



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Britt Abbasi

AKTIIVSÖELISANDITEGA BETOONISEGUDE RADOONI DIFUSIOONI MÕÕTMISE UURING

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2022

Britt Abbasi

**AKTIIVSÖELISANDITEGA
BETOONISEGUDE RADOONI
DIFUSIOONI MÕÕTMISE UURING**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut
Hoonete ehituse õppekava
Juhendaja: Rein Koch

Tallinn 2022

Mina

Britt Abbasi,

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 autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja (Rein Koch, */allkirjastatud digitaalselt/*)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Britt Abbasi

(*autori nimi*)

sünnikuupäev:

15.07.1982

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

Aktiivsöelisanõutega betoonisegude radooni difusiooni mõõtmise uuring

(*lõputöö pealkiri*)

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/

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Britt Abbasi**
Õpperühm: KHE/LA
Eriala: Hoonete ehitus (1827)
Lõputöö teema: **Aktiivsöelisanaditega betoonisegude radooni difusiooni mõõtmise uuring**

Lähteandmed töö koostamiseks:

Juhised radoonikaitse meetmete kasutamiseks uutes ja olemasolevates hoonetes EVS-840:2017

Measurment of Radioactivity in the Environment-Air: Radon 222-ISO/TS11665-12

Measurment and Calculation of Radon Releases from NORM Residues

Alpha Guard Professional Radon Monitor DF2000

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Radoonist üldiselt, radooni levimine ja sellega kaasnevad ohud
- Radooni kontsentratsiooni mõõtmine aktiivsöelisanaditega betoonisegude korral

Katsete ja katseandmete kavandamine, katsete läbiviimise protsessi kirjeldus, saadud andmete analüüsimine ja järeldused

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

- Üldine radooni ja selle tekke ja mõjude kirjeldus
- Mõõtmiskatsete protsessi kirjeldus
- Katsete tulemuste analüüs ja järeldused

Seletuskirja maht on 40-60 lk

Lõputöö juhendaja:	Rein Koch (nimi)	 (allkiri)	19.02.2021 (kuupäev)
Lõpetaja:	Britt Abbasi (nimi)	 (allkiri)	19.02.2021 (kuupäev)
Kinnitaja:	Aivars Alt ehitusinstituudi direktor	 (allkiri)	19.02.2021 (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 19.02.2021

Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2022

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. RADOON.....	8
1.1. Radoon pinnases	8
1.2. Radoon hoonetes.....	10
1.2.1. Radooni lubatud määrad Eestis	13
1.2.2. Radoonitaseme vähendamine hoonetes.....	13
2. AKTIIVSÜSI	14
2.1. Aktiivsöe omadused	15
2.2. Aktiivsöe kasutamine	15
3. KATSEKEHADE VALMISTAMINE.....	16
3.1. Kasutatavad materjalid	16
3.2. Abiseadmed ja vormid.....	17
3.3. Katsekehade valmistamise etapid.....	18
4. SURVEKATSEKEHAD	20
4.1. Survekatsekehade valmistamine.....	20
4.2. Survekatsete tulemused	22
5. APARATUUR JA METOODIKA.....	23
5.1. Radooni generaator.....	23
5.2. Ringluspump Alpha Guard DF2000.....	26
5.3. Katsekambrid.....	26
5.4. Mõõtevahend Radon Eye Plus2.....	27
6. RADOONI DIFUSIOONI MÕÕTMINE	29
6.1. Katsetulemuste mõjutajad.....	29
6.2. Katsetuste esimene etapp, 4 cm katsekehad	32
6.3. Katsetuste teine etapp, 2 cm katsekehad	32
6.4. Katsetuste kolmas etapp, erinevate paksustega katsekehad	33
7. TULEMUSTE ANALÜÜS	35
KOKKUVÕTE.....	39
SUMMARY	40
VIIDATUD ALLIKAD.....	42
Lisa 1. Survetugevuse akt.....	44

SISSEJUHATUS

Meie igapäevaelu ja tervist mõjutavad väga paljud erinevad tegurid ja nähtused, tihti ained, mille kohalolu me silmaga ei näe ega käega katsuda ei saa. Tänapäevalgi avastame aineid, mis on meile seni tundmatud olnud ja nende mõjud samuti. Tihti alahindame me nende mõju ega ole teostatud piisavalt uuringuid, et nende tagajärgi keskkonnale ja inimeste tervisele hinnata. Veel üsna hiljutises ajaloos peeti ka suitsetamist ja mõningaid kodukeemia tooteid tervislikeks ja soovitatavateks, mis tänapäeval on kõigile teadaolevalt surmavalt ohtlikud.

Ka maakoorest endast jõuab meieni tervist kahjustavaid mõjureid. Tänapäeval moodustab suure osa teadusest uurimused, kuidas keskkonda meie ümber ebasoovitavate mõjude eest kaitsta või seda vähendada. Ehituses on kaal sellel, et parendada ehitusmaterjale ja hoonete tehnoloogilisi lahendusi, et vältida ohtlike ainete jõudmist meie eluruumidesse. Üks salakavalamate tervisekahjustajatest on meie jaoks radoon, mis on nähtamatu ning tuvastatav ainult spetsiaalsete mõõteseadmetega või juba tagantjäreli inimeste tervisekahjustusi eri piirkondades hinnates ja võrreldes.

Radioaktiivsus avastati aastal 1896 Prantsuse füüsiku Antoine-Henri Becquerel (1852-1908) poolt. Järgneval aastakümnenil töötasid paljud teadlased selle nimel, et radioaktiivseid materjale paremini tundma õppida. Prantsuse keemik Marie Curie (1867-1934) ja tema abikaasa Pierre Curie (1859-1906) isoleerisid kaks uut elementi, polooniumi ja raadiumi. Aastal 1900 leidis Saksa füüsik Friedrich Ernst Dorn (1848-1916) kolmanda radioaktiivse elemendi [1].

Dorn leidis elemendi tänu Curie vaatlustele ja kuna Curie sellega edasi ei tegelenud, siis võttis Dorn uurimise üle. Kõigepealt leidis ta, et raadium toodab lagunemisel gaasi. Radioaktiivne gaas ekshaleerub õhku ja radioaktiivsus õhus on põhjustatud sellest gaasist koos radooniga [1].

Esmalt nimetas Dorn selle radioaktiivse gaasi „emanation“. Termin viitab millelegi, mis on ära antud. Järelikult midagi, mille raadium on ära andnud. Veel mõtles ta gaasile nimetada niton, mis ladina keeles tähendab helendamist, viidates selle helendavale iseloomule. Lõpuks jäi ta siiski nime juurde, mis viitab ka selle allikale ja raadiumist sai radoon [1].

Tulles tagasi ehituse juurde, siis on tänapäeval üks olulisemaid komposiitmaterjale betoon. Betooni annab ehituses lõputult võimalusi ja piirab seda vaid fantaasia. Enamuse betooni mahust moodustavad erinevad jämedad ja peened täitematerjalid ehk peamiselt liiv, kruus ja killustik. Populaarsed on ka erinevad taaskasutatavad täitematerjalid nagu näiteks ehituspraht ja kaevejäägid. Lubatud on ka tööstuslike jäätmete nagu räbu ja tuha kasutamine [2].

Betooni sisse lisatakse vastavalt vajadusele erinevaid keemilisi lisandeid, et parendada selle omadusi. Need on harilikult kas pulbri või vedeliku kujul ja moodustavad segust üsna väikese osa. Need lisatakse betoonile selle valmistamise ajal. Lisanditeks on näiteks kiirendid, mis tõstavad hüdratatsiooni kiirust ja aeglusteid, mis pidurdavad seda. Samuti lisatakse õhu manustajaid, mis on vajalikud sulamis-külmumistsüklite arvu suurendamiseks. Veel lisatakse plastifikaatoreid, mis parandavad töödeldavust, erinevaid pigmente, korrosiooni inhibiitoreid ja pumpamise abiaineid [2].

Uuemaks ja seni väheuuritud tehnoloogiaks on betoonile endale juba valmistamisjärgus ohtlike ainete ja gaaside püüdmiseks ja keskkonda jõudmise aeglustamiseks lisatavad materjalid. Üheks neist tulevikuteedest on aktiveeritud süsi. Siiani on uuritud väikeste söekoguste lisamisega, et suurendada betooni survetugevust ja segatud sütt nii tuha, plastipulbri kui muuga. Siinkohal oleks vajalik uurida, mis oleks optimaalne söe kogus survetugevuse mõistes, majanduslikel kaalutlustel ja radooni tõkestamise efektiivsuse maksimaalsus antud vahekordades. Kasutades ära aineid, mis nagunii tekivad mingite protsesside jääkainena ja seda väga suurtes kogustes, näiteks tuhk ja plast, oleks võimalik ohtlikud jäätmed ümber töödelda meile vajalikeks materjalideks [3], [4].

Antud töö keskendub algsetele katsetele, saamaks teada kui kiiresti radoon läbib nii-öelda puhast betooni ning kuidas mõjutab seda kiirust erineva koguse aktiivsöe lisamine. Sellest johtuvalt tuleks planeerida edasisi täpsemaid uurimusi, kas, kuidas ja millist aktiivsütt oleks võimalik meie piirkonnas ehituses edaspidi rakendada. Eelkõige tasuks vaadata taaskasutuse poole ning otsida loodust säästvaid rakendusi ehk püüda kasutada parimal viisil kohalikku materjali.

1. RADOON

Radoon on keemiline element, sümboliga Rn. Mendelejevi keemiliste elementide perioodilisussüsteemi 86. element. Asetseb see süsteemi seitsmendas rühmas ja selle aatommass on 222,018. See on radioaktiivne, toatemperatuuril värvitu, lõhnatu ja maitsetu väärisgaas. Järelikult väga raskesti tuvastatav, kuna on inimese meeltele tundmata. Radoonil on teiste gaaside kõrval kõige kõrgem keemistemperatuur $-61,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sulamistemperatuur $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kui temperatuur langeb alla keemistemperatuuri, siis radoon veeldub ja hakkab helendama rohekat või lillakat värvi. Kui jahutada tahkestumiseni, mis on väiksem kui sulamistemperatuur, muutub helendamine kollaseks ning jahutades alla $-180,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutub see oranžikas-punaseks [5].

