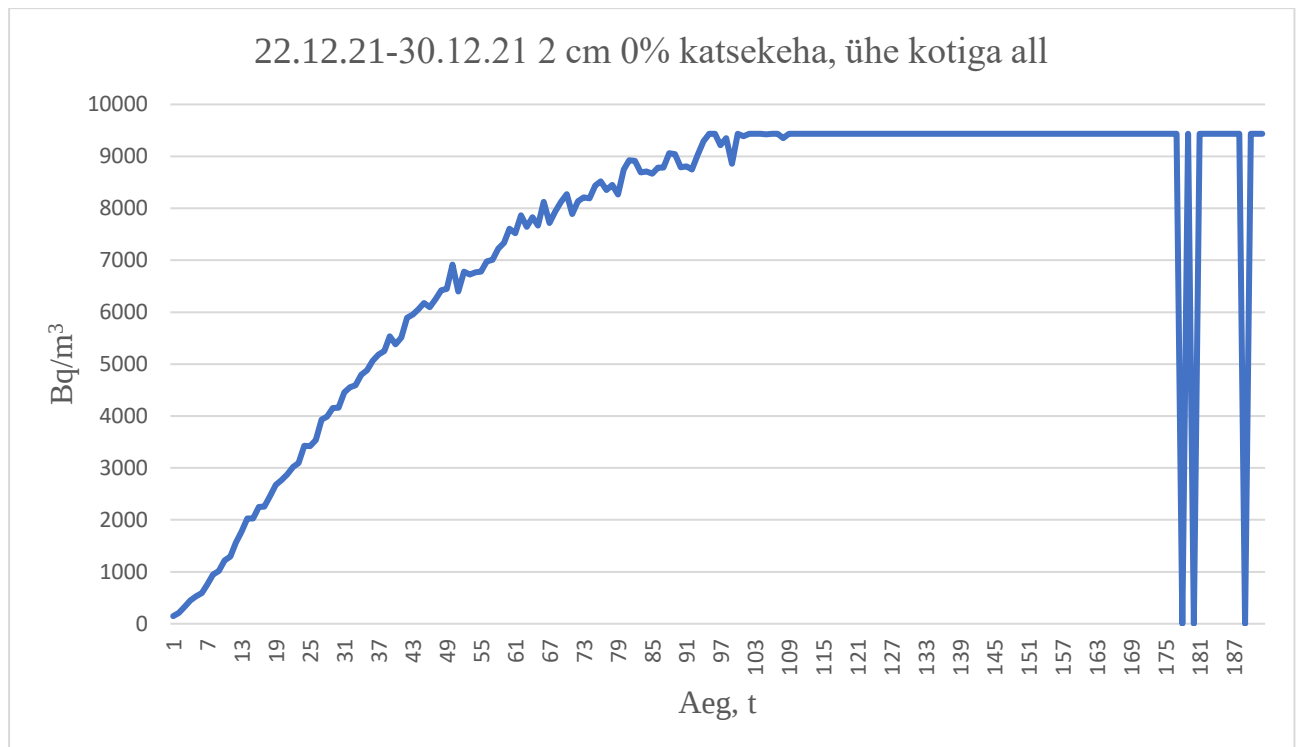
$$D = \frac{\Delta}{s \times t}, \quad (6)$$

kus Δ - radooni suhteline vähenemine tunni jooksul;
 s - katsekeha aktiivse pindala, m²;
 t - aeg, s.

Esimene katse: alumises kambris on üks tseoliidi kott, mille korral radooni aktiivsuskontsentratsioon kambris on $14247 \pm 1400 \text{ Bq/m}^3$. 2 cm paks katsekeha KKTB on valmistatud tavalisest betoonist ning kivistunud vees 28 päeva. Läbiva difusiooni mõõdeti ajavahemikul 30.04.22 - 20.05.22 (Joonis 4). Katsekeha läbivat difusiooni sellel ajavahemikul ei ole näha. Katsel ilmneb kambris selle sulgemismomendil oleva radooni lagunemine. Katsest on selgelt näha, et vees kõvenenud betoonist katsekeha tõkestab tuntavalt katsekeha läbiva radooni difusiooni. Järgmisel graafikul (Joonis 5) on võrdluseks toodud vastava, sama koostisega, tavalisest betoonist, kuid kuiva õhu käes kivinenud katsekeha radooni kontsentratsiooni kasvu ülemises kambris. Kahe katse võrdlemisel näeme, et vees kivinenud betoonist katsekeha korral on difusioon läbi katsekeha olematu võrreldes kuivas keskkonnas kivinenud katsekehaga, milles oli radooni kontsentratsiooni kasv alguses ligi 142 Bq/m^3 tunnis ehk 1% alumise kambri kontsentratsioonist tunnis. [14]

