



**TALLINNA
TEHNIKA KÕRGKOO**

Megida Mägi

RADOONI DIFUSIOON

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2023



Megida Mägi

RADOONI DIFUSIOON

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehituse õppekava

Juhendaja: Rein Koch

Tallinn 2023

Mina,

Megida Mägi,

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, Megida Mägi

(*autori nimi*)

sünnikuupäev: 26.05.1981

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

Radooni difusioon

(*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



Ehitusinstituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Megida Mägi**
Õpperühm: **KHE2018**
Eriala: **Hoonete ehitus (1827)**
Lõputöö teema: **Radooni difusioon**

Lähteandmed töö koostamiseks:

Technical Reports Series No. 474, BÜ7 Betoonpõrandad, Tehnoloogia II, Raudbetoonkonstruktsioonid.

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Erinevate betoonist katsekehade valmistamine ning nende radooni puudutavate omaduste uurimine. Ülevaade radoonist, radooni mõju tervisele, radooni levikuteed hoonetes, eksperimentaalne osa, tulemuste analüüs, lõppjärelduste tegemine.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Seletuskirja maht 40-60 lk.

Lõputöö juhendaja:	Rein Koch (nimi)	 (allkiri)	01.03.2022 (kuupäev)
Lõpetaja:	Megida Mägi (nimi)	 (allkiri)	01.03.2022 (kuupäev)
Kinnitaja:	Aivars Alt ehitusinstituudi direktor	 (allkiri)	01.03.2022 (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 01.03.2022

Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2022

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	7
1 RADOON.....	9
1.1 Radoon ja radooni teke	9
1.2 Radooni ohtlikkus.....	15
2 ÜLEVAADE BETOONIST JA BETOONI AJALOOST EESTIS.....	16
2.1 Betooni ajalugu Eestis	16
2.2 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni survetugevust	16
2.2.1 Tsement	16
2.2.2 Liiv	17
2.2.3 Jämetäitematerjal.....	17
2.2.4 Vesi.....	18
3 DIFUSIOON	19
3.1 Difusioonitegur	19
4 KATSEKEHAD	21
4.1 Seadmed.....	21
4.1.1 Betooni tihendamisevahendid (üks allpool loeteludest)	21
4.2 Vormide ettevalmistamine ja täitmine.....	21
4.3 Betooni tihendamine.....	22
4.3.1 Üldist	22
4.4 Tihendamine sisevibraatoriga.....	22
4.5 Tihendamine vibrolaua	22
4.6 Käsitsi tihendamine tihendamisvarda või -pulgaga.....	23
4.7 Pinna tasandamine	23
4.8 Tähistamine	23
4.9 Katsekehade hoidmine.....	23
4.10 Katsekehade valmistamine	24
4.10.1 Kettakujuline katsekeha	24
4.10.2 Kuubi kujulised katsekehad	26
5 VALMINUD KATSEKEHAD	30
5.1 Katsekehade ettevalmistamine	30

5.1.1	Katsekehade standardid.....	31
6	SURVETUGEVUSE KATSE.....	32
6.1	Katsekehade survekatsemasinasse asetamine.....	32
6.2	Koormamine	33
6.3	Purunemistüübi hindamine	33
6.4	Katse tulemused.....	34
7	RADOONI DIFUSIOONI UURIMINE	37
7.1	Vees kõvenenud betoonist kettakujulise katsekeha difusiooni uurimine	37
7.2	Mõõteseadmed.....	37
7.2.1	AlphaGuard DF2000	37
7.2.2	Viivisvoolik.....	38
7.2.3	Radon Eye Plus2	39
7.2.4	Radooni difusiooni mõõtmise seade	39
7.3	Difusiooni katsete tulemused ja analüüs	40
	KOKKUVÕTE.....	47
	SUMMARY	49
	VIIDATUD ALLIKAD.....	51
	Lisa 1. Toimivusdeklaratsioon DELTA Radonsperre.....	53

SISSEJUHATUS

Mida rohkem aega edasi, seda olulisemaks muutub nii keskkonnale, kui ka inimestele järjest ohutumate hoonete ehitamine. Ehitusmaterjalide tootmises kasutatakse järjest vähem inimese tervist kahjustavaid komponente. Kuid mitte ainult ehitusmaterjalidel ei pea silma peal hoidma vaid, meid ohustavad ka maakoorest välja imbuvad gaasid, mis kahjustavad inimese tervist. Üks nendest on radoon, millest tõenäoliselt 99% inimestest ei ole kuulnud, ega tea radooni ohtlikkusest midagi. Kuna radoonist on vähe kuulda ja puuduvad vajalikud teadmised, siis on radooni ohule raske tähelepanu pöörata. Radooni ohtu tuleks hinnata enne ehitustöid ja täpsel nii ka suurema remondi eel ja järel.

Radooni aktiivsuskontsentratsioon välisõhus on üldjuhul madal, sest radoon hajub välisõhus ning ei kujuta seetõttu tervisele ohtu. Kuid aluspinnasest siseruumidesse sattuv radoon võib siseõhu radoonisisalduse tõsta määrusega kehtestatud normidest oluliselt kõrgema tasemeni. [1]

Kõrge radoonisisaldusega siseõhu peamiseks põhjuseks on majaaluse pinnase kõrge radoonikontsentratsioon, mille põhjustavad aluspõhja uraanirikkad kivimid – graptoliitargilliit, oobolus fosforiit, mõned Devoni settekivimite erimid jt. Täiendav radoon võib pärineda põhjaveest, ehitusmaterjalidest ja pinnakattes olevatest rändkividest. [1]

Radoon imbub ruumidesse maja alusest pinnasest ja võib hoonetesse jõuda ka tarbeveega (vees lahustutuna) ja torugaasina, sellest tulenevalt esineb radooni peamiselt keldrites ja esimestel korrustel. Radoonisisaldus hoonete siseõhus kõigub väga suurtes piirides. Mida gaasikindlam on hoone vundament, seda vähem pääseb radooni hoonesse. Radoonitase hoone siseõhus sõltub ka ilmastikust, so õhurõhk, tuulesuund, maapinna niiskus %, maapinna külmumine jms. Lisaks mõjutab radooni taset hoones ventilatsiooni olemasolu ning selle kasutamise režiim, akende ja uste avamine, küttekolded jne. [1]

Tänapäeva ehituses kasutatakse 99,9% betooni. Betoon on tehiskivi, mis saadakse sideaine, vee ja täitematerjalide segu kivilinemisel. Valmiva betooni omadused sõltuvad sellest, kus ja mille jaoks kavatakse betoonisegu kasutatada. Selle põhjal arvutatakse betooni tugevusklass, valitakse sobivad täitematerjalid ning märgitakse vajadusel ka külmakindlus, veepidavus jms. [2]

Betooni koostises kasutatakse tänapäeval mitmesuguseid keemilisi lisandeid ja kiudusid, mida lisatakse betoonile segamise käigus tsemendi massiga võrreldes väikeses koguses, eesmärgiga reguleerida betoonisegu või kivistunud betooni omadusi. [2]

Antud lõputöö käigus uuritakse radooni olemasolu ja tema kahjulikust, samuti ka erinevaid lahendusi radooni tõkestamiseks.

Lõputöö käigus kirjeldatakse ka erinevate katsekehade valmistamist ja koostist. Samuti katsetatakse kuubikukujuliste katsekehade survetugevust ja kettakujulise katsekeha radooni difusiooni.