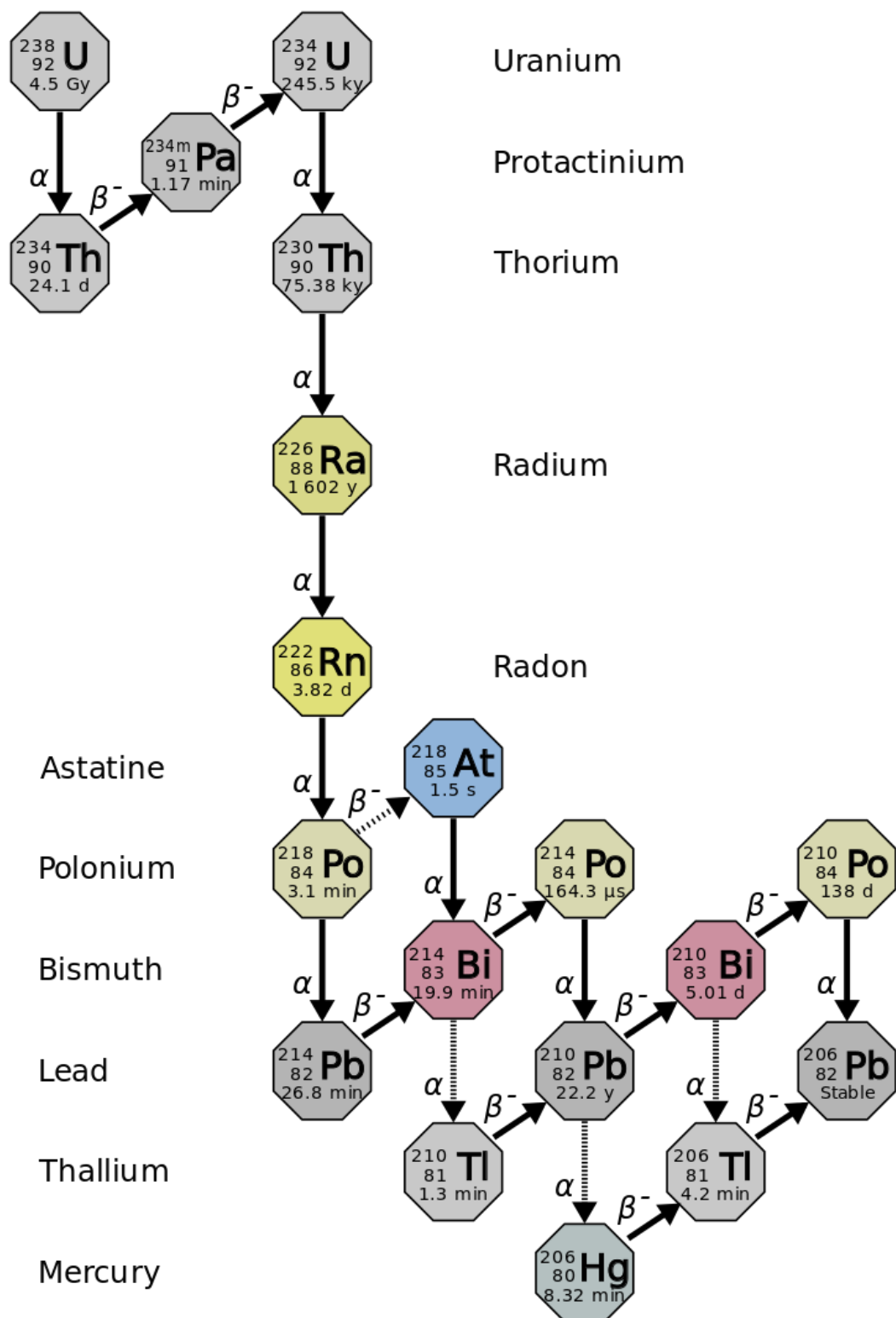
Radoon tekib peamiselt raadiumi lagunemise tulemusena. Radooni kõige stabiilsem isotoop radoon-222 on elueaga 3,8 päeva, mis laguneb poloonium-218-ks. Antud töö keskendubki eelkõige radoon-222-le [5].

Tänapäeval on radoon laialt tuntud saasteaine, mis moodustub uraanirikastes kivides ja pinnases. Gaasina tõuseb radoon maapinnas ülespoole ning kui pinnasele on ehitatud hooneid, siis võib radoon koguneda struktuuris ja liikuda sealt edasi ruumidesse. Seetõttu põhjustab see inimestele kontorites ja eluhoonetes tõsiseid terviseprobleeme. Radooni mõõtühikuks on bekerell-aktiivsuse ühik. 1 Bq lagunemine sekundis. Üks bekerell radooni on võrdne 18 fg ($1,8 \cdot 10^{-6}\text{g}$). See nimetus on tulnud eelnevalt mainitud Antoine Becquerel'i nime järgi. Bq/m³ on aktiivsuskontsentratsioon ehk eriaktiivsus [1].

1.1. Radoon pinnases

Radoon tekib looduslikult, uraani lagunedes. Kui uraan laguneb, siis tekitab see erinevaid elemente, kuid need ei mõjuta meid oluliselt, sest jäävad maa alla. Nendest erinevalt radoon gaasina tõuseb ülespoole ja väljub maakoorest. Radoonil ei ole küll pikka eluiga, kuid lagunedes moodustab see tahkeid elemente nagu poloonium-214, poloonium-218 ja plii-214. Need elemendid on ohuks tervisele. Kui neid sisse hingata, siis jäävad need kopsudesse ja põhjustavad seal radiatsiooni, tappes või tugevalt kahjustades rakke. Seetõttu kui radoon jõuab hoonesse, põhjustab see ajaga inimestele tõsiseid hingamisprobleeme, kopsuvähki ja muid tervisekahjustusi [1].

Uraani lagunemisahel on näha järgneval joonisel (Joonis 1).

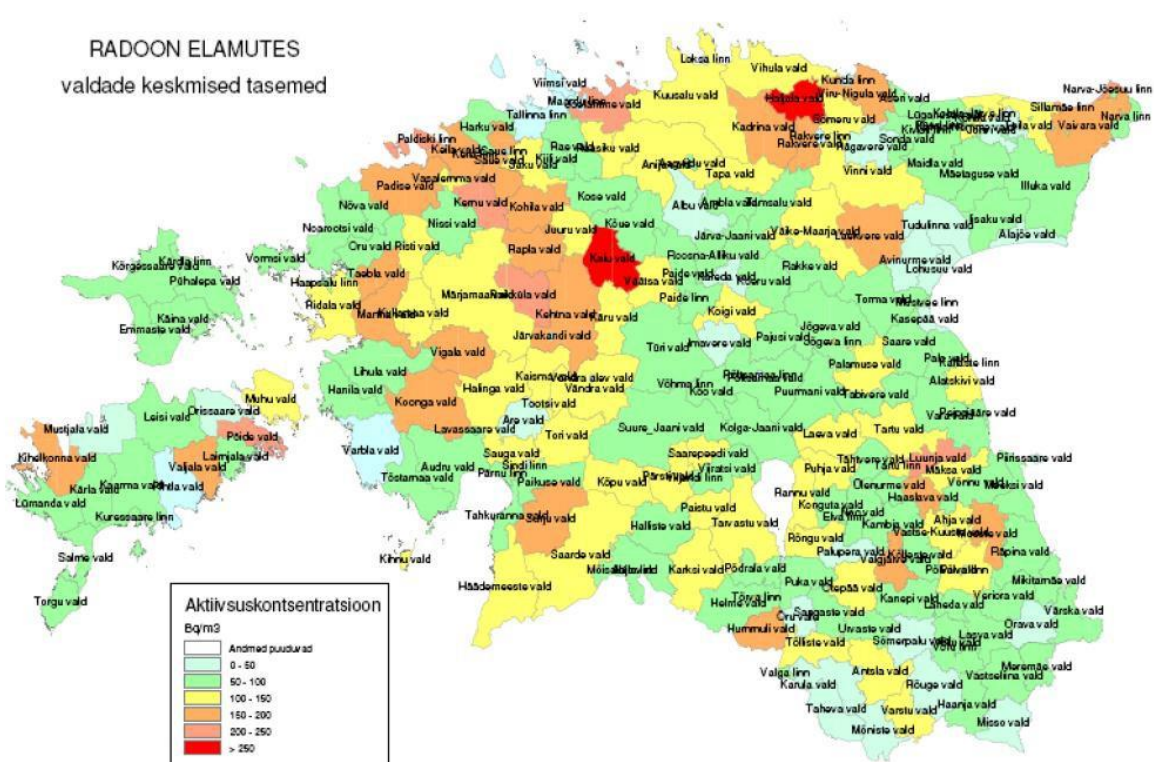


Joonis 1. Uraani lagunemisahel [6]

1.2. Radoon hoonetes

Radooni kontsentratsioon hoonetes sõltub väga paljudest teguritest. Suuresti määrab selle ära hoone asukoht ja selle alune pinnas, kuid ka maja konstruktsioon ja üldised inimeste käitumismustrid. Tase sõltub ka temperatuurist ja muudest ilmastikunähtustest nagu tuul ja vihm. Radooni tase võib eriti kõrgeks tõusta talvel. Kuna maapind hoone ümber on külmunud, siis tungib rohkem radooni hoone alt sisse. Samal ajal on hoone aga soojustatud ja kui puudub korrektne ventilatsioon, siis ei pääse radoon hoonest välja. Seetõttu on väiksemates keldriga elamutes tihti palju suuremad tasemed parema isoleerituse tõttu ja väiksemad tasemed korterelamutes [7].

Radooni sisaldus hoonetes ei sõltu ilmtingimata pinnaseõhu radooni sisaldusest, seega võib väga erinevate radoonitasemetega hooneid leida samadest geoloogilistest tingimustest. Erinevate valdade keskmised radooni tasemed on näha (Joonis 2).

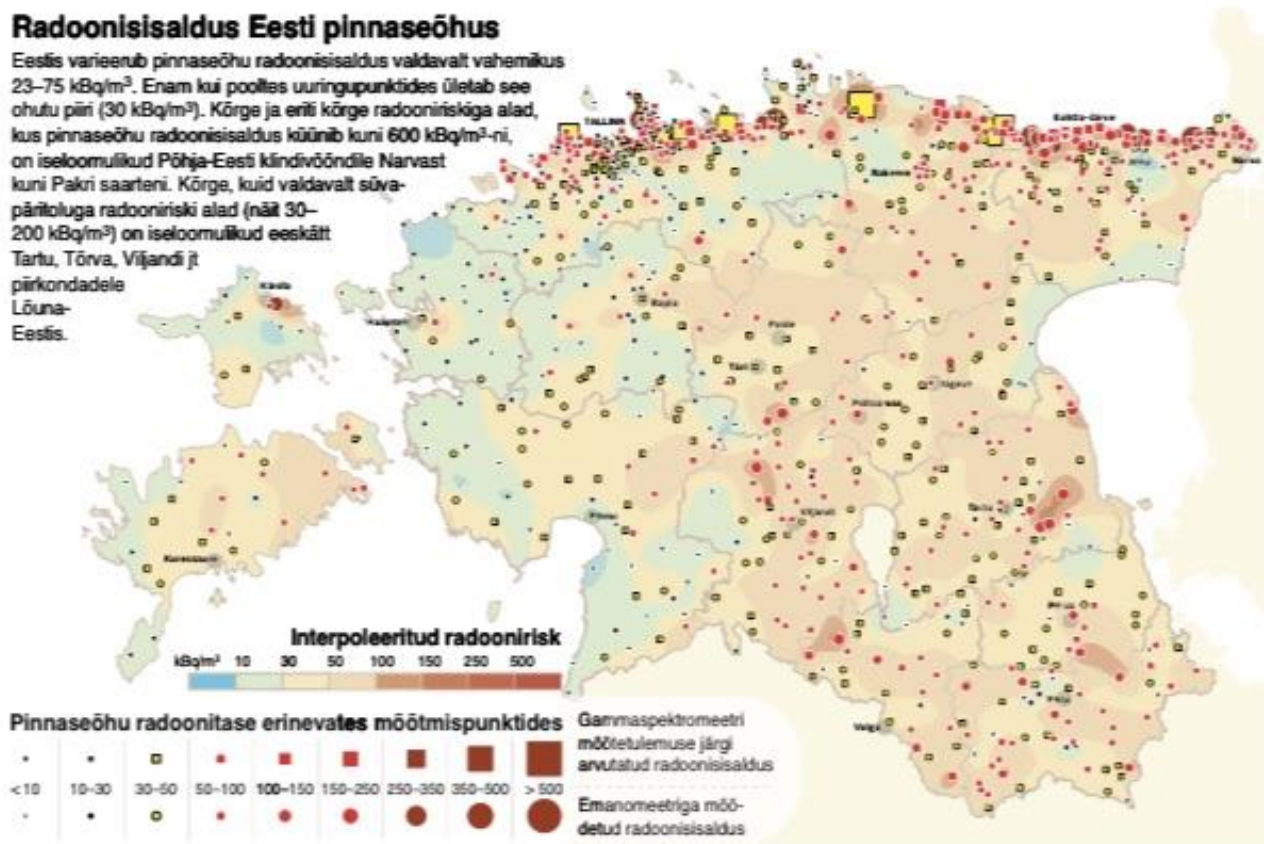


Joonis 2. Keskmised radooni tasemed elamutes valdade kaupa [7]

Võrdluseks eelmisele joonisele saab välja tuua kaardi pinnaseõhu radoonitasemest Eesti erinevates mõõtmispunktides. Kaart on näha (Joonis 3).