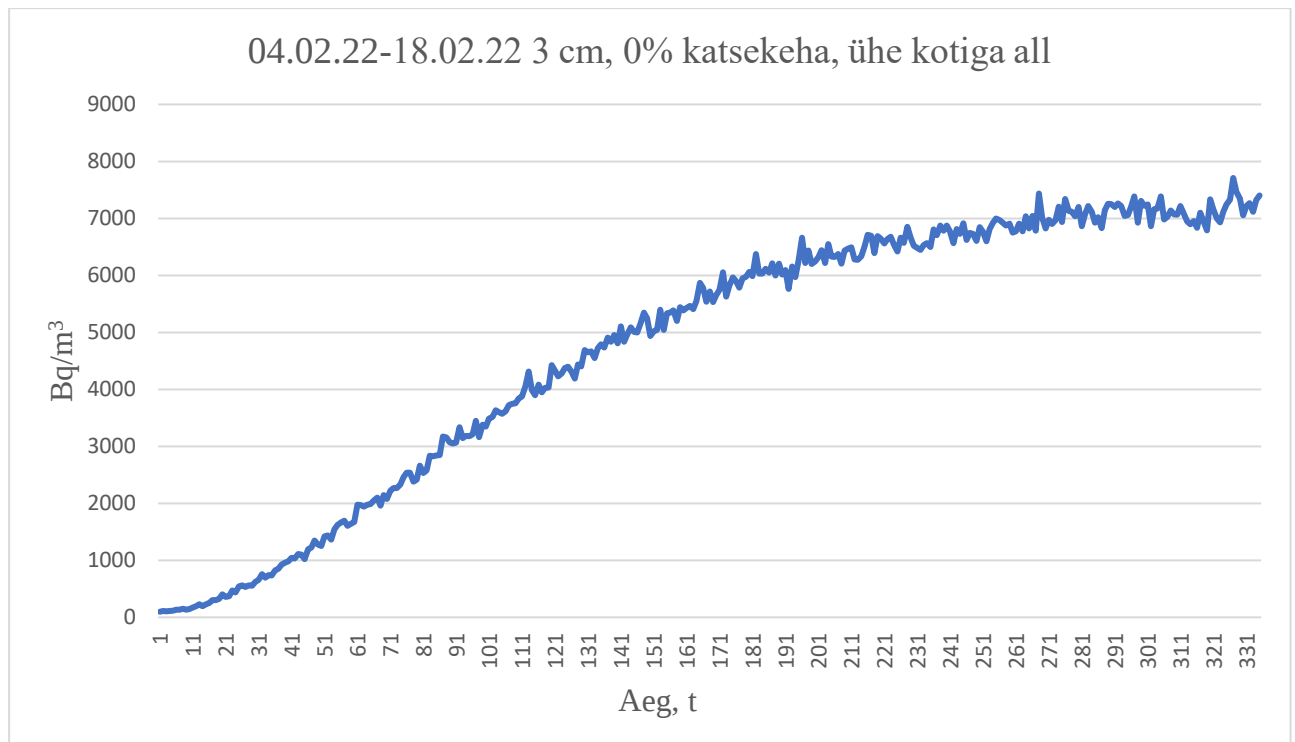


Joonis 4. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris, 30.04.22 - 20.05.22. Vees kivinenud tavalisest betoonist 2 cm katsekeha



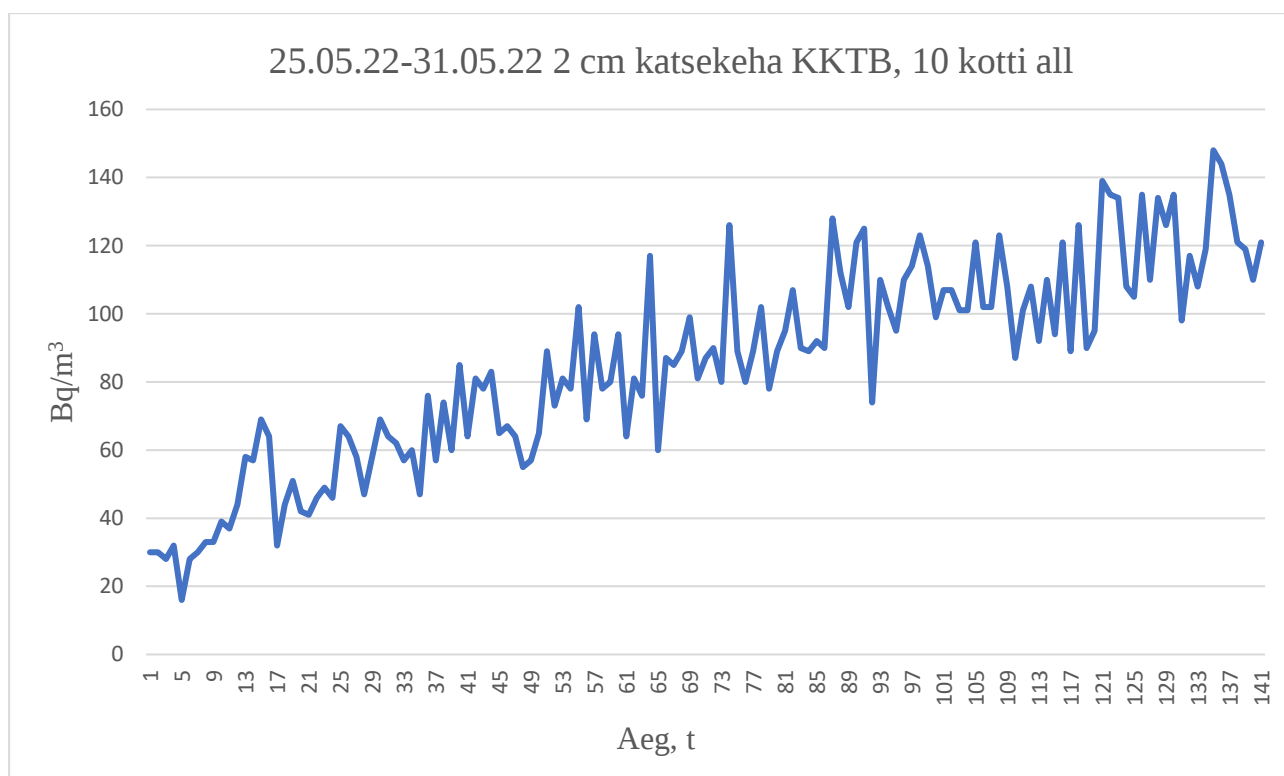
Joonis 5. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris, 22.12.21 - 30.12.21. Õhus kivinenud tavalisest betoonist 2 cm katsekeha B. Abbasi lõputööst [14]