Lõputöö katsete käigus võrreldakse erinevaid materjale, millega tõkestatakse radooni levikut difusiooni teel. Erinevate katsete käigus näeme, milliseid materjale ja aineid kasutades on radooni levik rohkem enim tõkestatud ja milliste materjalide ja ainetega korral vähem.

lagunemisel tekivad üksteise järel radooni tütarisotoobid polonium-218, plii-214, vismut-214 ja polonium-214, millede üleminekuid saadab alfaosakeste kiirgamine. Need tütarisotoobid on metallilised elemendid, mis kleepununa õhus leiduvatele aerosooli osakestele, kinnituvad sissehingamisel omakorda kopsukoele ning on seal lagunedes peamised radooni poolt tekitatud kiirgusdoosi põhjustajad. [4]

Peamiseks radooniallikaks on maa sees leiduvad uraani sisaldavad rasked mineraalid. Radoon ei jää pinnasesse püsima, vaid liigub sealt nii kivimite pooride kui ka lõhede kaudu väiksema rõhu suunas välisõhku või hoonesse ja seguneb seal oleva õhuga. Radoon on õhust ligi 7,7 korda raskem ($9,96 \text{ kg/m}^3$), kogunedes seega enamasti hoone madalamatesse osadesse. Radooni poolestusaeg on 3,8 ööpäeva. Poolestusaeg näitab aega, mille jooksul aine aktiivsus väheneb pooleni oma esialgsest aktiivsusest. Poolestusaeg iseloomustab eeskätt radioaktiivse aine lagunemise kiirust. Märkimisväärse kiirguskoormuse annavad radooni väikese poolestusajaga tütarisotoobid. [4]

Peamine radoonist tulenev terviserisk inimesele on seotud kopsuvähiga. Sisse hingatava õhuga kopsu sattuvad radooni ja tema tütarisotoopide aatomid (aerosooli osakestele kleepuvad aatomid) kiirgavad lagunemise käigus α -osakesi, millel on suurim kahjustav mõju elusrakkudele võrreldes β -osakeste või γ -kiirgusega. Siseruumi õhku sattunud radoon koos oma radioaktiivsete tütarisotoopidega võib inimesele anda enam kui poole saadavast loodusliku ioniseeriva kiirguse doosist. Radoon on kopsuvähi tekkimise riskitegurite hulgas suitsetamise järel teisel kohal. [4]

Termin “aktiivsuskontsentratsioon” kõrval kasutatakse paralleelselt ka terminit “õhu radoonisisaldus”, seejuures on mõlema termini sisu sama. [4]

Välisõhus on radooni kontsentratsioon väike, tavaliselt vahemikus 5 Bq/m^3 kuni 20 Bq/m^3 . Olenevalt pinnasest hoonesse siseneva radooni kogusest ja välisõhuvahetusest võib hoones kujuneda radooni kontsentratsioon aga palju suuremaks. Gaasina võib radoon enne lõplikku lagunemist levida kaugele – kuni mitukümmend meetrit. Pinnaseõhu radoonisisalduse mõõtmine on soovitatav teostada detailplaneeringu koostamise etapis, et pinnaseõhu radooni aktiivsuskontsentratsioon võimalikult vara välja selgitada. [4]

Siseõhu radooni aktiivsuskontsentratsioon sõltub radooniallika ekshalatsiooni kiirusest (difusioon ja konvektsioon maapinnast, ehitismaterjalidest, tarbeveest ning torudega majja tulevast maagaasist) ja ruumide õhuvahetusest. [4]

Ruumiõhu peamised radooniallikad on [4]:

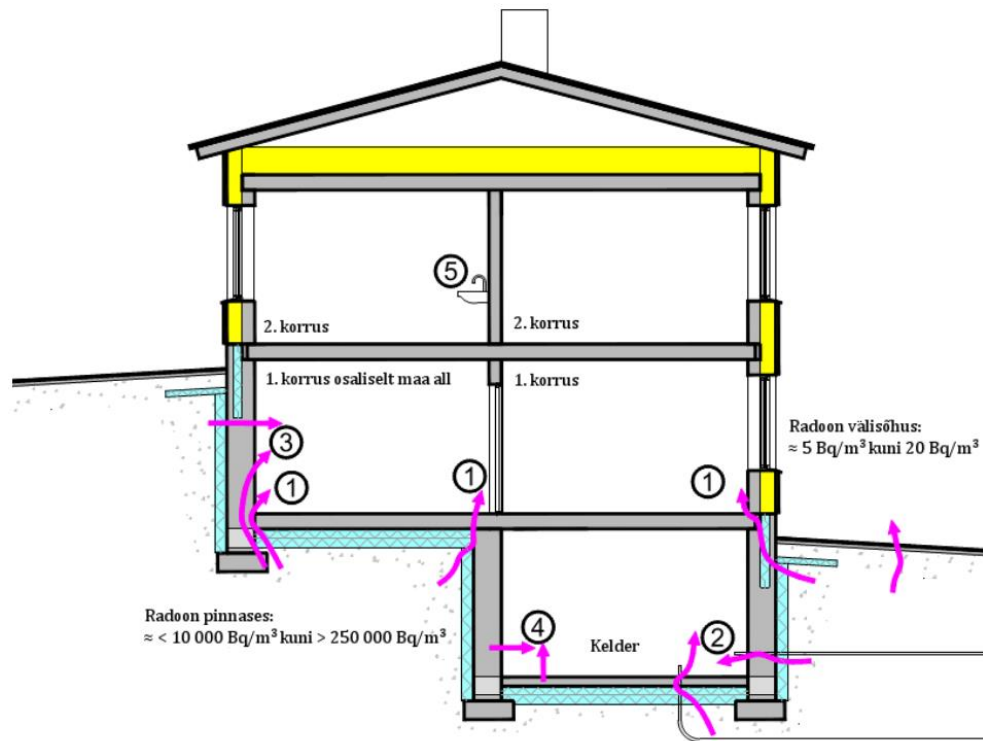
- 1) Õhuleke pinnasest läbi tarindite ja tarindite liitekohtade ebatihedusete. Kriitilisemad kohad on pinnasele toetuva põranda välis-, vahe-, keldriseinte liited, mahu kahanemispraod betoonpõrandas (Joonis 2;Foto 2).
- 2) Õhuleke pinnasest tarinditest läbiviikude (elekter, vesi, kanalisatsioon jne.) kaudu ning tühjade õõntega (täis betoneerimata) betoonplokkmüüritis, eri materjalikihtide (nt soojustuse ja vundamendimüüri) vahel olev vertikaaltühimik (Foto 1;Foto 3).
- 3) Difusioon või õhuleke läbi pinnasega kokkupuutuvate tarindite (näiteks õhku hästi juhtivast materjalist keldriseinad (näiteks keramsiitplokk, eriti kui see on laotud täitmata vertikaalvuukidega), väikese difusioonitakistusega materjalid vms);
- 4) Ehitusmaterjalides emaneeruv radoon;
- 5) Radoonirikka tarbevee kasutamine.
- 6) Kütteks ja köögis kasutatav torujuhtmeid pidi hoonesse saabuv maagaas.

Eestis on siseruumides põhiliseks radooniallikaks leke ehituse all olevast radooniohtlikust pinnasest, kust radoon siseneb ruumi konvektsiooni või difusiooni teel. Pinnas on poorne ja sisaldab oma mahust ligikaudu 1/3 osakeste vahelist vaba ruumi. Pinnases sisalduvad raadiumi rikkad mineraalid suudavad pinnase pooride õhku tekitada kõrge radooni kontsentratsiooni. Peale radooni kontsentratsiooni määrab pinnase radooniohtlikkuse ka pinnase õhuläbivus. Radoon tungib aluspinnasest vahetult selle kohal olevasse hoonesse sellistest kohtades, kus hoone all (küllalt pinna lähedal) lasub radooni tekitavaid mineraale sisaldav pinnase kiht (näiteks oobolusliivakivi, graptoliitargilliit, graniit vms). Radooniohtlikkuse järgi liigitatakse pinnas järgmiselt [4]:

- väikese radoonisisaldusega, kus pinnaõhus on radoonisisaldus $< 10\,000\text{ Bq/m}^3$;
- normaalse radoonisisaldusega, kus pinnaõhus on radoonisisaldus $10\,000\text{ Bq/m}^3$ kuni $50\,000\text{ Bq/m}^3$;
- suure radoonisisaldusega, kus pinnaõhus on radoonisisaldus $50\,000\text{ Bq/m}^3$ kuni $250\,000\text{ Bq/m}^3$;
- ülisuure radoonisisaldusega, kus pinnaõhus on radoonisisaldus $> 250\,000\text{ Bq/m}^3$.