Radoonisisaldus Eesti pinnaseõhus

Eestis varieerub pinnaseõhu radoonisisaldus valdavalt vahemikus 23–75 kBq/m³. Enam kui pooltes uuringupunktides ületab see ohutu piiri (30 kBq/m³). Kõrge ja eriti kõrge radooniriskiga alad, kus pinnaseõhu radoonisisaldus küünib kuni 600 kBq/m³-ni, on iseloomulikud Põhja-Eesti kändivööndile Narvast kuni Pakri saarteni. Kõrge, kuid valdavalt söva-päritoluga radooniriski alad (näit 30–200 kBq/m³) on iseloomulikud eeskätt Tartu, Tõrva, Viljandi jt piirkondadele Lõuna-Eestis.

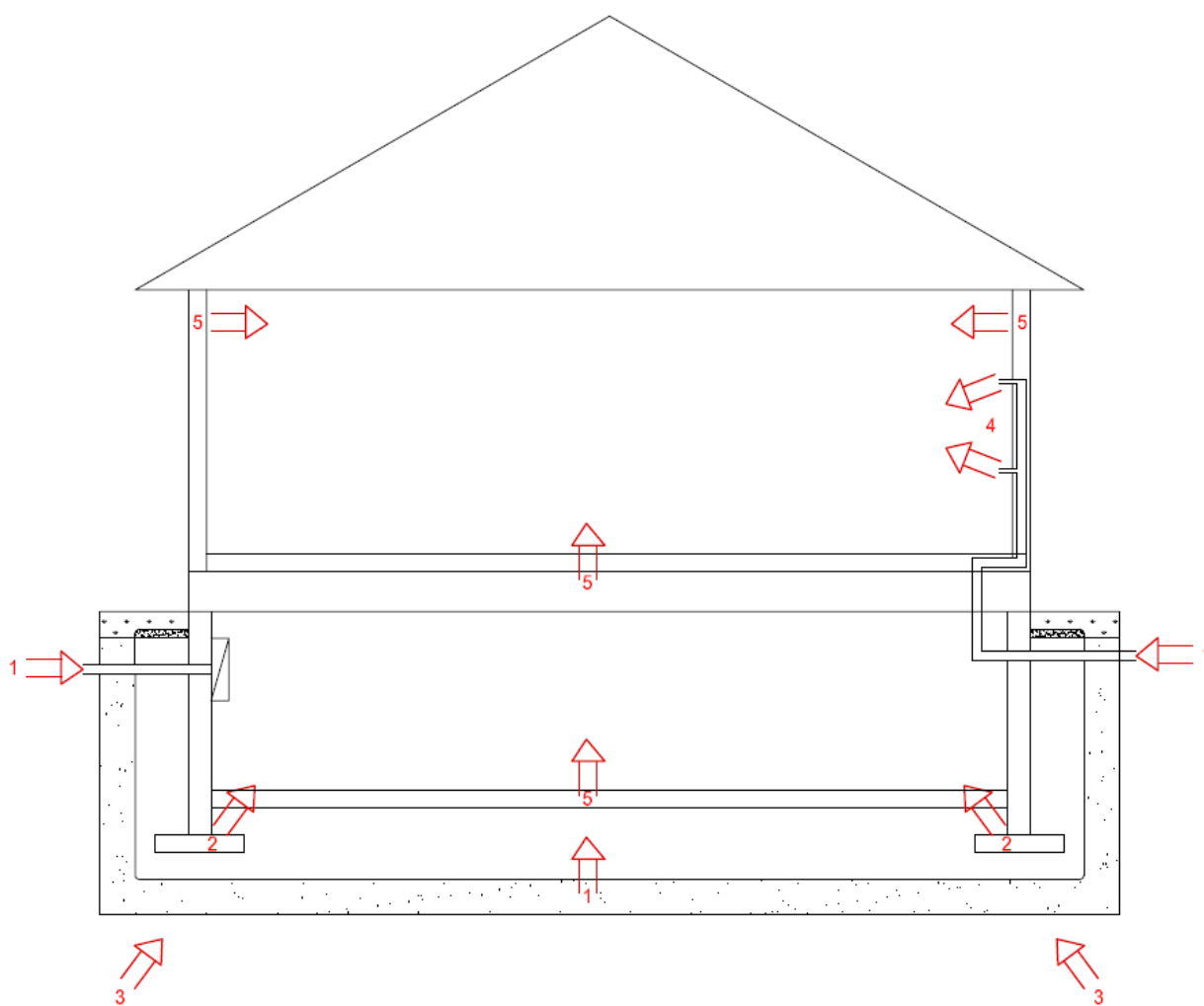


Joonis 3. Radoonisisaldus Eesti pinnaseõhus [8]

Radooni pääseb hoonesse mitmel erineval moel. Põhiline allikas on hoonete all ja ümber asuv pinnas ning mingil määral siseneb radoon tarbevee kaudu põhjaveest. Veel on võimalik aga tavaliselt väga vähene määr hoones kasutatud ehitusmaterjalidest ning kõrge radooniriskiga aladel ka hoonet ümbritsevast välisõhust [8].

Radooni kontsentratsiooni tase sõltuvalt pinnasest erineb ka Eesti piires väga palju. Kõrgemad tasemed on näiteks uraanirikka diktüoneemi kilda ja uraani sisaldava glaukoniiitliivakivirikas pinnases Põhja-Eestis ja näiteks graniidirikka moreeni levikuga Lõuna-Eestis. Arvestatava ohutasemega piirkondi leiab ka Kesk-Eestis. Olenemata piirkonnast on võimalik siiski kontsentratsioone hoonetes tunduvalt vähendada. Valides vastavad konstruktsioonilahendused või radooni sisenemist takistavad ehitusmaterjalid ja -tehnoloogiad [7].

Radoonitaseme mõõtmised hoonetes tuleb teha kõiki tegureid arvestades, läbimõeldult ja pika aja jooksul. Kuna tase on mõjutatud väga paljudest teguritest ja ka ilmast, siis võiks seda teha vähemalt terve aasta jooksul. Väga oluline on mõõtmised teostada kütteperioodil. Alltoodud joonis selgitab lahti radooni sisenemise levinuimad viisid (Joonis 4) [8].



- 1 ja 2 - maaalusest pinnasest pärinev radoon, mis pääseb sisse keldri, vundamendi ja seinte vahelistest pragudest või maa-aluste juhtmete ka kaablite sisenemiskohast
- 3 - süvapäritoluga radoon
- 4 - põhjaveest pärinev radoon
- 5 - ehitusmaterjalidest pärinev radoon

Joonis 4. Radooni sissepääsuteed hoone siseõhku

1.2.1. Radooni lubatud määrad Eestis

Eestis kehtivate määruste järgi on ruumiõhus lubatud radoonisisaldused määratud järgnevate määrustega.

Keskkonnaministri 30.07.2018 määrusega nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“ on tööruumides kehtestatud radoonisisalduse riiklik viitetase on 300 Bq/m³ ja selle ületamise korral on tööandja kohustatud kasutusele võtma radoonikaitsemeetmeid [9].

Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri 28.02.2019 määrusega nr 19 „Hoone ruumiõhu radoonisisalduse ja hoone tarindi ehitusmaterjalidest siseruumidesse emiteeritavast gammakiirgusest saadava efektiivdoosi viitetase“ on kehtestatud hoone ruumiõhu radoonisisalduse viitetasemeks 300 Bq/m³ [9].

1.2.2. Radoonitaseme vähendamine hoonetes

Kontsentratsiooni vähendamiseks õhus on võimalik rakendada erinevaid meetmeid. Kõige lihtsam on ruumide tuulutamine. Samuti tuleks tuulutada keldrit ja hoone osi, kus tihti ei viibita, kuid ka seal võivad tasemed minna väga kõrgeks. Oluline on hoida ruumid puhtad suitsu- ja tahmaosakestest, kuna radooni tütarproduktid kleepuvad neile ja liiguvad sealt edasi inimeste hingamisteedesse. Vältida tuleks siseruumides suitsetamist, mis põhjustab radooni ja suitsetamise sünergilist koosmõju tervisele [7].

Suuremat tööd nõuavad erinevad modifikatsioonid olemasolevates hoonetes. Üheks võimaluseks on tihendada või katta erinevaid pragusid ja avasid radoonikindlate materjalidega. Kui on võimalik, siis paigaldada ventilatsioonisüsteem selliselt, et maja all olev õhk suunatakse majast eemale. Erinevad ettevõtted pakuvad mitmeid lahendusi radoonikindlate kilede, teipide ja muude spetsiaalsete toodete näol. Alati tuleb jälgida hoone eripära ja vastavalt sellele leida lahendusi ja nende tõhusust ka kontrollida. Lihtsam on siiski juba ennetavalt hoone asukohta valides vältida ohtlikke piirkondi ja ehitada juba kohe radooni vastu tõhusalt kaitstult [7].

2. AKTIIVSÜSI

Erinevad uuringud annavad vastuolulist informatsiooni, kas oleks mõistlik kasutada granuleeritud või pulbri kujul aktiivsütt, seega tuli töö ajamahukuse piiratuse tõttu valida neist üks. Erinevus seisneb suuresti valmis betooni tugevusomadustes, kuid tõenäoliselt ka radooni vastu kaitses. Küsimärgi all ja edasist põhjalikumalt uurimist vajavad ilmselt ka vastava betooni suhe niiskuse ja kestvuse ning muude parameetrite suhtes [4].

Antud töö katsetes kasutati granuleeritud kookospähkli sütt, mis on näha (Foto 1). Eksperimentides on tõestatud, et kookospähkli koorest saadud aktiivsüsi on võrdluses teistega tunduvalt efektiivsem. Ühes eksperimendis võrreldi pähklikoorest, kookospähkli koorest, kivisööst ja puidust saadud aktiivsütt. Tulemustest selgus, et kookospähklist saadud aktiivsüsi vähendas tugevalt radooni ekshalatsiooni betooni. Tulemused olid vastavalt pähklikoor 44,3%, kookospähkli koor 47,1%, kivisüsi 29% ja puu 19,2% [4].



Foto 1. Granuleeritud aktiivsüsi

2.1. Aktiivsöe omadused

Aktiivsüsi on söe vorm, mis on laialt kasutusel filtreerimaks õhust ja veest välja erinevaid saasteaineid. See on töödeldud või siis teisisõnu aktiveeritud, et tema poorid oleksid väga väikesed ja kogupind oleks seega suurem. See võimaldab paremat adsorbeerimist. Aktiivsütt valmistatakse tavaliselt erinevatest jääkainetest. Aktiveeritud süsi ei seo hästi teatud kemikaale, nende hulgas alkohol, tugevad happed ja alused, metallid ning enamus anorgaanilisi aineid nagu liitium, naatrium, raud, plii, arseen, floor ja boorhape [10].

2.2. Aktiivsöe kasutamine

Aktiivsüsi on kasutusel metaani ja vesiniku säilitamiseks, õhupuhastuseks, lahustite taastamiseks, kofeiini eemaldamiseks, kulla puhastamiseks, metallialduseks, veepuhastina, meditsiinis, kanalisatsiooni hoolduses, õhufiltrites ja respiraatorites ning mujal [10].

Üks suurimaid tööstuslikke rakendusi hõlmab endas aktiivsöe kasutamist metalli viimistlusel galvaniseerimisel. Näiteks on see peamine puhastustehnoloogia, eemaldamaks ebavajalike lisandeid nikeldamise lahusest. Mitmed orgaanilised kemikaalid on lisatud, et parendada omadusi nagu heledus, siledus, plastilisus ja muud näitajad [10].