Illustratsiooniks on toodud järgmisel graafikul (Joonis 6) ülemises kambris kuivas keskkonnas kivinenud 3 cm paksuse tavalisest betoonist katsekeha korral radooni kontsentratsiooni kasvu. Kontsentratsiooni kasvu kiirus sellel on 33,7 Bq/m³ tunnis. [14]

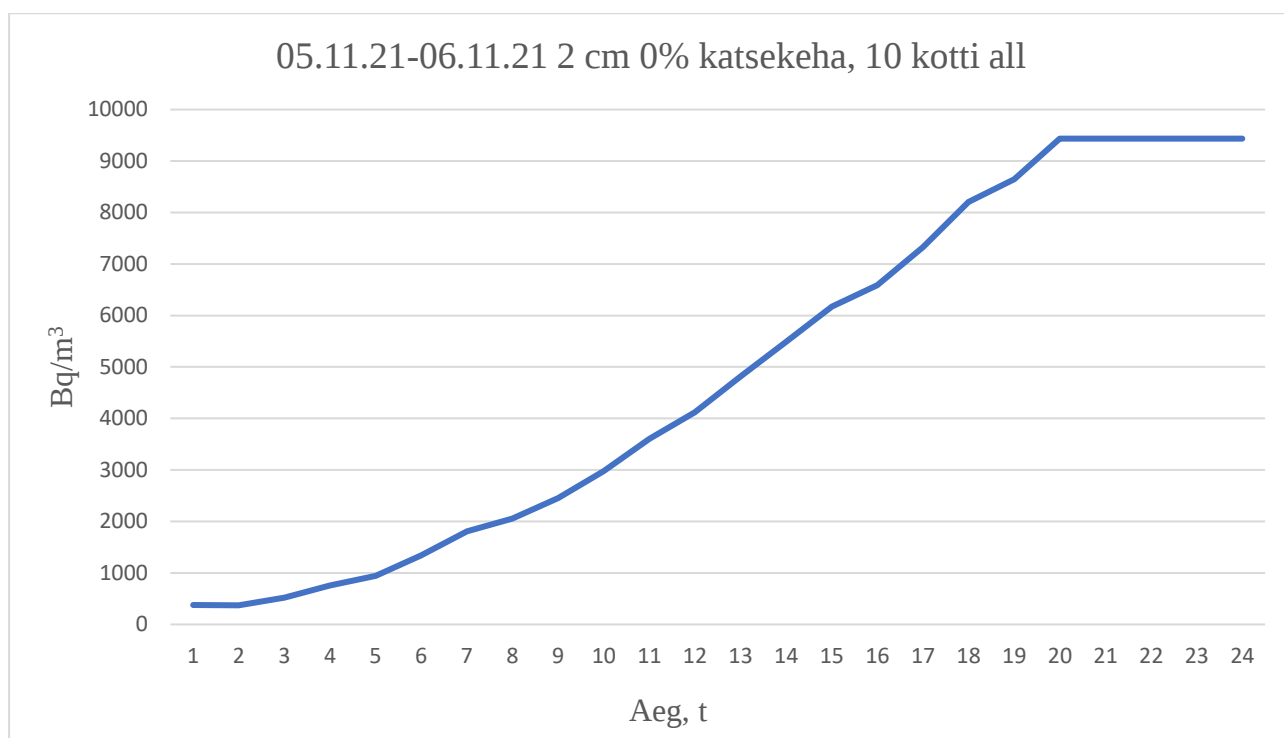


Joonis 6. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris 04.02.22 - 18.02.22. Õhus kivinenud tavalisest betoonist 3 cm katsekeha B. Abbasi lõputööst [14]