Radooni tungimist pinnasest hoone ruumidesse püütakse tõkestada mitmesuguste ehituslike meetoditega, nagu näiteks kasutades radoonikindlat betooni isoleerides ruumid pinnasest radoonikindla tõkkekillega, tekitades hoone vundamendi alla alarõhu jne.

Käesolevas töös uuritaksegi võimalikke radooni tõkestamiseks kasutatavate materjalide nagu betoon ja tõkkekiled, radooni läbi difundeerimist iseloomustavat parameetrit difusioonitegurit.



Joonis 2. Tüüpilised siseruumi radooniallikad [4]



Foto 1. Pragu müüritise ja põranda liitekohas (vasakul), vastu pinnast olev tühjade püstvuukidega laotud müüritis (paremal) või õhku läbilaskev (eriti keramsiitplokki müüritis) [4]



Foto 2. Pragu betoonis (vasakul) või betoonpõrandate vahel (paremal) [4]



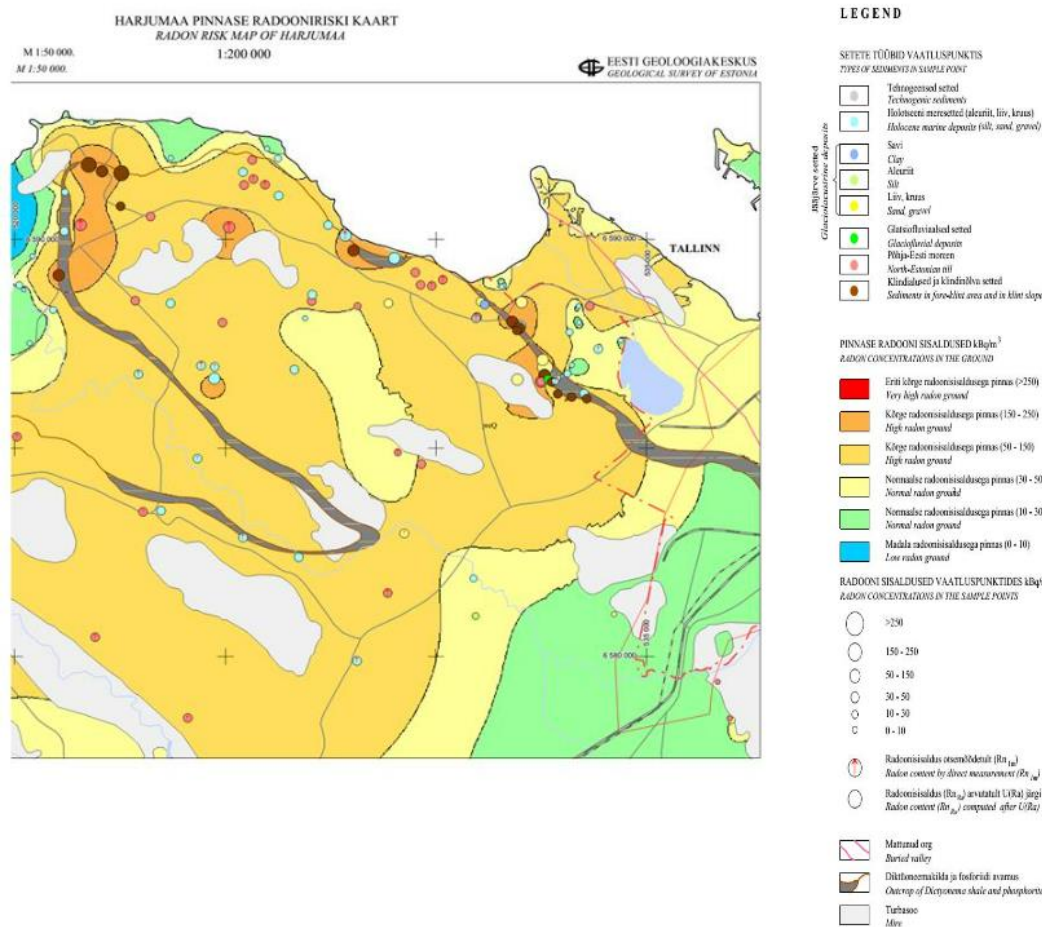
Foto 3. Tihendamata küttetorustiku läbiviik esimese korruse põrandast (vasakul) või tihendamata tehnosüsteemide kontroll-luuk esimese korruse põrandas (paremal) [4]

Radooniohtlikke alasid leidub peaaegu kõikjal Eestis, Radooniohtlikumad alad on Põhja-Eestis, kus pinnases esineb uraanirikas graptoliitargilliit ja fosforiit ning uraani lagunemise käigus tekkinud radoon saab vabalt maapinnale tõusta. Radooniohtlikud on ka piirkonnad Lääne-Virumaal ning Tartumaal, kus suure radoonisisalduse tekitajaks on jääajal Skandinaaviast siia kandunud setted. [4]

Erinevate Eesti piirkondade kohta on koostatud pinnase radooniriski kaarte (Joonis 3), mis annavad üldise hinnangu antud piirkonna võimaliku radooniriski kohta. Niisugused kaardid on üldplaneeringute tegemisel olulised, et näidata ära suure ohuga alad. Tähelepanu tuleb aga pöörata ka normaalse radoonisisaldusega aladele, kuna ka nendel aladel võib esineda erandlik olukord, kus radoonitase on tegelikult kõrge (probleem võib tekkida ka normaalse ja kõrge taseme äärealadel). Seetõttu tuleks enne

hoonete projekteerimist mõõta pinnaseõhu radooni aktiivsuskontsentratsiooni ja/või teha muud detailsemad uuringud. Elamute ja avalikele hoonete, kus inimesed viibivad pikemat aega järjest (nt lasteaiad ja koolid), projekteerimisel tuleb ehitise aluse pinnas pinnaseõhs radoonisisalduse mõõtmised teha alati. Pinnaseõhu radoonisisalduse mõõtmise teha iga 200 m² ehitusaluse pinna kohta vähemalt ühes punktis. [5]

Eestis on pinnaõhus üldiselt kõrge radooni aktiivsuskontsentratsioon (oleme Euroopas viie enim radooni sisaldava pinnasega riik, Rootsi, Soome, Tšehhi ja Belgia kõrval). Võib piisata ka väikesest õhulekkest vundamendis, et siseruumis tõuseks radooni aktiivsuskontsentratsioon probleemsele kõrgele. Juba poolemillimeetrine pragu võib põhjustada ruumi õhus suure radooni kontsentratsiooni. Pinnasest siseruumi imbuva radooni vältimine või selle vähendamine on sageli radooniohutu ehitamise peamine tagatis. [3]



Joonis 3. Väljavõte Türisalu-Tabasalu pinnase radooniriski kaardist [3]