Suurt kasutust leiab aktiivsüsi meditsiinis kus see on tarvitusel mürgistuse ravimisel ja üledooside puhul. Tablettide ja kapslite kujul aktiivsüsi on enamuses riikides apteegis vabalt ostetav, et ravida erinevaid seedehäireid [10].

Põllumajanduses on aktiivsüsi lubatud aine orgaanilises vallas nii loomakasvatuses kui ka veinide tegemiseks. Loomakasvatuses on see kasutusel kui pestitsiid söödalisand, töötlemise abivahend ja desinfektsioonivahend. Orgaanilises veinitööstuses kasutatud kui töötlusvahend adsorbeerimaks tumedaid värvipigmente. Üldiselt on süsi kasutusel pea kõikides eluvaldkondades, seda kütusemahutitest kuni toidulisandite ja nahahoolduseni [10].

3. KATSEKEHADE VALMISTAMINE

3.1. Kasutatavad materjalid

Katsekehad on valmistatud segust Weber Mix 35/45 3D145-2, 1 mm. Lisatud on 0-0,2 mm graniiti ja kookospähklist valmistatud aktiivsütt ning vastavalt segu kogusele vajalik protsent vett. Vormid on määratud eelnevalt rapsipõli põhjalise Eko täisvormiõliga. Segu valmistuse ettevalmistamine ja vahendid on näha (Foto 2). Segu valmistamine toimus kuivadest koostisainetest, lisades vastavalt retseptile vett ja segati segumasinaga, mis on näha (Foto 3). Peale segu vormi valamist see tihendati pulga abil ning kaeti kilega. Katsekehad eemaldati vormist 24 tunni pärast.



Foto 2. Segu ettevalmistamine



Foto 3. Segumasin

3.2. Abiseadmed ja vormid

Katsekehade valmistamise jaoks spetsiaalsed vormid on Tartu teenelise leiutaja Hando Kruuvi mõtte- ja loometöö tulemus [11]. Meenutavad need tavapäraseid koogivorme. Vormi küljed on metallist ning küljelt klambriga kinni tõmmatavad. Aluseks segu valamiseks erinevate paksustega liimpuidust kettad, mille kõrgust oli võimalik vastavalt vajadusele tõsta. Kaane kasutamine ei õigustanud ennast, sest tekkis liiga palju õhumulle ja seetõttu on valatud katsed kaetud lihtsalt killega. Õhumullid raskendasid katsekehade paigutamist mõõtekambrite vahele sest jäid õhuvahed ja oli oht leketeks. Näidet sellest vormist on võimalik näha (Foto 4).



Foto 4. Katsekehade vorm

3.3. Katsekehade valmistamise etapid

Katsekehasid valmistati kokku 15 tükki erinevatel ajaetappidel. Täpsema info kõigi valmistatud katsekehade kohta leiab tabelist (Tabel 1).

Esimeses etapis valmistati neli katsekeha paksusega 4 cm. Nendest kaks olid ilma aktiivsöeta, ühes oli 4,2% sütt ja teises 10% sütt. Segu kogus oli kõikides katsekehades sama ehk 83,33%. Vastavalt söe lisamisele vähendati graniidi kogust. Vee kogus sõltus segu soovituslikust kogusest ja ka aktiivsöe kogusest selle suure veeimavuse tõttu.

Teises etapis valmistati viis katsekeha paksusega 2 cm. Nendest kolm olid ilma aktiivsöeta, ühes oli 5% sütt ja teises 10% sütt. Samuti nagu eelnevalt valmistatud katsekehades oli segu kogus 83,33% ja ülejäänud koostisainete kogused suurenesid või vähenesid vastavalt söe protsendile.

Kolmandas etapis valmistati edaspidiste täpsustavate mõõtmiste tarbeks neli 2 cm paksust katsekeha ning üks 3 cm paksune katsekeha. Katsekehad paksusega 2 cm olid vastavalt aktiivsöe sisalduse protsentidega 1-4 ja katsekeha paksusega 3 cm oli ilma söelisandita.

Näiteid erinevatest katsekehadest näeb järgnevatelt fotodelt (Foto 5), (Foto 6).

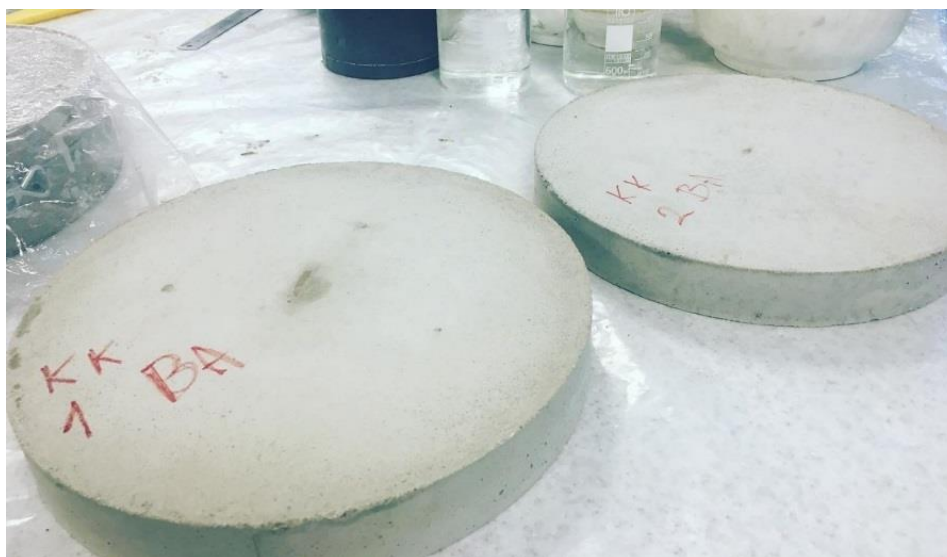


Foto 5. 4 cm paksusega katsekehad



Foto 6. 2 cm paksusega katsekehad

Katsekehade paksus esimeses etapis oli neli sentimeetrit, kuid kuna õhemad katsekehad andsid kiiremaid tulemusi, siis mindi üle katsetele õhemate variantidega. Hilisem kolme sentimeetri paksune katsekeha ilma söeta oli kahe- ja neljasentimeetrise katsekehade vahelise tulemi saamiseks valmistatud lisakatsekeha. Kõiki katsekehi nendes katsetes ei kasutatud ja need jäävad reservi.

Tabel 1. Katsekehade kokkuvõte

Nimetus	Süsi, %	Paksus, cm	Segu, g	Graniit, g	Süsi, g	Kuupäev
KK0	0,0	4	4 000	800	0	11.05.21
KK1	0,0	4	4 000	800	0	11.05.21
KK2	4,2	4	4 000	600	200	13.05.21
KK3	10,0	4	4 000	320	480	15.05.21
KK0	0,0	2	2 000	400	0	25.08.21
KK0	0,0	2	2 000	400	0	25.08.21
KK0	0,0	2	2 000	400	0	26.08.21
KK2	5,0	2	2 000	280	120	30.08.21
KK3	10,0	2	2 000	160	240	1.09.21
KK1%	1,0	2	2 000	376	24	6.01.22
KK2%	2,0	2	2 000	352	48	6.01.22
KK3%	3,0	2	2 000	328	72	7.01.22
KK4%	4,0	2	2 000	304	96	7.01.22
KK0	0,0	3	3 000	600	0	30.12.22

4. SURVEKATSEKEHAD

4.1. Survekatsekehade valmistamine

Selleks, et lisaks hinnata suurema protsendi graanulite kujul söe sisaldusega katsekehade tugevust, valmistati 10 cm pikkuste seintega kuubikujulised katsekehad. Katsekehade söesisalduse protsendid olid vastavalt null, viis ja kümme protsenti. Kõiki variante valmistati kolm või varuga neli, et hinnata keskmist tugevust. Katsekehad valmistati spetsiaalsetes vormides, mis sarnaselt teiste katsekehade vormidega tuli eelnevalt katta õhukese õlikihiga, et vältida segu kinni jäämist vormidesse. Seejärel valati segu vormidesse ja kaeti kilega. Katsekehad eemaldati vormidest 24 tunni möödudes. Survekatsekehad on näha (Foto 7).



Foto 7. Survekatsekehad

Pärast valmistamist hoiustati survekatsekehi 28 päeva vees, olles eelnevalt märgistatud veekindla markeriga (Foto 8). Peale seda purustati need Technotest Modena pressiga ja hinnati nende tugevust. Katsetuse näidet näeb (Foto 9).



Foto 8. Survekatsekehad vees



Foto 9. Survekatse purunemise näide

4.2. Survekatsete tulemused

Survekatsete tulemused näitasid, et segu nõrgenes märgatavalt söe lisamisel, kuid ka söe kogused olid üsna suured ja optimaalne kogus radooni eest kaitsmiseks on märgatavalt väiksem. See nõuab uusi katsetusi erinevate söe kontsentratsioonidega, et hinnata mõistlikku protsenti nii tugevuse kui tasuvuse mõistes. Katsekehade purunemise näiteid näeb (Foto 10).



Foto 10. Survekatsete tulemused

Kuna süsi katsetes oli graanulite kujul, siis ei olnud katsekehad kuigi tihedad ja see mõjutas suurelt tulemusi. Jahvatatud söe puhul oleksid tulemused tunduvalt paremad. Seetõttu oleks mõistlik tulevikus nii survekatse kui ka teiste katsekehade valmistamine jahvatatud söega. Kokkuvõtet survekatsete tulemustest näeb lisas (Lisa 1).

5. APARATUUR JA METOODIKA

Katsed viidi läbi kolme erinevat meetodit kasutades. Nagu ka katsekehade valmistamiseks mõeldud vormid olid radooni mõõtekambrite disain ja ehitus leiduri Hando Kruuvi töö. Kogu katseseadme ja mõõtmiste ülesehitus toimus juhendaja Rein Kochi kaasabil.

5.1. Radooni generaator

Radooni generaatorina kasutati esimeses etapis vedelgaasi ballooni, mille põhjas 3,5 kg graptoliitargilliiti, mis oli pärit Laulasmaa piirkonnast. Kuna see ei vastanud katsetes püstitatud ootustele, siis muudeti taktikat.

Vahepeelses etapis katsetati veel väiksema suurusega roostevabast terasest anumaga, väiksema koguse radooniallikaga. Vastav katsekomplekt on näha (Foto 14).

Hilisemates katsetustes kasutati välja mõõdetud väiksemaid koguseid tseoliiti, mis andis ühtlasema tulemuse ja väiksema, kuid piisava kontsentratsiooni mõõtetulemuste paremaks jälgimiseks. Kasutusel olnud tseoliit oli Viimsi veepuhastusjaamast saadud jääkprodukt. See on näha (Foto 11). Radooni allikaks olnud tekstiilist kotike paigaldati alumise mõõtekambri sisse, kuskohast seejärel jälgiti difusiooni ülemisse. Näidet vastavast radooniallikast näeb (Foto 12).



Foto 11. Tseoliit

Graptoliitargilliit on tumepruunikas argilliit ehk kõvastunud ja orgaanilise ainega segunenud savikivim. Kuulub ta põlevkivide hulka. Kivimit nimetatakse graptoliitargiidiks, sest koosneb peamiselt Palesoikumi mereloomade graptoliitide jäänustest [12].

Eestis leidub graptoliitargilliiti Ordoviitsiumi ladestu Pakerordi lademe Türisalu kihistuna, mis ulatub kuni Loode-Venemaani. Eesti maapõues leidub seda umbes 60 miljardit tonni ja see on maapinna lähedal, mis annaks võimaluse seda kergesti kaevandada, kuid selle kasutamine näiteks küttena ei oma palju väärtust ja põhjustab keskkonnale rohkem kahju kui see mõistlik oleks [12].