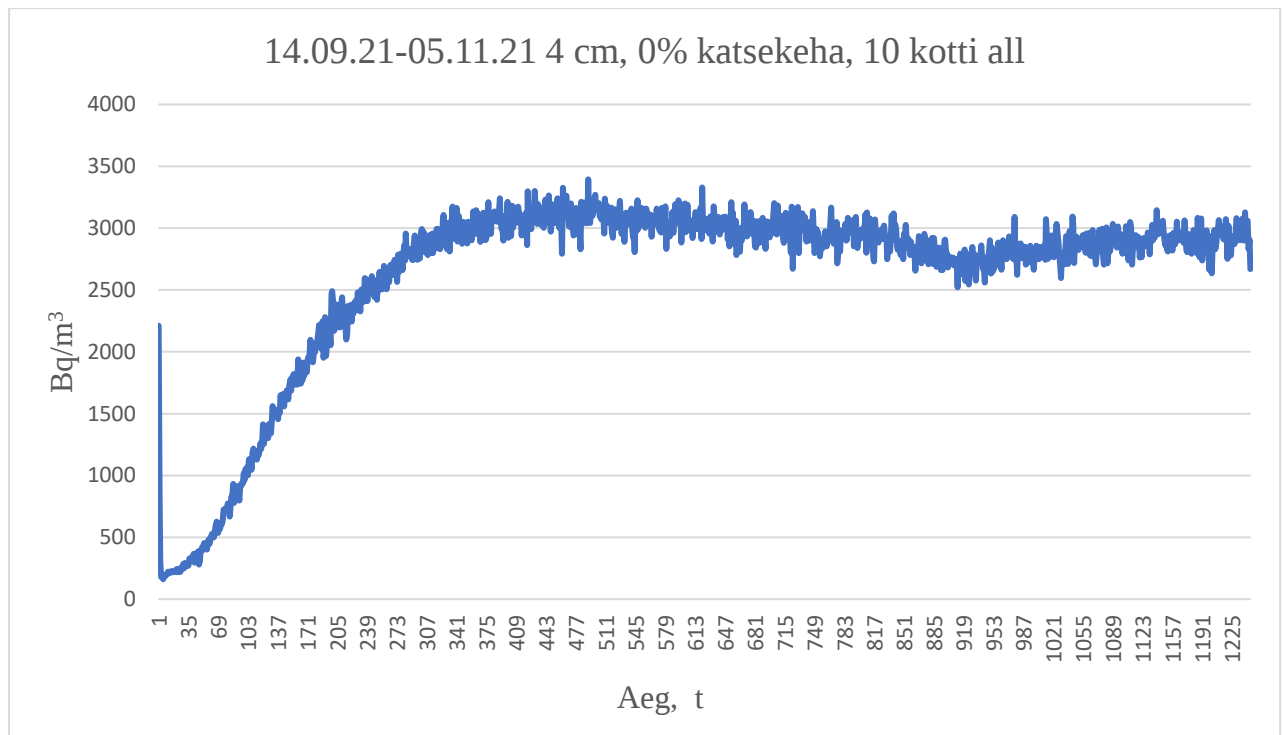
Teine katse: alumises kambris on 10 tseoliidi kotti, mille korral radooni aktiivsuskontsentratsioon kambris on $122100 \pm 12000 \text{ Bq/m}^3$. 2 cm paks katsekeha KKTB on valmistanud tavalisest betoonist ning vees kivistunud 28 päeva. Läbiva difusiooni mõõdeti ajavahemikul 25.05.22 - 31.05.22 (Joonis 7). Graafikult on näha, et sellise radooni kontsentratsiooni gradiendi korral suureneb ülemises kambris radooni kontsentratsioon kiirusega $1,1 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Võrreldes selle katse tulemust üliõpilase Britt Abbasi sama paksuga ja koostisega, kuid kuivas keskkonnas kivinenud betoonist katsekeha difusiooni kiiruse mõõtmise tulemusega (Joonis 8) 472 Bq/m^3 tunnis, on näha tulemuste ligi 430 kordset erinevust. Võrdlus samast betoonist, kuid 4 cm paksu kuivas keskkonnas kivinenud katsekeha läbinud radooni kontsentratsiooni mõõtmise tulemustega alumises kambris kümne tseoliidi koti olemasolul (Joonis 9), $12,4 \text{ Bq/m}^3$ tunnis, on näha ligi 11 kordset erinevust. [14]



Joonis 7. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris, 25.05.22 - 31.05.22. Veep kivilinenud tavalisest betoonist 2 cm katsekeha



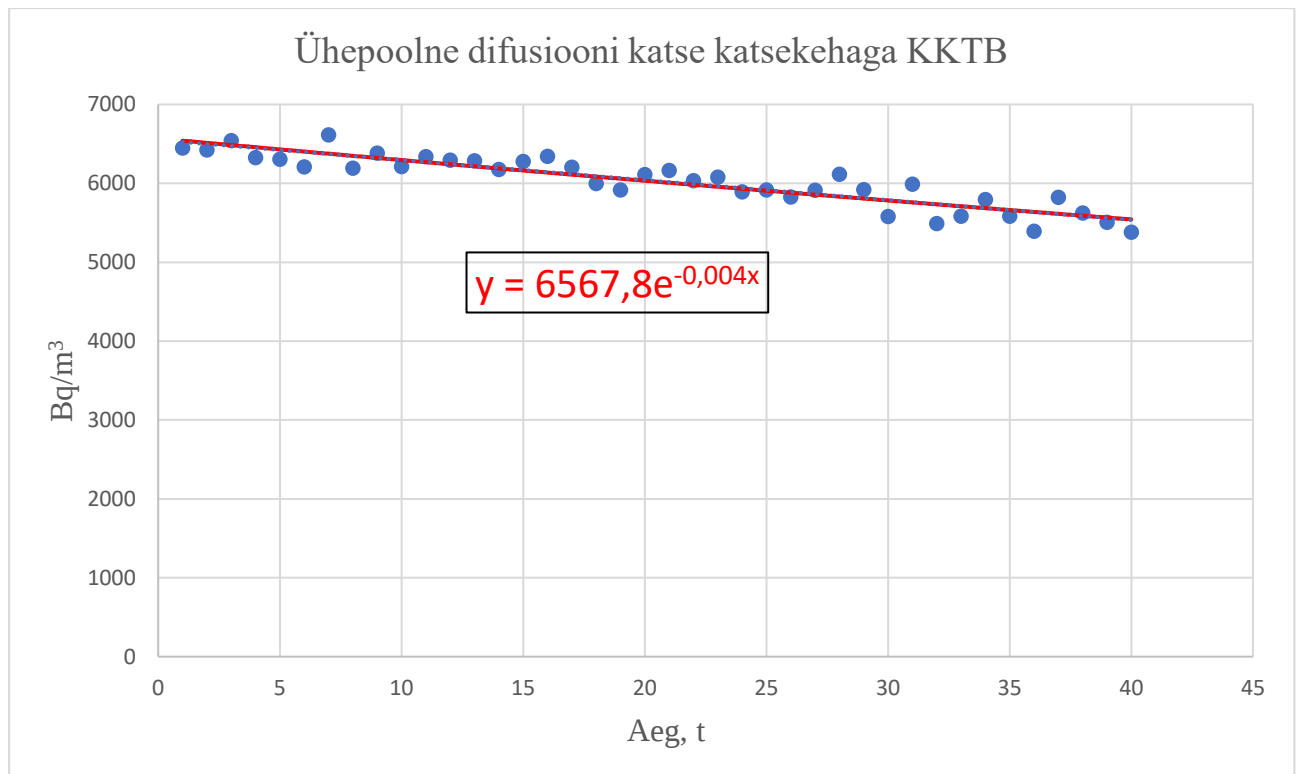
Joonis 8. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris, 05.11.21 - 06.11.21. Õhus kivilinenud tavalisest betoonist 2 cm katsekeha B. Abbasi lõputööst [14]