1.2 Radooni ohtlikkus

Radoon on väärisgaas ning seega ta ei moodusta mingeid keemilisi ühendeid. Tema ohtlikus peitub lagunemise käigus organismi kiiratavas α -kiirguses, kuid veel suurem oht peitub organismi jäänud radooni tütarisotoopides, mis seal lagunedes (eriti α -lagunemise käigus) suurendavad organismi saadavat kiirgusdoosi. Kiirituse tulemusena võivad tekkida vabad radikaalid ja DNA ahelate purunemine. Rakud parandavad lagunenud DNA ahelaid, aga vahel kaasnevad sellega mutatsioonid geenides, mis võivad põhjustada vähki. Seevastu radooni lagunemisel tekkiv alfakiirgus organismist väljapool ohtu ei avalda, kuna isegi paber ning nahk suudavad peatada alfaosakese. Lisaks sellele on alfaosakeste levimisulatus õhus väikene (1 - 2 cm). Sisse hingatuna aga neeldub osakese energia organismis (eelkõige kopsudes ja hingamisteedes). Kuna alfaosake on massiivne (He^{2+} tuum), siis tema poolt tekitatav rakukahjustus on suur (mistõttu on ka tema kiirguse kaalufaktor 20 ehk siis ekvivalentdoos on 20 korda suurem neeldunud doosist, samal ajal kui gammakiirgusel, röntgenkiirgusel ja beetakiirgusel on see faktor üks). Radooni ohtlikkusest tingituna tuleb kõigi võimalike vahenditega tõkestada radooni jõudmist pinnaseset hoonesse. [3]

Aastal 1988 nimetas IAEA (Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur) radooni inimesele kantserogeeniks. Sellest kümnendist alates on viidud läbi palju uuringuid radooni, suitsetamise ja kopsuvähi omavahelise sõltuvuse kohta ning on leitud, et see on ligikaudu lineaarne, iga 100 Bq/m³ kohta tõuseb kopsuvähki haigestumise risk 10 - 20%. [3]

Lisaks sellele leiti, et suitsetajatel on tunduvalt suurem risk haigestuda kopsuvähki, kui mitesuitsetajatel. Seejuures ka suitsetamise maha jätnutel on küllaltki suur tõenäosus võrreldes mitesuitsetajatega, haigestuda kopsuvähki. Suitsetajate kõrgem risk on põhjustatud sellest, et suitsu aerosooliosakeste külge kleepuvad radooni tütreid (Po-218, Pb-214, Po-214, Bi-214 ja Pb-210), mis õhu sisse hingates kinnituvad kopsubronhi seintele. Bronhi seintel radooni tütarelemendid lagunevad täielikult ning seega põhjustavad tunduvalt suurema doosi. [3]

2 ÜLEVAADE BETOONIST JA BETOONI AJALOOST EESTIS

2.1 Betooni ajalugu Eestis

Eesti betooni ajalugu sai alguse 1860. aastatel, kui tsemenditootmise vastu hakkas huvi tundma Kunda mõisa omanik John Girald de Soucanton. Ta proovis esimesena Eestis kohalikest materjalidest, merglist ja sinisavist, valmistada tsementi. 1870. aastast alates hakati Kundas tsementi tootma juba suuremates mahtudes. Tsemendi tootmine läks Eestis käima edukalt ning kasvavad tootmismahud tekitasid juba 1895. aastaks vajaduse tsemenditehase kaasajastamise ja laiendamise järele. Tsemendi kogutoodang Eestis 20. sajandi alguseks küündis juba ligi 50 000 tonnini aastas ning sellest suurem osa toodeti just välisurgudele. Kunda tsemenditehase tõeline areng toimus aga Nõukogude Liidu ajaperioodil. 1960. aastate alguseks oli tootmismaht kasvanud 300 000 m³-ni aastas. Selle põhjustas üleliiduline laiahaardeline ehitustegevus ning vajadus erinevate betoonkonstruktsioonide järele. [6]

2.2 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni survetugevust

Betoon koosneb mitmetest erinevatest komponentidest. Nende komponentide koosmõju tagab betoonisegu töödeldavuse, annab kivistunud betoonile tugevuse ja tagab betooni sihipärase töökindluse. Betooni koostisosad on tsement, täitematerjal ja vesi. Kuna tsementi ja täitematerjale on väga mitmeid erinevaid tüüpe, mis kõik toimivad betoonisegus erinevalt, mõjutab iga materjal oluliselt ka betooni survetugevust. Samuti avaldab betooni tugevusele ja selle kvaliteedile mõju ka vesi, mille ülesanne on tsemendi ja täitematerjalide sidumine. Mõrdi valmistamiseks kasutatava vee kvaliteet ning selle keemiline koostis mängib olulist rolli betooni sihipärase toimimise tagamisel. On oluline mõista, millised on iga erineva komponendi omadused ning nende tähtsus betoonis. [6]

2.2.1 Tsement

Tsement on üheks betooni koostisosaks, mis tagab sideainena betooni kõvaduse ja tugevuse saavutamise. Tsement on hüdrauliline sideaine, mis veega segatuna moodustab tarduva massi ning säilitab pärast kivistumist oma tugevuse ja stabiilsuse ka vee all. Eestis kasutatakse põhiliselt Portlandtsemente. Vastavalt EVS EN 197-1:2011 standardile määratletakse ära 27 erinevat hariliku tsemendi tüüpi ning nende koostisosad. Need on omakorda jaotatud viieks põhigrupiks:

- CEM I – portlandtsement;

- CEM II – Portland – komposiitsegment;
- CEM III – räbusement;
- CEM IV – putsolaantsegment;
- CEM V – komposiitsegment.

Tsemendi normtugevuseks loetakse 28 - päevast survetugevust ning käsitletakse kokku kolme normtugevusklassi: klass 32,5, klass 42,5 ja klass 52,5. Lisaks määratakse ka tsemendile eeltugevusklassid, ehk kivistumiskiirus, mida on iga normtugevusklassi kohta kolm tükki. Need jaotatakse vastavalt madala kivistumiskiirusega (täht N), kõrge kivistumiskiirusega (täht R) ja väikese kivistumiskiirusega (täht L). Tsemendi eeltugevuseks peetakse 2 - päevast või 7 - päevast survetugevust. [6]

Betooni tugevusklass sõltub otseselt tsemendi tugevusklassist. Samuti tuleb tsemendi valikul tähele panna tsemendi eeltugevust. Seega on betooni nõutud survetugevuse tagamiseks oluline valida eesmärgile vastav tsemendi liik ja sobiv tsemendi koostis. [6]

2.2.2 Liiv

Liiv täidab betoonis tsemendi ja jämetäitematerjali vahelised tühimikud ning on betoonisegu oluliseks osaks. Liiva kvaliteet ja selle koostis võivad mõjutada betooni survetugevust. Puhas liiv reeglina betooni survetugevusele mõju ei avalda, kuid kui liiva hulka on sattunud savi, muda või huumust, võib muutuda ka betooni survetugevus. Rwanda ülikoolis tehtud katsed näitasid, et savi lisamine betoonisegule isegi 10% ulatuses vähendab betooni survetugevust kuni 18%. Ghanas tehtud uuring näitas, et isegi juba liiva saastumine 4% ulatuses kogumahust vähendab oluliselt betooni survetugevust. Seega on betooni survetugevuse tagamiseks oluline, et segus kasutatav liiv oleks puhas ja saastamata. [6]