Foto 12. Välja mõõdetud radooni allikas tseoliit

Radooni generaator ühendati Alpha Guard ringluspumbaga ja mõõdukambriteks olid kiirkeedupoti põhjale ehitatud läbiviikudega mõõdukambrid ja kõik see oli ühendatud õhuringlusvooluga. Katsekehad paigaldati kõikide katsete puhul alumise mõõtekambri peale. Mõõtekambri ja katsekeha vahel oli kummitihend, mis määrati veel omakorda vahaga, et vältida leket. Ka katsekeha ja selle kohal oleva surveketta vahel oli kummitihend, mis omakorda määratud vahaga. Selle järel oli vastavalt katse iseloomule kas avatud pind või klambritega kõvasti kinnitatud teine mõõtekamber, kus surveketas oli paigutatud ülemise mõõtekambri peale. Keermestatud vardad külgedel hoidsid kogu seadeldist stabiilse ja sirgena. Kogu katseseade on näha (Foto 13).



Foto 13. Katseseade esimeses etapis



Foto 14. Katseseade teises etapis

5.2. Ringluspump Alpha Guard DF2000

Ringluspumbana kasutati Alpha Guardi sisse ehitatud pumpa, mis ühendati voolikute abil katseadeldisega. Õhuvoolu kiiruseks valiti kaks liitrit minutis. Alpha Guard on näha (Foto 15)

Alpha Guard on kaasaskantav aku- või võrgutoitel, suure mahutavusega ja kõrge tundlikkusega professionaalne radoonimõõtur. See mõõdab peale radooni kontsentratsioonile õhus samaaegselt veel ümbritsevat õhutemperatuuri, relatiivset niiskust ja atmosfääri rõhku [13].



Foto 15. Alpha Guard Professional Radon Monitor

5.3. Katsekambrid

Kambriteks olid kaks kiirkeedupotti, mis olid täiendatud voolu sisse- ja äravoolu võimalusega ning tihenditega, et vältida leket. Alumisse kambrisse oli lisatud väike ventilaator õhu segamiseks ja mõlemale kambrile oli võimaldatud toide. Mõõtekambrite sisemiseks diameetriks oli 23,7 cm ja katsekehadel diameeter vastavalt 30 cm. Kambrite mahutavus oli 12 liitrit. Katse põhimõte oli kontsentratsioonide erinevuse ja muutumise jälgimine kummaski kambris. Katsekeha oli paigaldatud kahe kambri vahele, surutud tugevalt klambritega vastu poti äärtes olevaid tihendeid, mis määratud õli põhise vahaga, et vältida igasugust leket. Lähemat näidet katsekambrite asetusest näeb (Foto 16).



Foto 16. Katsekambrid

5.4. Mõõtevahend Radon Eye Plus2

Esialgsetes katsetes oli planeeritud mõlemasse kambrisse asetada mõõtevahendid, kuid kuna alumises kambris oli kontsentratsioon liialt suur, siis edaspidi toimus mõõtmine ainult ülemises. Radon Eye on näha ülaltvaade (Foto 17) ja külgsuurt vaade (Foto 18). Antud seade võimaldab reaajas jälgida radooni kontsentratsiooni õhus. Radon Eye on suhteliselt väike seade. Oma 80 mm diameetri ja 120 mm kõrgusega. Tegemist on impulss-ioonikambriga mõõtjaga. Radooni mõõtmised salvestatakse tunniajaste vahedega ning andmeid uuendatakse iga kümne minuti tagant. Seade ühendub võrgus andmebaasiga ja võrguseadmetega, võimaldades ligipääsu andmetele erinevaid teid pidi. Tootja on loonud veebipõhise andmebaasi ning kasutaja saab ühenduda igal ajal kas nutitelefoni või muu seadmega [14].

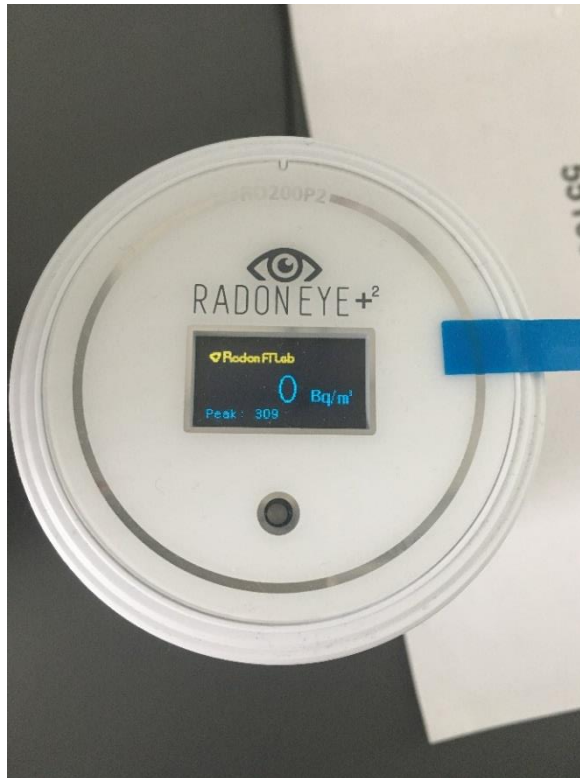


Foto 17. Radon Eye mõõteseadme pealtvaade

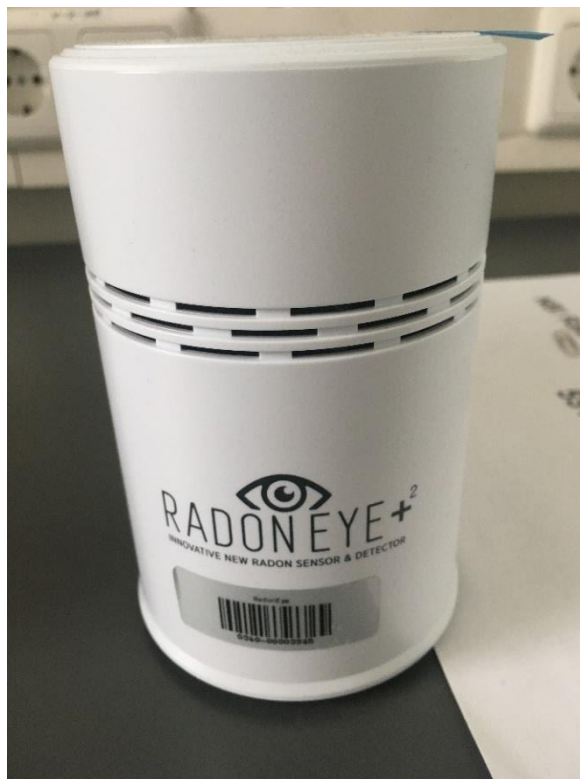


Foto 18. Radon Eye mõõteseadme külgvaade

6. RADOONI DIFUSIOONI MÕÕTMINE

Katsed on jagatud vastavalt radooni allika muutumisele kolme eri etappi. Esimeses etapis on kasutatud radooni sisendina vedelgaasi ballooni graptoliitargilliidiga, mis oli üsna ebastabiilne allikas. Algne radooni tase ei jõudnud piisavalt kiiresti taastuda ja katsed ei olnud juba algusest kuigi sarnased. Seisnes see katse põhimõtteliselt selles, et pumbati teatav kogus radooni alumise mõõtekambri sisse läbi Alpha Guardi lastes sellel mingi aja ringi käia, et taset ühtlustada. Järgnevalt jälgiti selle taseme alanemist alumises kambris ning sellega seoses difusiooni ülemisse kambriks või leket. Kõik katsed toimusid Tallinna Tehnikakõrgkooli 0-korruse laboris stabiilsetes toatingimustes.

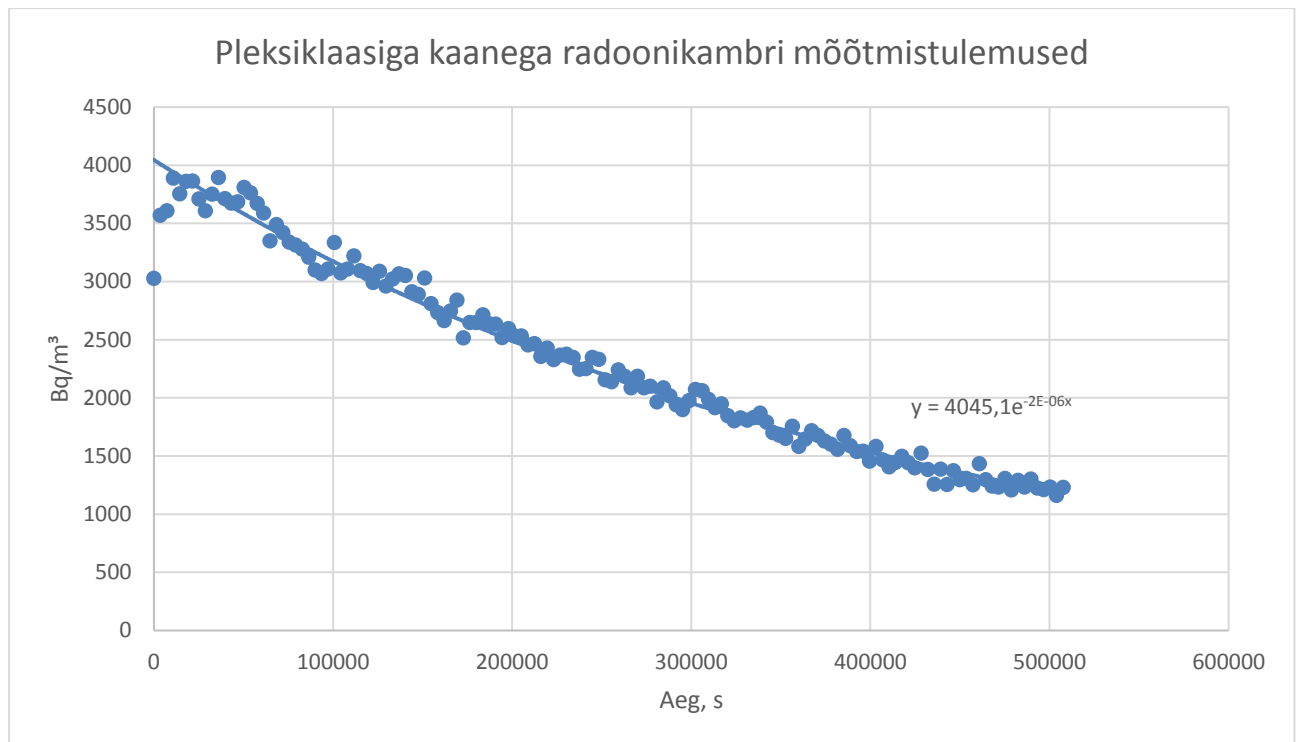
Teises etapis mindi üle väiksemale roostevabast terasest anumale, kus oli välja mõõdetud 750 g tseoliiti, mis oli ühtlasemaks allikaks. Kogused sellest olid aga samuti mõõtekambri jaoks liiga suured ning Radon Eye ei olnud võimeline alumise mõõtekambrikambri tulemusi mõõtma.

Kolmandas etapis asendati alumise kambri Radon Eye välja mõõdetud kotikestega tseoliidiga. Esialgse katse kümne kotikesega, igaüks 75 g saadud radooni kogused olid siiski liiga suured ja lõpuks mindi üle ainult ühele kotikesele, kogusega 75 g.

6.1. Katsetulemuste mõjutajad

Katseid mõjutavad faktorid nagu niiskus, temperatuur ja mõõtmise aeg on loetavad Alpha Guard ringluspumba menüüst ja tulemustest. Antud katsetes keskendutakse vaid radooni taseme mõõtmisele teatud aja jooksul. Leki arvestamisel difusiooni algkiiruses arvestati eelnevalt laboris mõõtekambriga tehtud katsega pleksiklaasist kaanega, mis sooritati 12.05.21-18.05.21. Katsekeha asemel oli paigutatud pleksiklaasist kaas. Mõõtekambrisse pumbati radoon ja see jäi lagunema 142 tunniks. Vastavalt sellele katsele saadi teada radooni enda lagunemine koos lekkega. Vastavalt sellele oli radooni lekkekoefitsient, (λ_{leke}) 0,000002. Pleksiklaasiga kaanega mõõdetud tulemusi ja valemit näeb (Joonis 5).