Joonis 9. Rn-222 kontsentratsiooni käik ülemises kambris 14.09.21 - 05.11.21. Õhust kivinenud tavalisest betoonist 4 cm katsekeha B. Abbasi lõputööst [14]

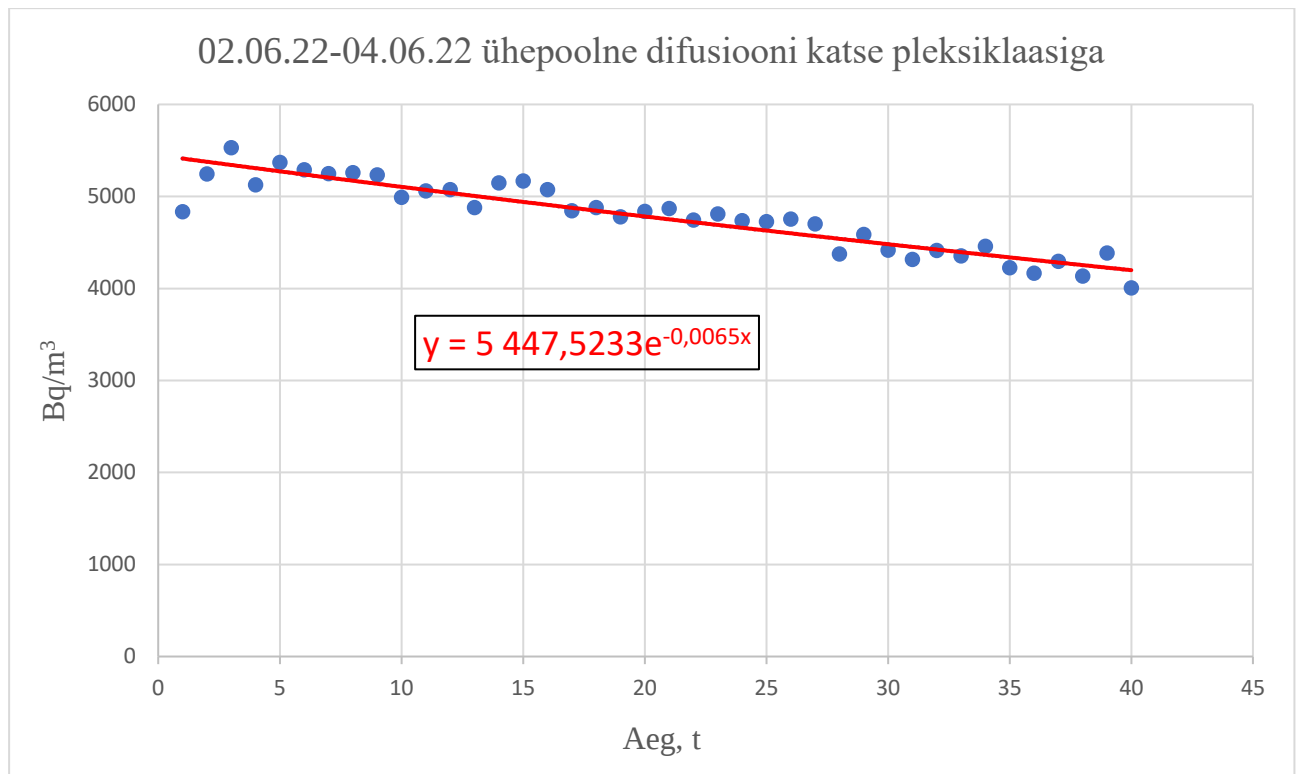
8.9 Katsekeha ühepoolse difusiooniteguri leidmine

Lisaks katsekeha läbiva difusiooni kiiruse mõõtmisele hinnati ka katsekehasse difundeeruva radooni kiirust. Lähtuti standardi ISO 11665-12 mõttest. Katseks asetati alumisse kambrisse mõõteseadet Radon Eye Plus2 ning pumbati sinna välisest generaatorist (graptoliitargiliidi täitega balloonist) radooni sisaldavat gaasi. Katse käigus vaadeldi radooni kontsentratsiooni vähenemist alumises kambris, mida võrreldi samasugustes tingimustes tehtud katsega pleksiklaasist katsekehaga. Hermeetiliselt suletud kambris väheneb radooni kontsentratsioon radooni lagunemise tõttu eksponentsiaalselt vastavalt radooni poolestusajale. Poolestusaja pöördväärtust nimetatakse radooni lagunemisteguriks. Kuna meil pole tegemist absoluutselt hermeetilise kambriga, siis peame arvestama ka radooni lekkest tulenevat parandustegurit. Selle leidmiseks tehakse radooni ühepoolse difusiooni leidmise eksperiment pleksiklaasiga kaetud mõõtekambriga. Teades kambri lekketegurit ning radooni lagunemistegurit saab määrata valemi (2) abil katsekeha kaetud kambri korral katsekehasse difundeeruva radooni difusiooniteguri. Koondteguri leidmiseks teostatakse katseseadmete regressioonanalüüs valemiga (4), lähendades katseandmeid eksponentsiaalsele lagunemise graafikule. Lahutades koondteguri väärtusest radooni lagunemisteguri ning lekketeguri, saadakse difundeeruva radooni difusioonitegur.