2.2.3 Jämetäitematerjal

Jämetäitematerjalina kasutatakse betooni valmistamiseks tavaliselt lubjakivi- või graniitkillustikku. Jämetäitematerjali osakaal betoonisegus on kõige suurem, seega on selle omaduste mõju betooni kvaliteedile ja tugevusele suur. Jämetäitematerjali puhul avaldavad betooni survetugevusele mõju mitmed erinevad faktorid. Olulisel kohal on jämetäitematerjali enda tugevus. Mida suurem on betoonis kasutatava jämetäitematerjali tihedus, ehk tugevus, seda suurem on tõenäosus, et ka betooni survetugevus tõuseb. Samuti mõjutab betooni survetugevust täitematerjali fraktsioon. Arvamused jämetäitematerjali

fraktsiooni täpse mõju osas betooni tugevusele on aga vastakad. Osad teadlased väidavad, et väiksema fraktsiooniga betooni tugevus on suurem, samas väidetakse ka vastupidist, et suurema fraktsiooniga täitematerjali kasutamine tagab betoonile suurema tugevuse. Kansase Ülikoolis läbi viidud katsetes, kus uuriti betooni täitematerjalide mõju betooni tugevusele leiti, et fraktsioonide suuruse vahe ei avaldanud betooni survetugevusele väga olulist mõju. Betoonis kasutati jämetäitematerjalina basaltkivikillustikku ning lubjakivikillustikku, maksimaalsete fraktsioonidega 12 mm ja 19 mm. Samas töös jõuti järeldusele, et basaltkivikillustikuga valmistatud betooni survetugevus on suurem, kui lubjakivikillustikuga valmistatud betooni puhul. Lubjakivikillustiku kasutamine tavabetooni valmistamiseks osutus aga täiesti piisavaks, ning tugevama kivimi, ehk basaltkivi kasutamine osutus paremaks ja otstarbekamaks vaid kõrgema tugevusklassiga betooni valmistamisel. Seejuures märgiti ka, et väga oluline on betooni tugevuse tagamisel vesi-tsement tegur. [6]

2.2.4 Vesi

Vesi on betooni valmistamise üks komponent. Vee toimetatakse seotakse omavahel tsement ning täitematerjalid. Betoonisegus kasutatava vee kvaliteet on oluline, sest see mõjutab betooni survetugevust. Tavapäraselt kasutatakse mördi valmistamiseks harilikku joogivett, reeglina kraanivett, mille kvaliteet on piisav. Kraanivee kvaliteet ja selle keemiline sisaldus erineb teatud piirkondades ning seega oleks hea enne betoonisegu valmistamist välja selgitada kohaliku kraanivee omadused. Kasutada ei tohiks üldjuhul soolade sisaldusega vett, eriti kui betooni armeeritakse terasarmatuuriga. Soolade sisaldus vees võib vähendada betooni survetugevust 10 – 30%. Seda on näidanud ka probleemid mereäärsete ehitistega. Probleemsed on ka troopilised piirkonnad, kus pole looduses sageli joogivett. Veenduda tuleks vee puhtuses, sest ainult puhas ja sobiva pH taseme ja keemilise koostisega vesi tagab kvaliteetse betoonisegu. [6]

3 DIFUSIOON

3.1 Difusioonitegur

Radooni difusiooniteguri all mõistame radooni aktiivsust, mis ajaühikus, ühikulise radooni kontsentratsiooni gradiendi korral selle materjali piirpindadel, tungib molekulaarse difusiooni teel läbi ühikulise paksusega ja ühikulise pindalaga ühekihilise materjali. [7]

Difusiooniteguri leidmiseks kasutame lihtsustatult Ficki esimest seadust:

$$\frac{dm}{dt} = D \times \left(\frac{S}{d}\right) \times \Delta C, \quad (1)$$

- kus $\frac{dm}{dt}$ – näitab difusiooni kiirust;
- D – on difusioonitegur;
- S – on uuritava proovi pindala;
- d – on uuritava proovi paksus;
- ΔC – on kontsentratsiooni gradient.

Difusioonitegur puistematerjalides (D_r) on niiskuse tundlik funktsioon. Selle koguse hindamiseks niiskusesisalduse teabe põhjal on välja töötatud mitu korrelatsiooni. Radooni difusiooniteguri jäägis (D_r) võib samuti hinnata kasutades Rogersi ja Nielsoni (1991) esitatud empiiriline valemi (3), mis on esitatud järgmiselt: [8]

$$D_r = D_{ma} n_t \exp(-6mn - 6n^{14}n_T), \quad (2)$$

kus D_{ma} – radooni molekulaarne difusioonitegur 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).

4 KATSEKEHAD

4.1 Seadmed

Betoonivormid, mis vastavad standardile EN 12390-1.

Täitmisraam (mittekohustuslik).

Vormide täitmist võib lihtsustada, kasutades tihedalt vormile sobivat täitmisruumi.

4.1.1 Betooni tihendamisevahendid (üks allpool loeteludest)

Betooni tihendamisevahendid:

- sise(nui) vibraator;
- vibrolaud;
- tihendamisvarras;
- tihendamispulk.
- proovivõtukühvel;
- kellu või spaatel;
- segamisanum- või kandik;
- kühvel;
- mittereageeriv vormimääre;
- kummihaamer.

4.2 Vormide ettevalmistamine ja täitmine

Betoon vormiga nakkumise vältimiseks tuleb vajaduse korral vormi sisepinda katta enne täitmist õhukese mittereageeriva määre kihiga. [9]

Sõltuvalt betooni konsistentsist, vormi kõrgusest ja tihendusmeetodist tuleb vormid täita nii mitme betooni kihina kui täieliku tihendamise saavutamiseks vajalik. Isetiheneva betooni puhul tuleb vormi täita ühe operatsiooniga ja vormi täitmise ajal ning pärast vormi täitmist ei tohi betooni tihendada. [9]

Täiteraami kasutamisel peab vormi täitmiseks võetud betooni kogus olema selline, et pärast tihendamist jääks kiht betooni ka täitmisraami sisse. Sellise kihi paksus peab olema 10% kuni 20% katsekeha kõrgusest. [9]

4.3 Betooni tihendamine

4.3.1 Üldist

Betoon tuleb kohe pärast vormi paigutamist täielikult, ilma liigse ja tsemendipiima eraldamiseta tihendada. [9]

Märkus: Täielik tihendamine on mehaanilise tihendamise puhul saavutatud, kui edasine suurte õhumullide eraldumine betooni pinnal lakkab, pind muutub suhteliselt tasaseks, omandab läikiva välimuse ja ei esine liigset kihistumist. [9]

Täpsemad juhised selliste betoonide tihendamismeetodite kohta, millel on eri konsistentsid või mis on valatud eri suurusega või eri tüüpi vormidesse, võivad olla antud betooni kasutuskohas kehtivates eeskirjades. [9]

4.4 Tihendamine sisevibraatoriga

Vibreerida tuleb lühema võimaliku aja vältel, mis on vajalik betooni täielikuks tihendamiseks, tuleb vältida vibreerimist, mis võib põhjustada manustatud õhu kaudu. [9]

Tuleb hoiduda vormi vigastamisest. Vibraatorit tuleb hoida püstselt ja vältida selle kokkupuutumist vormi põhja ning külgedega. Soovitav on kasutada täitmisraami. [9]

Märkus 1: Laboratoorsed katsed on näidanud, et kui sisevibraatori kasutamisel on vaja vältida manustatud õhu eraldumist, tuleb olla eriti hoolikas. [9]

4.5 Tihendamine vibrolaual

Vibreerida tuleb lähima võimaliku aja vältel, mis on vajalik betooni täielikuks tihendamiseks. Vorm tuleb eelistatavalt laua külge kinnitada või siis tugevasti selle vastu suruda. Tuleb vältida üle vibreerimist, mis võib põhjustada manustatud õhu kaudu. [9]

4.6 Käsitsi tihendamine tihendamisvarda või -pulgaga

Tihendamisvarda või -pulgaga löögid tuleb jaotada ühtlaselt üle kogu vormis ristlõike. Tuleb jälgida, et tihendamisvarras või -pulk ei lööks esimese kihi tihendamisel tugevasti vastu vormi põhja ega tungiks olulisel määral eelmisesse kihti. Rakendaga betoonile piisav arv lööke iga kihi kohta, tüüpiliselt 25 lööki betooni puhul, mille konsistents on ekvivalentne standardi EN 206 kohaselt konsistentsiklassidega S1 ja S2, kaasates õhu taskute, kuid mitte manustatud õhu eemaldamiseks. Pärast iga kihi tihendamist koputada kummihaamriga ettevaatlikult vormi külgedele, kuni suurte õhumullide eraldumine lakkab ja tihendamisvarda või -pulga jäljed täituvad. [9]