Vastavalt radooni mõõtmise ja kalkulatsioonide juhendile on radooni oma lagunemise koefitsient $2,0984 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, (λ_{Rn}). Radooni hulka, mis moodustab difusiooni läbi katsekeha tähistame (λ_{dif}). Üldise difusiooni koefitsiendi iga katsekeha kohta (λ) saame vastava katsekeha mõõtmistulemuse eksponentsiaalsest graafikust. Selle põhjal saame arvutada selle kordaja [15].



Joonis 5. Pleksiklaasiga kaanega mõõtekambri mõõtmistulemused

Üldise difusiooni λ arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit (1) [15]:

$$\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_{leke} + \lambda_{dif}, \quad (1)$$

kus λ_{Rn} – radooni lagunemiskoefitsent;

λ_{leke} – radooni lekkekoefitsent;

λ_{dif} – radooni difusioon.

Eelnevast valemist tuletatakse järgmine valem λ_{dif} arvutamiseks (2) [15]:

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

kus λ – difusioon;

λ_{Rn} – radooni lagunemiskoefitsent;

λ_{leke} – radooni lekkekoefitsent.

Radooni puhul arvestame radioaktiivse lagunemise seadust, mis väljendub valemis, kus arv N väljendub eksponentsiaalse vähenemise seaduspärasusena (3) [16]:

$$N = N_0 \times e^{\lambda \times t}, \quad (3)$$

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 (4) [15]:

$$\frac{(N_0 - N)}{N_0} = (1 - e^{(\lambda_{dif} \times t)}). \quad (4)$$

Radooni difusiooni suhteline voog D (1/(m²×s)) katsekehasse arvutatakse järgneva valemiga (5):

$$D = \frac{\Delta}{s \times t}, \quad (5)$$

kus Δ – radooni suhteline vähenemine tunni jooksul;

s – katsekeha aktiivne pindala, m²;

t – aeg, s.

Kokku sooritati erinevaid katseid 15, kuid tulemuste arvestamiseks ja võrdluseks kasutati kolme eri põhikategooriat ning vaid osi katsekehi. Samuti ei sooritatud katseid kõikide katsekehadega. Esimene jaotus võrdleb erineva paksusega katsekehi ja nende mõju ülemise mõõtekambri radooni tõusule. Teine jaotus võrdleb omavahel nelja sentimeetri paksusi katsekehi, erinevate aktiivsöesisaldustega. Neid võrreldakse 24 tunni jooksul nii ülemise mõõtekambri radooni tõusu kui alumise mõõtekambri radooni vähenemise seisukohalt. Viimane jaotus võrdleb aga omavahel kahe sentimeetri paksusi katsekehi, milles vaadeldakse jällegi ainult ülemise mõõtekambri tõusu. Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud kõikide üksikute katsetuste käiku.

6.2. Katsetuste esimene etapp, 4 cm katsekehad

Katsekeha KK0, 4 cm, 0% aktiivsõega, 18.05.21-19.05.21. Katse on sooritatud sarnaselt pleksiklaasiga kaanega samuti ainult alumise mõõtekambriga, mille peale suruti katsekeha, et siis jälgida radooni langust. Kamber täideti radoonigeneraatorist ja peale 20 minutit tasakaalustamist läbi Alpha Guard ühendati lahti ja jäeti seisma 24 tunniks.

Katsekeha KK2, 4 cm, 4,2% aktiivsõega, 20.05.21-21.05.21. Katse on sooritatud kahe mõõtekambriga. Katses täideti alumine mõõtekamber radoonigeneraatorist ning peale tasakaalustamist jäeti 24 tunniks seisma, et jälgida radooni kadumist alumisest mõõtekambrist ja tõusu ülemises.

Katsekeha KK3, 4 cm, 10% aktiivsõega, 22.05.21-23.05.21. Sarnaselt eelneva katsega täideti ka siin alumine mõõtekamber ning jäeti 24 tunniks seisma. Kuna katsed on sarnased ja erineb vaid sõe protsendi poolest, siis on võimalik neid kahte katset omavahel võrrelda ning näha sõe toimimist.

Katsekeha KK1, 4 cm, 0% aktiivsõega, 27.05.21-28.05.21. Nullkatse radooniga. Antud katses on ilma sõeta katsekehaga katsetatud puhtast katsekehast läbivust. Sarnaselt eelnevatega täideti alumine mõõtekamber radooniga ja jäeti 24 tunniks seisma, et siis jälgida samaaegselt radooni taseme langust alumises ja tõusu ülemises mõõtekambris.

Katsekeha KK1, 4 cm, 0% aktiivsõega, 28.05.21-29.05.21. Nullkatse radoonita. Selles katses on katseaparaat üles seatud eelnevalt tuulutatud mõõtekambritega, et näha loomulikku radooni taset mõlemas mõõtekambris. See võib tekkida kas betoonist või muust ümbritsevast mõjutajast, samuti mõõteaparaadist. Jälgimine toimus samuti 24 tunni jooksul, vaadeldes mõlemas mõõtekambris toimuvat samaaegselt.

6.3. Katsetuste teine etapp, 2 cm katsekehad

Katsekeha KK0, 2 cm, 0% aktiivsõega, 26.08.21-10.09.21. Antud katses mindi üle stabiilsemale radoonigeneraatorile. Selleks oli roostevabast terasest anum, kuhu oli paigutatud 750 g tseoliiti. Mõõtmise toimus ülemises mõõtekambris, et näha sealset radooni taseme tõusu. Mõõtmise toimus seitsme nädala jooksul, ilma katsekeha eemaldamata.

Katsekeha KK0, 2 cm, 0% aktiivsõega, 10.09.21-14.09.21. Sarnaselt eelmisele katsele mõõdeti taseme muutust ülemises mõõtekambris. Mõõtmise toimus nelja päeva jooksul. Katse jooksul toimus imelik nähtus, et alguses tase tõusis väga aeglaselt ja muutus oli peaaegu märkamatu. Siis

aga järsku hakkas tase ühtlaselt järsema kõveraga suurenema, kuni jõudis tasemeni, kus Radon Eye mõõtevõime oli ületatud.

6.4. Katsetuste kolmas etapp, erinevate paksustega katsekehad

Katsekeha KK0, 4 cm, 0% aktiivsõega, 15.09.21-5.11.21. Kümme kotti tseoliidiga. Antud katses tulid kasutusele alumisse mõõtekambris paigutatud kotikesed tseoliidiga ja samuti jälgiti ainult ülemises mõõtekambris tekkivat tõusu. Siinne nelja sentimeetri paksune katsekeha suutis mingil määral radooni takistada ja ülemises mõõtekambris tekkis peale tõusu teatav tasakaal. Seekordne katse kestis peaaegu poolteist kuud.

Katsekeha KK0, 2 cm, 0% aktiivsõega, 5.11.21-20.12.21. Kümme kotti tseoliidiga. Eelnevaga sarnane katse, kuid kahe sentimeetrise katsekehaga läks jällegi peale sujuvat tõusu tase üle Radon Eye võimaliku mõõdetava taseme. Siinsest katsest sai mõõta ainult tõusu kiirust kahe päeva jooksul.

Katsekeha KK0, 2 cm, 0% aktiivsõega, 20.12.21-22.12.21. Kümme kotti tseoliidiga. Sarnaselt eelmise katsega läks ka see katse koheselt üle normi ja mõõdetav oli ainult tõusu kiirus ühe päeva jooksul.

Katsekeha KK0, 2 cm, 0% aktiivsõega, 22.12.21-30.12.21. Üks kott tseoliidiga. Kuna kümme kotikest oli liiga suur allikas, siis sellest katsest alates on kasutusel ainult üks 75 grammi tseoliidi kott. Kuigi ka selles katses läks radooni tase liiga suureks, siis on tulemus paremini tuvastatav ja tõus selgem. Kuna aga tegemist on ilma söeta katsekehaga, siis polnud seal erilist viidet ega takistust ja tase hakkas kohe ühtlaselt tõusma.

Katsekeha KK2, 2 cm, 5% aktiivsõega, 30.12.21-12.01.22. Üks kott tseoliidiga. Sarnane katse ühe kotikese tseoliidiga näitas seekord hoopis paremat tulemust ja aktiivsõe mõju oli nähtav. Tõus on väikese viitega ja saavutab lõpuks kerge tasakaalu 1600 Bq/m^3 juures. Pikema mõõtmise korral oleks see ilmselt teatud piirini edasi tõusnud, kuid vahe oli eelnevatega selgelt näha.

Katsekeha KK3, 2 cm, 10% aktiivsõega, 12.01.22-04.02.22. Üks kott tseoliidiga. Seekordne katse, sarnane eelmisega, kuid aktiivsõe kogus oli eelnevaga võrreldes juba topelt. Tõus oli jällegi väikese viitega, kuid sujuvam ning tõus natuke ebaühtlasem. Stabiilsus hakkas saabuma siin eelmisest poole varem ehk 800 Bq/m^3 juures. Ka tulemused olid kõrvutades põhimõtteliselt kahekordse vahega ja aktiivsõe mõju väga hästi jälgitav.

Katsekeha KK0, 3 cm, 0% aktiivsõega, 04.02.22-18.02.22. Üks kott tseoliidiga. Katse oli seekord vahepealse paksusega katsekehaga, et saada vahetulemus õhema ja paksema katsekeha vahel ilma sõeta katsekehade variantide puhul. Seekordne radooni tõus oli üsna stabiilne ja jäi lõpuks laugema tõusuga vähesel määral kasvama. Tulemus on võrreldav vastavate nelja ja kahe sentimeetri paksuste katsekehadega.

Katsekeha KK4%, 2 cm, 4% aktiivsõega, 18.02.22-11.03.22. Üks kott tseoliidiga. Viimane katse oli samuti lisakatse, mõõtmaks viiest protsendist aktiivsõest pisut erinevat tulemust. Pärast järsemat tõusu jäi edasine tõus siiski üsna stabiilseks, kuigi kõrgeks ja kasv põhimõtteliselt peatus.