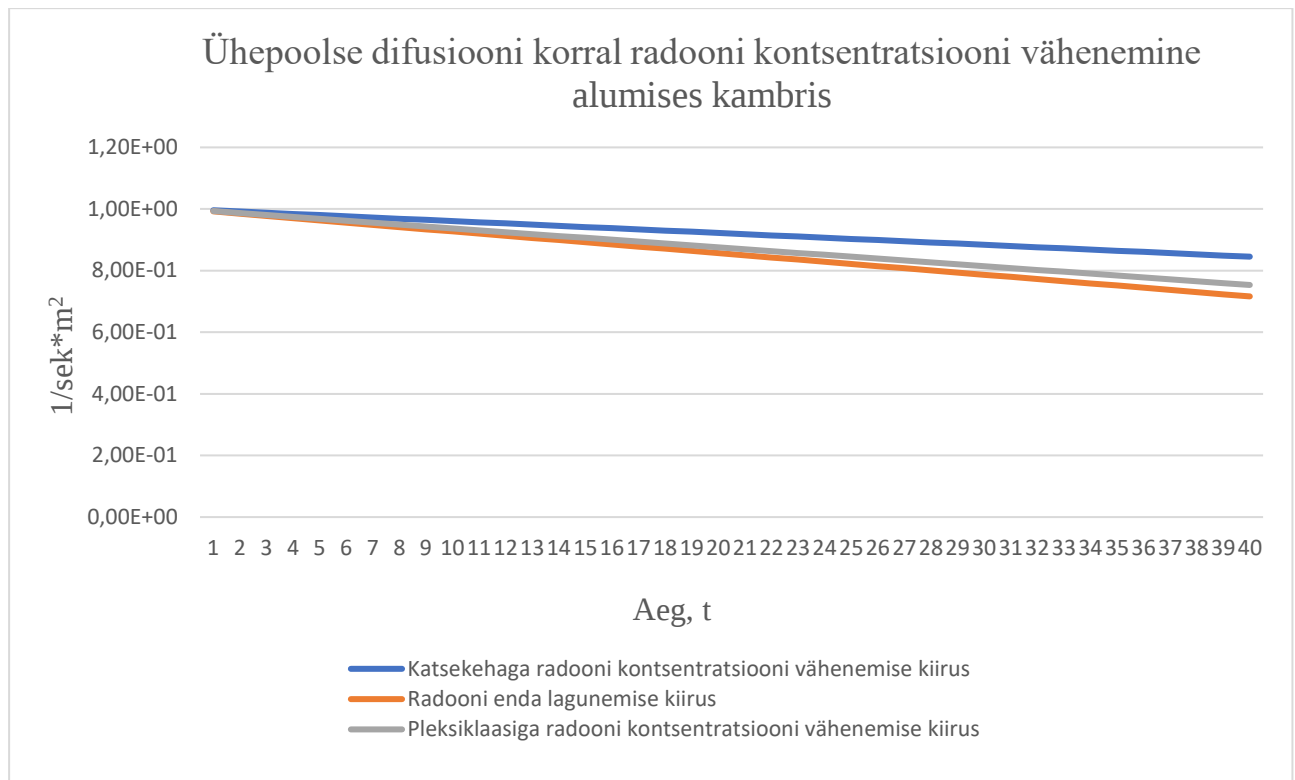
Joonis 10. Ühepoolne difusiooni katse katsekehaga KKTB

Ühepoolne difusiooni katse katsekehaga KKTB toimus ajavahemikul 31.05.22 - 02.06.22. Eksponentsiaalsel graafikul (Joonis 10) on näha ühepoolse difusiooni korral radooni kontsentratsiooni vähenemine alumises mõõtekambris. Saadud graafiku võrrendist võeti väärtust (λ), mis on $4 \times 10^{-3} \text{ t}^{-1}$.



Joonis 11. Ühepoolne difusiooni katse pleksiklaasiga

Ühepoolne difusiooni katse pleksiklaasist katsekehaga toimus ajavahemikul 02.06.22 - 04.06.22. Ekspponentsiaalsel graafikul (Joonis 11) on näha ühepoolse difusiooni korral radooni kontsentratsiooni vähenemine pleksiklaasiga kaetud alumises kambris. Saadud graafiku võrrendist võeti väärtust (λ), mis on $6,5 \times 10^{-3} t^{-1}$.