4.7 Pinna tasandamine

Kui kasutati täitmisraami, tuleb see pärast tihendamist otsekohe eemaldada. [9]

Üle vormi serva ulatuv betoon eemaldatakse kellu abil ja pealispind silutakse hoolikalt. [9]

4.8 Tähistamine

Katsekehad tuleb tähistada selgelt ja vastupidavalt, ilma neid seejuures vigastamata. [9]

Katsekeha tuleb registreerida selliselt, et katsekeha on jälgitav proovi võtmiseks katsetamiseni. [9]

4.9 Katsekehade hoidmine

Katsekehi hoitakse ladustamiskohas vormide sees löökide, vibratsiooni ja kuivamise eest kaitstult, temperatuuril $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ vähemalt 16 tundi, kui mitte kauem kui 3 päeva. [9]

Kui see on võimalik, võib erijuhtudel, näiteks betooni kiire kuivamine või varajane katsetamine, vormist välja võtmine toimuda enne 16 h möödumist. [9]

Pärast vormist välja võtmist hoitakse katsekehi kuni asjakohases standardis toodud menetluse kohase katsetamiseni vees temperatuuril $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ või kambris temperatuuril $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ja relatiivsel niiskusel $\geq 95\%$. [9]

Katsekehi võib hoida jaotises eeltoodud lõigu kirjelduses võrreldes erinevate tingimustega juhul, kui on määratud üleminekutegurid eeltoodud lõigu kirjeldatud tingimustele. [9]

Vaidluste korral on etalonmeetod vees hoidmine. [9]

Kõrge niiskuse $\geq 95\%$ säilitamine ja mõõtmine temperatuuril $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ei ole lihtne, seepärast tuleks regulaarselt kontrollida, et kambris olev katsekehade pind oleks pidevalt märg. [9]

Muud hoidmismeetodid võivad olla antud betooni kasutuskohas kehtivate eeskirjades. [9]

4.10 Katsekehade valmistamine

4.10.1 Kettakujuline katsekeha

Katsekeha ketas koos lisandiga tähistati SK5P. 100% koostisesse kuulus 2000 g segu 88,3% + 352 g graniiti (0 - 2 mm) 14,7% + 10 ml lisand (REBA DM) 2%- tsemendi kogusest segus. 2000 g segust sisaldas tsemendi 500 g millest 2% lisandit tuli lisada 10 ml. SK5P katsekeha koostisesse lisati esialgu vett 14,8% 350 ml ja hiljem lisati vett juurde 70 ml, kokku 15,1%.

Katsekehade valmistamiseks kaaluti algul välja vajalikud koostisosad (Foto 4).



Foto 4. Katsekeha SK5P koostisosad

Kuna katsekeha SK5P koostisesse kuulus graniit mille terade läbimõõt pidi olema 2 mm siis purustati graniit jämedamat fraktsiooni, mida siis sõeluti, et sobiva suurusega graniit kätte saada (Foto 5).



Foto 5. Purustaja, sõelad ja sõelutud graniit

Seejärel mõõdeti välja vee koguse, millele lisati 2% lisandit REBA DM (Foto 6).



Foto 6. Lisandi lisamine

Seejärel segati segumasinasse kokku tsement ja graniidi. Masin segas segu 30 sek mille järel lisati vesi ja segati veel 30 sek. Seejärel vaadati betooni tekstuuri ja otsustati lisada veel 70 ml vett ja segati veel 60 sek. Edasi valati valminud betoon vormi, mida oli eelnevalt õlitatud (Foto 7).



Foto 7. Betoon on valatud vormi

4.10.2 Kuubi kujulised katsekehad

Tehti kaks kuubikut, millele segati lisandit REBA DM 2%. Kuubikud tähistati SK1P ja SK2P. Kuubikute tegemiseks segati kokku 3000 g segu, 400 g graniiti ja 14,5% vett, mille kaaluks oli 578 g (Foto 8). Veel lisati lisand, mille kogus siis välja arvutati. 3000 g segus on 900 g tsementi millest arvutati 2% lisandi hulgaks, lisandi koguseks saadi 16 ml, mis lisati 578 g-le veele.



Foto 8. SK1P ja SK2P katsekehade betooni valmistamiseks valmis kaalutud koostisosad

Kaaluti välja vee koguse ja segumasinasse kallati tsement ja graniidi killustik ning seda kuiva segu segati 30 sek. Seejärel lisati segumasinasse lisandiga vesi, saadud betoonisegu segati veel 30 sek. ja lasti seista 60 sek, seejärel segati veel 60 sek. Valminud betoon valati vormi. Samamoodi valmistati ka teise kuubiku jaoks betoon valmis ja valati vormi. Täidetud vorm tõsteti seejärel vibroplaadile (Foto 9).



Foto 9. Katsekehad SK1P ja SK2P vibroplaadil

Pärast vibrolaua tihendamist asetati katsekehad lauale, siluti nende pealispind, kaeti kilega ja tähistati vastava tähistusega. Järgmisel päeval võeti katsekehad vormidest välja ja pandi vette. 14.04.2022 asetati katsekehad vette, vees pidid katsekehad olema 28 päeva. Seega olid katsekehad mõõtmiseks valmis 12.05.2022.

Tabel 1. Katsekehade komponentide kogused, grammides

Katsekeha nimetus	Segu, g	Graniit, g	Lisand REBA DM, ml	Vesi, ml
SK5P	2 000	352	10	420
SK1P	3 000	400	16	578
SK2P	3 000	400	16	578

Tabel 2. Katsekehade komponentide kogused, massiprotsentides

Katsekeha nimetus	Segu, %	Graniit, %	Lisand REBA DM, %	Vesi, %
SK5P	83,3	14,7	2	15,1
SK1P	86,5	11,5	2	14,5
SK2P	86,5	11,5	2	14,5

5 VALMINUD KATSEKEHAD

5.1 Katsekehade ettevalmistamine

Katsekehad võeti veest välja 12.05.2022, kuivatati ja puhastati. Seejärel tehti mõõtmine. Kuubikut mõõdeti ülemiselt poolelt, alumisel poolelt ja mõõdeti tema kõrgus. Seejärel katsekeha kaaluti. Mõõdud ja kaal on välja toodud tabelites (Tabel 3) ja (Tabel 4). Puhastatud, mõõdetud ja kaalutud katsekehad on näha (Foto 10).