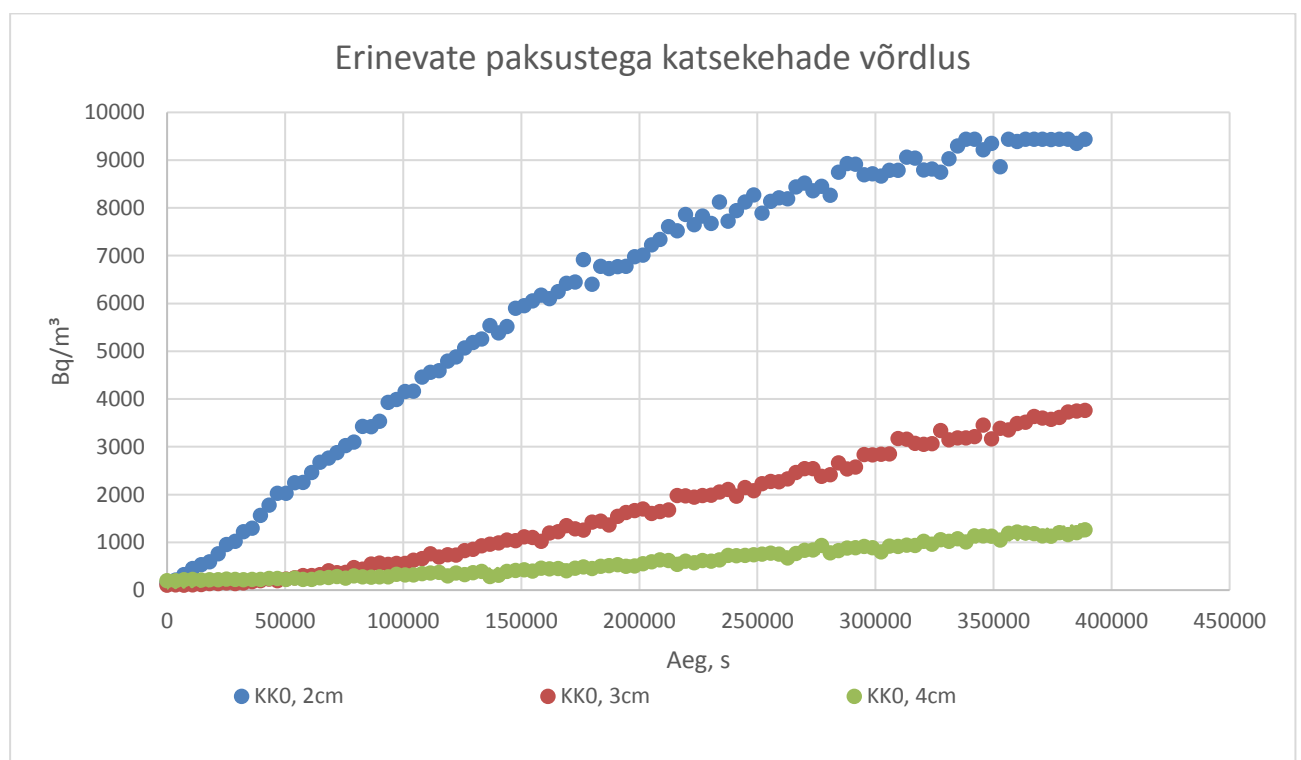
7. TULEMUSTE ANALÜÜS

Esimene tulemustega graafik kirjeldab erinevust eri paksustega katsekehade vahel. Katses oli alumisse mõõtekambris asetatud tseoliidiga kotikesed ja tulemust loeti peale katsekeha läbimist ülemisest mõõtekambrist. Katsete võrdlustulemust näeb (Joonis 6).

Nagu jooniselt näha, siis on kõige õhema, kahe sentimeetri paksuse katsekeha puhul tõus suhteliselt kohe pea kahekordistuv. Kolme sentimeetri paksuse katsekeha radoonipidavus on märgatavalt parem.

Esimese kahe puhul oli alumises mõõtekambris radooni allikaks üks tseoliidiga kott, kuid nelja sentimeetrise puhul oli all kümme kotti. Hoolimata sellest on esialgne tase väga hea ning palju ühtlasem kui teistel.

Kolme sentimeetri puhul läksid tasemed lõpuks üsna kõrgele, kuid neljase puhul jäid ka lõplikud tasemed katses väga heaks. Siinsest on näha, et katsekeha paksus aitas vähemalt selle katse puhul hoida taset, kuna radoon ei jõudnud piisavalt kiiresti ülemisse mõõtekambris ja tase püsis madal.



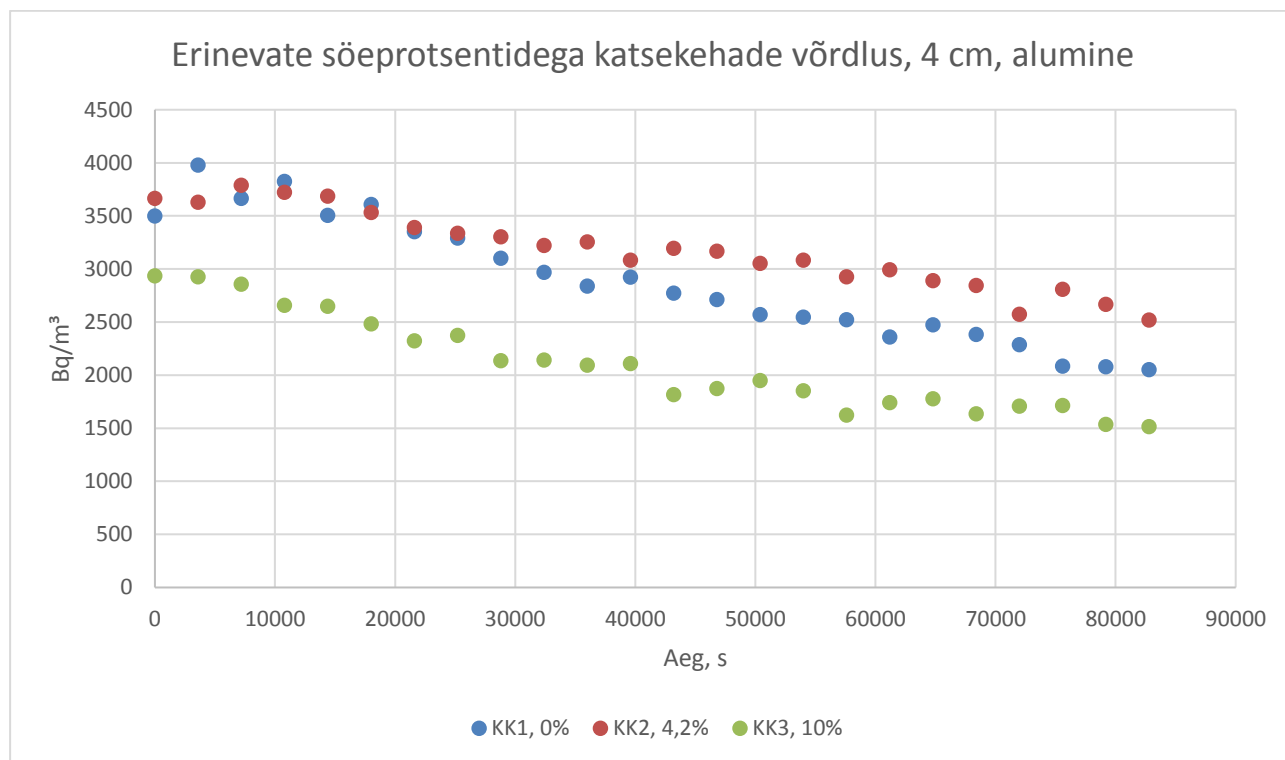
Joonis 6. Erinevate paksustega katsekehade võrdlus

Teine graafik tulemustega näitab radooni langust erinevate söeprrotsentidega katsekehade korral lühema aja ehk ööpäeva jooksul. Vaadeldi radooni langust alumises mõõtekambris ja tõusu ülemises. Katse tulemust näeb (Joonis 7) ja (Joonis 8).

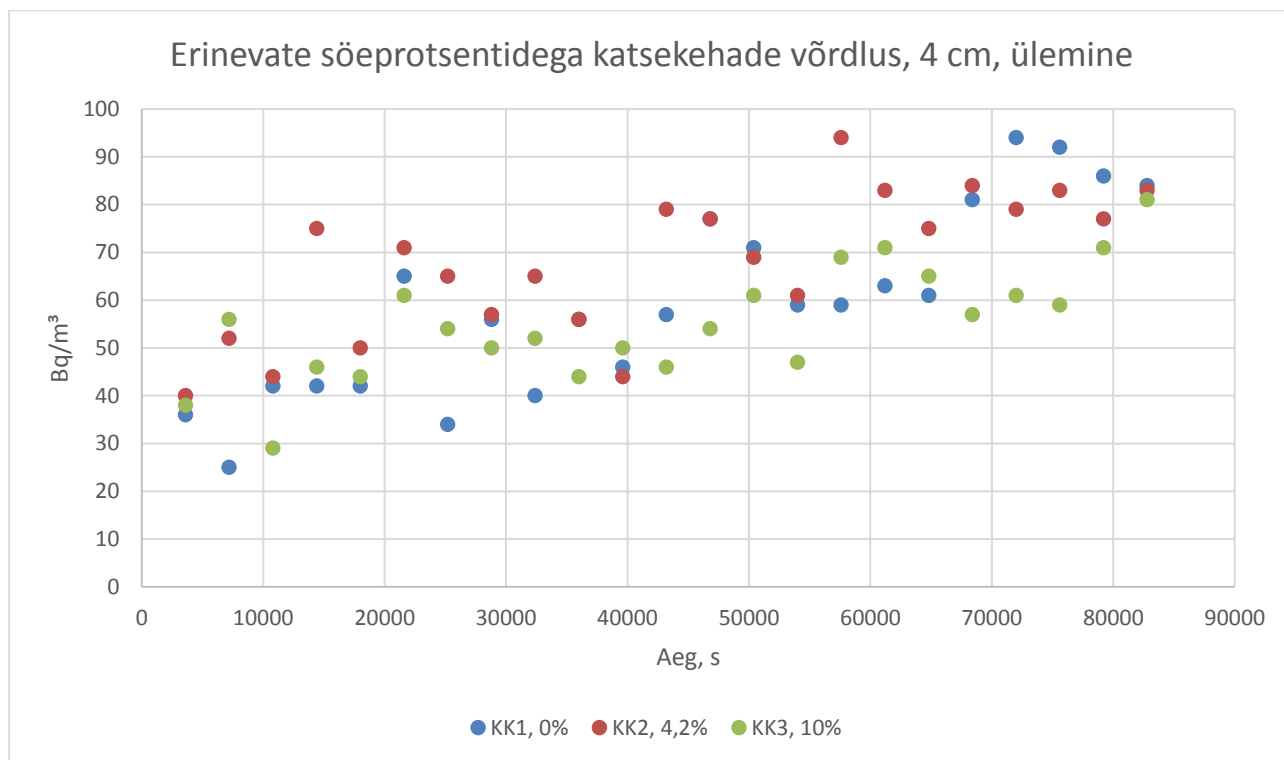
Joonistelt on näha, et kõige kiiremini langes tase alumises mõõtekambris 0% katsekeha korral. Siiski võrreldes tasemete tõuse ei erine see sugugi teistest, aktiivsõega katsekehade variantidest. Kuna eelnevalt selgus, et katsekeha paksus mõjutab läbivust üsna palju, siis tuleb siin tõenäoliselt seda arvestada.

Teised mõõtmised katsekehade aktiivsõe sisaldusega 4,2% ja 10% on üsna sarnased, ainult väikese languse erinevusega.

Kõikide katsete puhul on ülemises mõõtekambris tulemused väga sarnased. Järelikult takistab nii paks katsekeha selliselt, et radoonil ei ole piisavalt aega ülemisse mõõtekambris joudmiseks. Radooni tase jääb kõigis katsetes ainult 80 Bq/m³ juurde.