Joonis 12. Alumises kambris radooni kontsentratsiooni vähenemise võrdlus

Ekspirimendi tulemuste võrdlemisel radooni lagunemisekõveratega (Joonis 12) on näha, et nii betoonist katsekeha KKTB kui ka pleksiklaasi korral on radooni kontsentratsiooni vähenemine aeglasem võrreldes radooni enda lagunemisest. Selle põhjuseks on tõenäoliselt katsekeha KKTB korral asjaolu, et katsekeha läbiva difusiooni katse korral katsekeha difundeerunud radoon ekshaleerub tagasi alumisse mõõtekambrisse (ajaline vahe nende eksperimentide vahel oli ainult 5 tundi). Pleksiklaasiga katse korral on aga tõenäoliselt tegemist alumise kambri saastatusega tseoliidi kotist pärineva pudenenud tseoliidi tolmuaga, mis ekshaleerib lisaks kambrisse pumbatud radoonile lisa. Katsekehast tagasi ekshaleerunud radoon lisas radooni lagunemiskoeffitsiendile (λ_{Rn} (0,007554 1/t)) valemist (2) juurde -0,0035 1/t ja ainult kambri saastest pärineva radoon -0,0010 1/t. Seejuures lekke osa ei saa sellel korral hinnata ilma täiendavate mõõtmiseta.

9 JÄRELDUSED

- Katsekehade survetugevus sõltub vormi valatud segu korralikust tihendamisest.
- Hüdrofoobse lisandi REBA DM lisamisel katsekehadele, katsekehade survetugevus väheneb segus mingi keemilisel reaktsioonil tekkinud gaasimullide tõttu. 2% lisandiga katsekehade korral vähenes survetugevus 28%.
- Radooni kontsentratsiooni mõõtmise ajal tuleb pöörata tähelepanu, et difusioonikambris stabiilse olukorra saavutamine võtab aega.
- Korralikult 28 päeva vees kivistanud betoonist katsekeha tõkestab radooni difusiooni läbi 2 cm paksuse katsekeha 430 korda efektiivsemalt võrreldes kuivas keskkonnas kivinenud aga analoogilise koostisega ja sama paksuga betoonist katsekehaga.
- Kuivas keskkonnas kivinenud betooni korral ei ole betoonis oleva tsemendi koostisosad lõpuni reageerinud ning valminud betoon pole seetõttu homogeenne.
- Betooni radoonipidavus on kasutav hea indikaatorina, et hinnata betooni auru- ja gaasipidavust.
- Tagasi ekshaleeruv radoon mõjutab eksperimendi tulemust.

KOKKUVÕTE

Radooni difundeerimine läbi betoontarindite on pikaajaline mittelineaarne protsess, mis sõltub väga paljudest teguritest, millest olulisemad on betooni kivinemise tingimused. Käesoleva lõputöö käigus selgitati ideaalselt 28 päeva vees kivilinenud betoonist katsekehade nii survetugevust kui ka radooni difundeerimist nendesse ja läbi nende. Töö käigus tehti kindlaks, et radooni difusioon läbi katsekehade on pikaajaline protsess, mille tõttu on ka vastavad eksperimendid väga aegnõudvad.

Katsetes kasutati leidur H. Kruuvi valmistatud katseseadeldist, mis koosneb, vastavalt katsete iseloomule ja eesmärgile kas ühest või kahest mõõtekambrist, mõõtevahendist AlphaGuard DF2000, mõõtevahendist Radon Eye Plus2, ühendusvoolikutest, erinevatest radoonigeneraatorist ning muudest väikedetailidest.

Saadud survetugevuse katsete tulemused näitavad, et 2% hüdrofoobse lisandiga katsekehade keskmine survetugevus on 29% väiksem võrreldes selles töös valminud tavalisest betoonist kuubikute survetugevusega. Üliõpilase Britt Abbasi lõputöös saadud sama koostisega katsekehade survetugevuse tulemused on 24% väiksemad käesolevas töös saadud tulemustest.

Difusiooni katsetel saadud tulemused näitavad, et korralikult vees kivilinenud betoonist katsekehal on läbiva difusiooni kiirus väiksem, võrreldes kuivas keskkonnas kivilinenud erineva paksuga betoonist katsekehadega. Esimeses katses alumises kambris ühe tseoliidi koti olemasolul 2 cm paksune vees kivilinenud betoonist katsekeha võrreldi kuivas keskkonnas kivilinenud sama paksuga ja koostisega katsekehaga ning 3 cm paksu kuivas keskkonnas kivilinenud katsekehaga. Katsekeha läbivat difusiooni vees kivilinenud katsekehal katse perioodil ei olnud näha, kuna kuivas keskkonnas katsekehal oli radooni kontsentratsiooni kasv ülemises kambris ligi 142 Bq/m^3 tunnis. 3 cm paksu katsekehal oli radoonikontsentratsiooni kasv ülemises kambris ligi $33,7 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Teises katses alumises kambris kümne tseoliidi koti olemasolul 2 cm paksune vees kivilinenud betoonist katsekeha võrreldi kuivas keskkonnas kivilinenud sama paksuga ja koostisega katsekehaga ning 4 cm paksu kuivas keskkonnas kivilinenud katsekehaga. Vees kivilinenud katsekehal oli radooni kontsentratsiooni kasv ülemises kambris $1,1 \text{ Bq/m}^3$ tunnis, kuna kuivas keskkonnas katsekehal oli radooni kontsentratsiooni kasv 472 Bq/m^3 tunnis ning sellega on näha tulemuste ligi 430 kordset erinevust. Võrdlus samast betoonist, kuid 4 cm paksu kuivas keskkonnas kivilinenud katsekeha läbinud radooni kontsentratsiooni mõõtmise tulemustega alumises kambris kümne tseoliidi koti olemasolul,

12,4 Bq/m³ tunnis, on näha ligi 11 kordset erinevust. Seega gaasipidavuse seisukohast on ülimalt oluline lasta betoonil kivineda niiskes keskkonnas.