Foto 10. Valminud katsekehad

Tabel 3. Katsekeha SK1P mõõdud (mm) ja kaal (g)

SK1P (lisandiga)			
	1 Pool	2 Pool	Kõrgus
1 mõõt	100,1	100,1	100,1
2 mõõt	100,2	100,0	100,0
3 mõõt	100,1	100,1	100,1
4 mõõt			101,0
Kaal:	2108,2 g		

Tabel 4. Katsekeha SK2P mõõdud (mm) ja kaal (g)

SK2P (lisandiga)			
	1 Pool	2 Pool	Kõrgus
1 mõõt	100,2	100,4	100,6
2 mõõt	100,4	100,1	100,5
3 mõõt	100,3	100,2	100,8
4 mõõt			100,9
Kaal:	2119,8 g		

5.1.1 Katsekehade standardid

Katsekeha koormatakse kuni nende purunemiseni standardi EN 12390-4 kohases survekatsemasinas. Suurim koormus, mida katsekeha vastu võtab, registreeritakse ja arvutatakse betooni survetugevus. [10]

Survekatsemasin, mis vastab standardile EN 12390-4. [10]

Katsekeha peab olema kuup, silinder või puursüdamik, mis vastab standardile EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 või EN 12504-1 nõuetele. [10]

6 SURVETUGEVUSE KATSE

6.1 Katsekehade survekatsemasinasse asetamine

Kuubikukujulise katsekehade koormatavad küljed peavad olema puutunud vormi seinte vastu. [10]

Katesemasina koormuspinnad tuleb puhtaks pühkida ning plaadiga kokku puutuvatelt katsekeha pindadelt eemaldada lahtine puru ja muu üleliigne materjal. [10]

Katsekeha ja masinaplaatide vahel võib kasutada ainult abiplaate või vahetükke. [10]

Enne masinasse asetamist tuleb katsekeha pinnale liigne vesi ära pühkida. Kuubikukujulised katsekehad surutakse risti valamise suunas (Foto 11). [10]

Katsekehad tuleb alumise plaadi suhtes tsentreerida täpsusega 1% kuubi valitud nimimõõtmest või silindri valitud nimiläbimõõdust. [10]



Foto 11. Kuubikukujulised katsekehad survekatsemasinas

6.2 Koormamine

Valitakse püsiv koormamiskiirus piirides $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$). Pärast aliskoormuse rakendamist, mis ei ületa ligikaudu 30% purustatavast koormusest, rakendatakse katsekehale koormust ilma tõuketa ja suurendatakse pidevalt valitud konstantse kiirusega $\pm 10\%$, kuni koormust pole võimalik enam suurendada. [10]

Algkoormuse rakendamisel tuleks kasutada valitud koormamiskiirusele võimalikult lähedast kiirust. [10]

Suurim võimalik koormusnäit registreeritakse kilonjuutonites (kN). [10]

6.3 Purunemistüübi hindamine

Katsekehade purunemispilt, mille puhul võib katse lugeda õnnestunuks, on esitatud kuupide jaoks (Foto 12). [10]



Foto 12. Purunenud katsekehad

Visuaalsel vaatlusel katsekeha SK1P-l on näha omapära õhuaugud on tõenäoliselt tekkinud lisandist (Foto 13). Õhuaugud on tekkinud lisandist, või vibrolaua peal ei tihendatud proovi piisavalt. Õhumullide olemasolu viib katsekeha tugevusnäitaja alla.

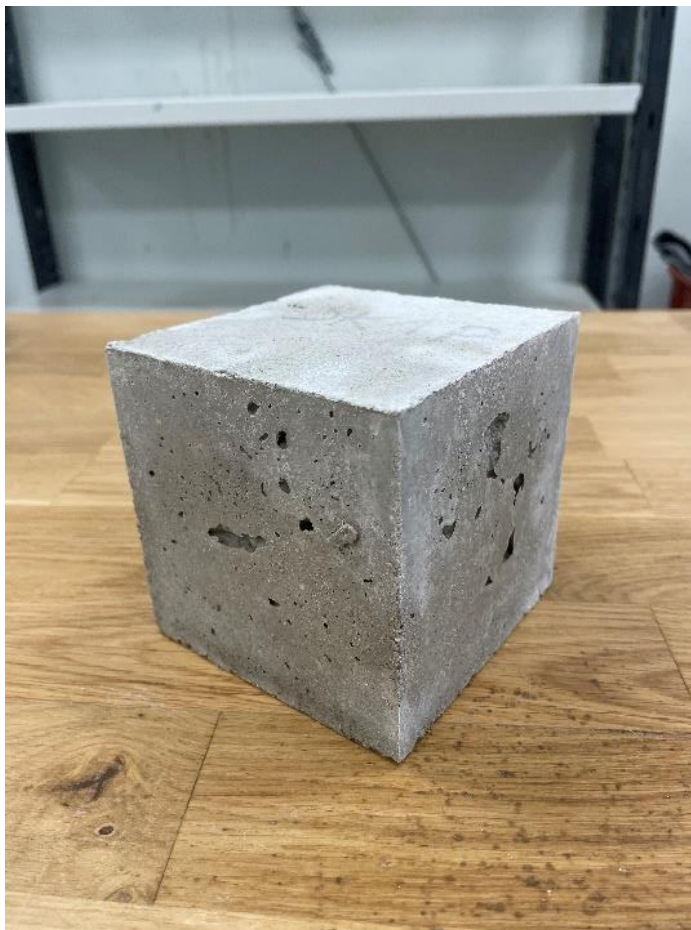


Foto 13. Katsekeha SK1P

6.4 Katse tulemused

Survetugevust arvutatakse valemiga (3) [10]:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (3)$$

kus f_c – on survetugevus, MPa (N/mm²);

F – on suurim koormu, N;

A_c – on katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub, arvutatud katsekeha
nimimõõte või katsekeha tegelike mõõtmete alusel.

Katsetulemused on välja toodud (Tabel 5).

Tabel 5. Katsetulemused

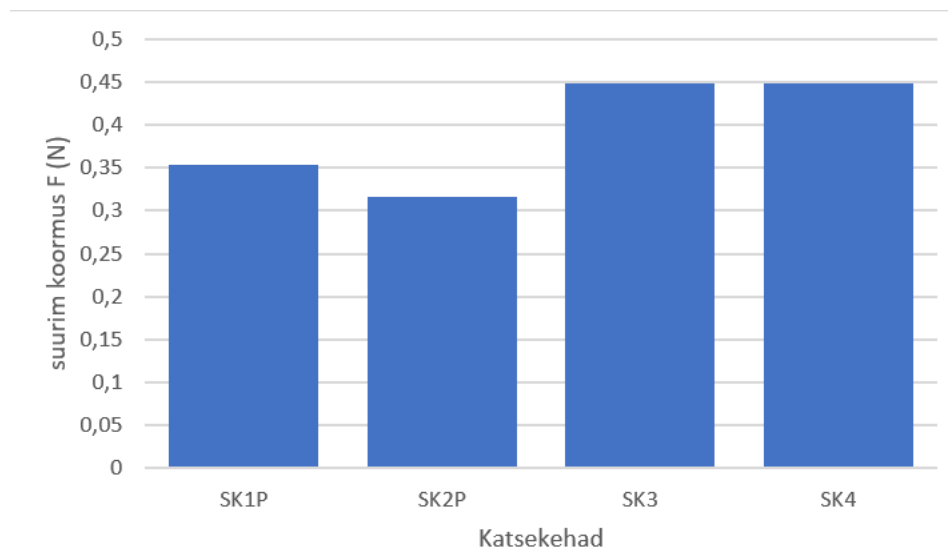
Katsekeha	Maht, m ³	Proovikeha mass, kg	Mahumass, kg/m ³	Purustavjõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa
SK1P	0,001	2,108	2 108	323,50	32,40	32,01
SK2P	0,001	2,119	2 120	316,07	31,61	

Toon ka võrdluse ilma lisandit lisamata tehtud katsekehade survetugevuse katsest (Tabel 6).

Tabel 6. Survetugevuse katsete võrdlus

Katsekeha	Maht, m ³	Proovikeha mass, kg	Mahumass, kg/m ³	Purustavjõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa
SK1P	0,001	2,108	2 108	323,50	32,40	32,01
SK2P	0,001	2,119	2 120	316,07	31,61	
SK3	0,001	2,152	2 153	448,74	44,87	44,84
SK4	0,001	2,123	2 123	448,05	44,81	

Järeldus: Kuna lisandiga katsekehadel oli palju õhuauke, siis selle tulemusel olid katsekehad SK1P ja SK2P nõrgemad, kui SK3 ja SK4 (Graafik 1). Keskmise survetugevuse järgi on lisandiga katsekehad 28,6% nõrgemad, kui ilma lisandita betoonist katsekehad. Tabelist toon välja veel mahumassi võrdluse, mis küll ei ole suurte erinevustega, aga survetugevuse vahe on siiski suur.