Joonis 7. Erinevate söeprrotsentidega katsekehad, 4 cm, alumine



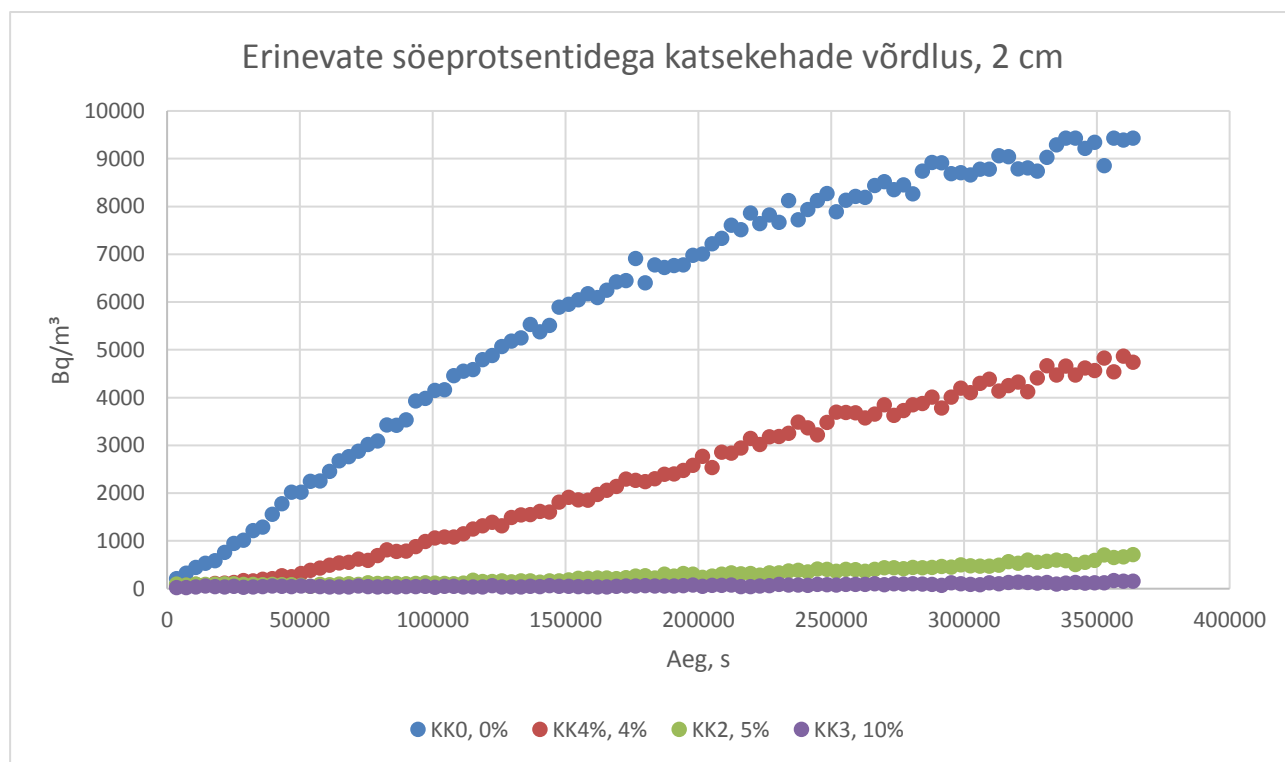
Joonis 8. Erinevate söeprrotsentidega katsekehad, 4 cm, ülemine

Kolmas graafik tulemustega näitab erinevate söeprrotsentidega kahe sentimeetri paksuste katsekehade omavahelist võrdlust. Katsete tulemuste graafikut näeb (Joonis 9). Siinses katses on alumisse mõõtekambrisse paigutatud üks tseoliidiga kott radooni allikaks. Koheselt on näha, et nüüdsel õhemal katsekehal ilma aktiivsöeta ei ole suurt viidet ja radooni tase mõõtekambris tõuseb koheselt iga tunniga. Katse läks üle Radon Eye mõõtetaseme juba nelja päevaga.

Katsekeha, aktiivsöe sisaldusega 4% puhul on tulemus tunduvalt parem. Pea kuu ajalise mõõtmise jooksul ei ületanud mõõtekambri tase Radon Eye küllastust, milleks on nende katsete andmetel 9435 Bq/m^3 .

Katsekeha, aktiivsöega 5% tulemus on juba väga hea. Ka erinevad uuringud pakuvad 5% selleks, millest alates on tulemusi hästi näha. Kahe nädala jooksul tõusis tase 1539 Bq/m^3 juurde, mis oli saavutatud juba mõned päevad varem ja seejärel see tase sinna ligidale jäigi.

Viimane katsekeha, aktiivsöega 10% andis väga hea tulemuse, sama radooniallika juures jõudis tase kahe nädalaga maksimaalselt 800 Bq/m^3 juurde, jäädes sinna katse lõpuni, mis oli kolm nädalat.



Joonis 9. Erinevate söeprrotsentidega katsekehad, 2 cm

KOKKUVÕTE

Lõputöö raames tehtud uuringus on valmistatud erineva paksuse ja aktiivsöe kontsentratsiooniga katsekehad ning sooritatud eri meetodikaga katseid. Samuti on valmistatud samasuguste näitajatega survekatsekehad, et testida antud segu tugevust. Katsekehad on valmistatud mitmes etapis, jälgides ja arvestades juba olemasolevaid tulemusi.

Katsetes on kasutatud omaloomingulist katseseadeldist, mis koosnes vastavalt katsete iseloomust kas ühest või kahest mõõtekambrist, erinevatest radoonigeneraatoritest, ringluspumbast Alpha Guard DF2000, mõõtevahendist Radon Eye Plus2 ja ühendusvoolikutest ning muudest väikedetailidest nagu ühendusvoolikud jms.

Katsed on sooritatud kolme põhimeetodiga, mille erinevus seisnes radooni generaatoris. Tulemused on selekteeritud katsekehadest ja jagatud sarnasuse alusel gruppidesse.

Tulemus eri paksusega katsekehade võrdluses ilma aktiivsöeta andis väga häid visuaalseid tulemusi, sest selgelt oli näha, et mida paksem katsekeha, seda vähem radooni läbis. Radooni läbivuse osas näitasid kolme erineva aktiivsöe sisaldusega maksimaalse paksusega katsekehad põhimõtteliselt sama tulemust ja materjalist endast täiesti piisas.

Õhemate katsete juures on aga selgelt näha aktiivsöe toimimist. Ilma aktiivsöeta katsekeha puhul viide puudus ja radooni tase tõusis kohe väga kõrgele. Varasemalt erinevates katsetes uuritud aktiivsöe koguse 5% juures peaks selle mõju näha olema ja see tuleb ka antud uuringus selgelt välja. Kuigi tulemused 4% juures olid tunduvalt paremad ilma aktiivsöeta variandi kõrval, siis 5% juures olid need juba väga head ja 10% juures ideaalilähedased.

SUMMARY

Radon Diffusion Rate Study of Activated Carbon Admixtures

Hazardous substances are found all-around us, however, radioactive gases like Radon, that are invisible to the human eye, present a significant risk to human well-being. The hazards and risks posed by radioactivity have been known for over a century. The field of construction science and engineering is consistently researching methods and materials that can shield the human beings and our environment against these hazards and in-turn protect human health.

While buildings can serve as an effective barrier between the inhabitants and the environmental hazards, they must be built with the right choice of materials to provide optimum protection, durability and environmental stability. One of the steps in that direction is to employ the use of reusable residual materials in place of non-recoverable virgin materials. This will result in improved sustainability and economy.

In this context, activated Carbon is well-known for its effectiveness as a filter against various local pollutants. While, at present, many small-scale Radon barrier materials and technologies are currently used, none of them are large-scale.

Although, initial research is promising but the topic of activated Carbon-based large-scale Radon protection in the construction industry requires further research. The present study tries to address this requirement so as to provide more research findings on this topic.

In the present study, experiments are conducted on circular disc shaped samples of concrete produced with different thickness and different activated Carbon content. The Carbon used in the production of these samples was granulated. These samples were tested for Radon diffusion rates and their mechanical strength (stress).

From these tests, it was found that the effect of activated Carbon is only observable in thinner discs (20 mm) as in thicker (40 mm) discs, the concrete mixture itself is able to attenuate Radon diffusion rate.

In thinner discs, it was clearly observed that the presence of Carbon reduced the Radon diffusion rate where in discs without any carbon, the Radon levels rose sharply to much higher levels.

Moreover, according to previous research work, Radon diffusion rate attenuation is effectively attenuated at 5% of activated Carbon inclusion in concrete. In the present study, it was observed that 4% of activated Carbon inclusion was sufficient to significantly reduce the rate of Radon diffusion, whereas, at 5% it was better still and at 10% the attenuation was nearly ideal.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Chemistry Explained "Radon",“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.chemistryexplained.com/elements/P-T/Radon.html>. [Kasutatud 18. Aprill, 2022].
- [2] „Wikipedia, the free encyclopedia, "Beton",“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.wikipedia.org/wiki/Beton>. [Kasutatud 19. Aprill, 2022].
- [3] International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, *Experiment on Concrete Containing with Activated Carbon and Nano-Fly ash, Nano Metakaolin*, Karunya: Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences, 2019.
- [4] A.K.R.G College Of Engineering And Technology, *Properties of Concrete by Partial Replacement of Cement with Activated Charcoal and Fine aggregate with Plastic Powder*, Nallajerla, 2020.
- [5] J. Lab, „The Element Radon“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://education.jlab.org/itselemental/ele086.html>. [Kasutatud 17. Aprill, 2022].
- [6] „Wikipedia The Free Encyclopedia "Decay chain“,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain. [Kasutatud 30. Aprill, 2022].
- [7] T. Ü. teaduskool, „sisu.ut.ee“, [Võrgumaterjal]. Available: https://sisu.ut.ee/kiirgusest_tuumajaamani/radon-elamutes. [Kasutatud 18. Aprill, 2022].
- [8] Petersell, V., Koch, R., Štokalenko, M, „Elame radooniohtlikus keskkonnas“, *Horisont*, nr 6, p. 64, 2019.
- [9] „Radoonitõrjekeskus“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://radoonitorjekeskus.ee/mis-on-radon/>. [Kasutatud 25. Aprill, 2022].
- [10] „Wikipedia, the free encyclopedia, "Activated carbon“,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon. [Kasutatud 19. Aprill, 2022].
- [11] „Wikipedia, the free encyclopedia "Hando Kruuv“,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Hando_Kruuv. [Kasutatud 28. Aprill, 2022].
- [12] „Wikipedia, the free encyclopedia "Graptoliitargilliit“,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.wikipedia.org/wiki/Graptoliitargilliit>. [Kasutatud 19. Aprill, 2022].
- [13] „www.bertin-instruments.com“, Bertin Technologies SAS, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>. [Kasutatud 25. Aprill, 2022].

- [14] „www.radonftlab.com,“ Radonftlab, [Võrgumaterjal]. Available: <http://radonftlab.com/radon-sensor-product/radon-detector/new-rd200p-radon-detector/>. [Kasutatud 25. Aprill, 2022].
- [15] Y. L. K. M. P. M. Y. P. M. Ishimori, „Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues", International Atomic Energy Agency Technical Report, Series no 474,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf. [Kasutatud 28. Aprill, 2022].
- [16] „Wikipedia The Free Encyclopedia "Radioaktiivse lagunemise seadus",“ [Võrgumaterjal]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Radioaktiivse_lagunemise_seadus. [Kasutatud 30. Aprill, 2022].

Lisa 1. Survetugevuse akt

Kivistunud betooni katsetamine - katsekehade survetugevus (EVS-EN 12390-3:2019)

Katseprotokoll

Katsetamise kuupäev:	4.10.2021	Tallinna Tehnikakõrgkool
Protokolli number:	1.	Pärnu maantee 62, 10135, Tallinn
Koormamis-kiirus:	0,5 Mpa/s (N/mm ² ·s)	



**TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO**
TTK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Betooni klass:	C35/45	Katsetajad: Britt Abbasi, Ando Pärtel, Rein Koch		
Betooni koostisosad:	Graniitkillustik 0,5-2 mm, Kookospähkli süsi 5% ja 10%			
Hoiustamine enne vormist vabastamist:	Temperatuur, C°	Niiskus, %	Aeg, h	
	22	30	24	
Hoiustamine peale vormist vabastamist:	Temperatuur, C°	Niiskus, %	Aeg, päev	
	22	vees	28	

Katsetamine

Katsekeha tähis	Maht V, cm ³	Proovikeha mass, g	Mahumass, kg/m ³	Purustav jõud, Kn	Survetugevus, Mpa	Keskmine survetugevus, Mpa
KK0-1	1 000	1 976	1,976	335,2	33,52	33,93
	1 000	1 982	1,982	339,7	33,97	
	1 000	1 990	1,99	343,1	34,31	
KK5-1	1 000	1 742	1,742	212,3	21,23	20,96
	1 000	1 745	1,745	214,1	21,41	
	1 000	1 742	1,742	202,5	20,25	
KK10-1	1 000	1 574	1,574	129,1	12,91	12,54
	1 000	1 564	1,564	119	11,9	
	1 000	1 645	1,645	128,2	12,82	