SUMMARY

Preparation of Various Concrete Samples and Diffusion Testing

The diffusion of radon through concrete structures is a long-term nonlinear process that depends on a huge number of factors, the most important of which are the conditions of hardening of concrete. In the course of this thesis, both the compressive strength and the diffusion of radon into and through them were perfectly explained by the concrete samples hardened in water for 28 days. In the course of the work, it was established that the diffusion of radon through the samples is a long-term process, due to which the corresponding experiments are also very time-consuming.

The tests used a test device invented by the inventor H. Kruuvi, which consists of either one or two measuring chambers, measuring devices AlphaGuard DF2000, Radon Eye Plus2, connecting hoses, various radon generators and other small parts, according to the nature and purpose of the tests.

The results of the obtained compressive strength tests show that the average compressive strength of the 2% hydrophobic impurity samples is 29% lower than that of the conventional concrete cubes produced in this work. The compressive strength results obtained by Britt Abbasi in her thesis are 24% lower than the results achieved in this work.

The results of the diffusion tests show that a properly hardened sample has a lower rate of diffusion through it, compared to different thickness numbers of the hardened concrete samples in a dry environment. In the first test, in the presence of one bag of zeolite in the lower chamber, a sample of 2 cm water-stained concrete was compared with a sample of the same thickness and composition as the sample in the dry environment and with a sample of 3 cm in the dry environment. Diffusion of the sample through water on a hardened sample was not observed during the test period because the dry environment on the sample showed an increase in radon concentration in the upper chamber of approximately 142 Bq/m³ per hour. On a 3 cm sample, the increase in radon concentration in the upper chamber was approximately 33,7 Bq/m³ per hour. In the second test, in the presence of one bag of zeolite in the lower chamber, a sample of 2 cm water-stained concrete was compared with a test piece of the same thickness and composition as the sample in the dry environment and with a sample of 4 cm in the dry environment. The sample hardened in water had an increase in radon concentration in the upper chamber of 1,1 Bq/m³ per hour, since in dry environments the test piece had an increase in radon concentration of 472 Bq/m³ per hour, showing a difference of approximately 430 times. Comparison with the results of the measurement of the radon

concentration in the lower chamber of a sample of the same concrete but 4 cm sample hardened under dry conditions, in the presence of 10 zeolite bags, 12,4 Bq/m³ per hour, shows a difference of approximately 11 times. It is therefore of the utmost importance for gas-tightness to allow concrete to harden in a humid environment.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] IAEA, „Measurement and Calculations of Radon Releases from Norm Residues,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf. [Kasutatud 25. märts, 2022].
- [2] „Вся правда о газе радон и радиации,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geoliss.ru/news/vsya-pravda-o-gaze-rodon-i-radiatsii/>. [Kasutatud 29. mai, 2022].
- [3] Ч. Т. Т. Хиен, „Изучение влияния влажности грунтов на результаты измерения радона,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47579/1/TPU538441.pdf>. [Kasutatud 25. märts, 2022].
- [4] „Decay chain,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain. [Kasutatud 30. mai, 2022].
- [5] Keskkonnaamet, „Radoon ja sellest tingitud terviseriskid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ekvy.ee/attachments/article/17/20120209%20RadooniTerviseriskid.pdf>. [Kasutatud 26. märts, 2022].
- [6] „Радон и его воздействие на здоровье человека,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. [Kasutatud 26. märts, 2022].
- [7] „Mis on radoon,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://radoonitorjekeskus.ee/mis-on-radoon/>. [Kasutatud 30. mai, 2022].
- [8] Keskkonnatehnika, „Eesti pinnase radooniriski kaart,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://keskkonnatehnika.ee/eesti-pinnase-radooniriski-kaarti-taiendati-2020-aasta-radooniuuringute-andmetega/>. [Kasutatud 15. mai, 2022].
- [9] „Радон в помещении. Защита дома от радона,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://domekonom.su/radon-zaschita.html>. [Kasutatud 3. aprill, 2022].
- [10] Radoonitõrjekeskus, „Mis on radoon ning miks kontrollida selle taset enne ehitama asumist?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ehitusuudised.ee/sisuturundus/2016/05/31/mis-on-radoon-ning-miks-kontrollida-selle-taset-enne-ehitama-asumist>. [Kasutatud 15. mai, 2022].
- [11] „Условия твердения бетона и уход за ним,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://zabi.com/ru/blog/usloviya-tverdeniy-betona-i-uhod-za-nim/>. [Kasutatud 26. mai, 2022].
- [12] „Difusioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.taskutark.ee/harjuta/difusioon/>. [Kasutatud 10. mai, 2022].

- [13] M. Mägi, *Radooni difusioon: Lõputöö*, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2022.
- [14] B. Abbasi, *Aktiivsöeliseandiga betoonisegude radooni difusiooni mõõtmise uuring: Lõputöö*, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2022.
- [15] „REBA DM,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://remei.ee/wp-content/uploads/2014/01/REBA-DM-eesti-k.pdf>. [Kasutatud 14. mai, 2022].
- [16] „Monitor radon isotopes in water, on-scene with the new wave of AlphaGUARD,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.southernscientific.co.uk/news/2019/09/monitor-the-concentration-of-radon-isotopes-with-the-bertin-alphaguard-df2000>. [Kasutatud 18. mai, 2022].
- [17] „“NEW” SMART Radon Detector for Home owner,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://radonftlab.com/radon-sensor-product/radon-detector/new-rd200p-radon-detector/>. [Kasutatud 11 mai, 2022].
- [18] „Radioaktiivse lagunemise seadus,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Radioaktiivse_lagunemise_seadus. [Kasutatud 27. mai, 2022].