Graafik 1. Survetugevuse võrdluse graafik

7 RADOONI DIFUSIOONI UURIMINE

7.1 Veepõhine betoonist kettakujuline katsekeha difusiooni uurimine

Katsekeha asetatakse kahe kambri vahele millest alumine on radooni kamber ja ülemine on mõõtekamber. Radoon liigub difusiooni teel alumisest kambrist ülemisse kambris, kus toimub uuritavas aines läbi tulnud radooni mõõtmine. Katse käigus paneme radoonikambrisse kümme tseoliidi kotti (Foto 14). Tseoliit pärineb joogivee filtrist, mida kasutati joogiveest raadium eraldamiseks ning, mida me antud katses kasutame radooni allikana. Katse käigus hinnatakse läbi katsekehade radooni difundeerimiskiirust.



Foto 14. Tseoliidi kotid

7.2 Mõõteseadmed

7.2.1 AlphaGuard DF2000

Difusiooni kiiruse mõõtmiseks kasutati monitори AlphaGuard DF2000 (Foto 15). AlphaGuard DF2000 on professionaalne õhus radooni ja torooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmise riist, mis võimaldab mõõta eraldi radooni ja torooni sisaldust õhus. Mõõtmise tulemused salvestatakse mõõteriista mälu. Need tulemused saab kergesti arvutisse kätte kasutades DataView programmi USB, RS232 või Bluetooth ühenduse abil. AlphaGuard DF2000 mõõdab radooni kontsentratsiooni mõõtevahemikus ($2 - 2000000 \text{ Bq/m}^3$). AlphaGuard DF2000 ionisatsioonikambri maht on 0,56 liitrit. Paralleelselt mõõdetakse ja salvestatakse ümbritseva õhu temperatuur, niiskuse sisaldus ja rõhk. AlphaGuard

DF2000-ga mõõdeti radooni kontsentratsiooni alumises kambris, kuhu oli asetatud kottides radooni ekshaleeriv materjal. [11]



Foto 15. AlphaGuard DF2000

7.2.2 Viivisvoolik

Katses ühendati katseseadme kambrid AlphaGuardiga voolikute abil (Foto 16). Kasutati 100 m pikkust voolikut, mille sisemine läbimõõt on 4,5 mm (maht on umbes 0,4 liitrit), sellise arvestusega, et võimalik radoonigeneraatorist tekkinud toroon selles voolikus voolamise ajal jõuaks suuremal osal laguneda. Torooni poolestusaeg on 55 sekundit, radoonil aga 3,8 päeva. Voolukiiruse 1 l/min korral on tagatud, et viivisvooliku kasutamisel toimub ainult radooni kontsentratsiooni mõõtmine. Iga mõõtmise järelle tuulutatakse viivisvoolik radoonist suruõhu abil, et vältida selle mõju järgmisele mõõtmisele. [12]



Foto 16. Viivisvoolik

7.2.3 Radon Eye Plus2

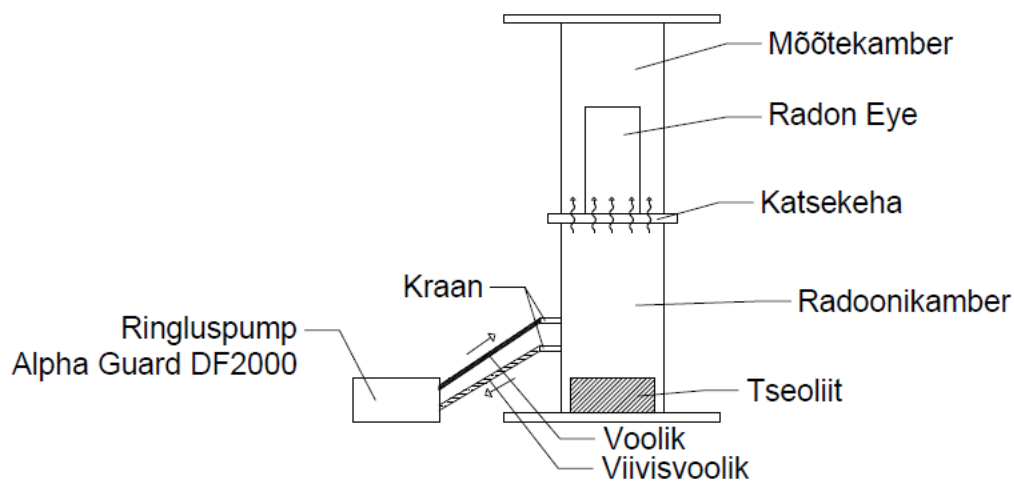
Radon Eye Plus2 on portatiivne, aga suure tundlikkusega ja täpne, sisemise mäluga radooni mõõtesead (Foto 12). Tema detektoriks oleva ionisatsiooni kambri maht on 200 cm^3 . Radon Eye Plus2 mõõtepiirkond on $7\text{-}9435 \text{ Bq/m}^3$. Tootja poolt lubatud seadme mõõtemääramatus jääb alla 10%. [13], mida on kinnitatud ka TTK-s tehtud võrdluskatsed kalibreeritud AlphaGuard DF2000-ga.

7.2.4 Radooni difusiooni mõõtmise seade

Seade (Foto 17) kujutab endast kahte metallist kambrit, mille vahele asetatakse kettakujuline katsekeha. Ühe katse kestus on kuni 30 päeva. [7] Kambrite servad on kaetud vaakumkummist tihendiga. Kambrite mahtuvus on 12 liitrit ja nende sisemine diameeter on 23,7 cm ning katsekehade diameeter on 30 cm. Alumisse kambrisse (radoonikamber) asetatakse radooni ekshaleeriv materjal või juhitakse sinna ühendusvooliku kaudu radooni allikast radooni sisaldavat gaasi. Ülemisse kambrisse (mõõtekamber) pannakse radooni kontsentratsiooni mõõtmise seade Radon Eye Plus2, millega toimub andmeside Bluetoothi kaudu. Kahe kambri vahel asetsev katsekeha surutakse kambrite vahele kinni nelja tõmmitsa abil. [12]



Foto 17. Difusiooni mõõtmise seade ja Radon Eye Plus2 radoonikambril asetseval katsekehal



Joonis 4. Radooni difusiooni mõõtmise seade

Radooni difusiooni mõõtmise seade koosneb radoonikambrist, mõõtekambrist, nende vahel olevast uuritavast materjalist ja radooni mõõteseadmetest (Joonis 4).

7.3 Difusiooni katsete tulemused ja analüüs

Üldise, ühepoolse difusiooni λ arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit (4) [8]:

$$\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_{leke} + \lambda_{dif}, \quad (4)$$

kus λ_{Rn} – radooni lagunemiskoefitsient;
 λ_{leke} – radooni lekkekoefitsient;
 λ_{dif} – radooni difusioon.

Eelnevast valemist tuletatakse järgmine valem λ_{dif} arvutamiseks (5) [8]:

$$\lambda_{dif} = \lambda - \lambda_{Rn} - \lambda_{leke}, \quad (5)$$

kus λ – üldine difusioon;
 λ_{Rn} – radooni lagunemiskoefitsient;
 λ_{leke} – radooni lekkekoefitsient.

Radooni puhul arvestame radioaktiivse lagunemise seadust, mis väljendub valemis, kus arv N väljendub eksponentsiaalse vähenemise seaduspärasusena (6) [14]:

$$N = N_0 \times e^{\lambda^x t}, \quad (6)$$

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 tuleme järgmisest valemist (7) [8]:

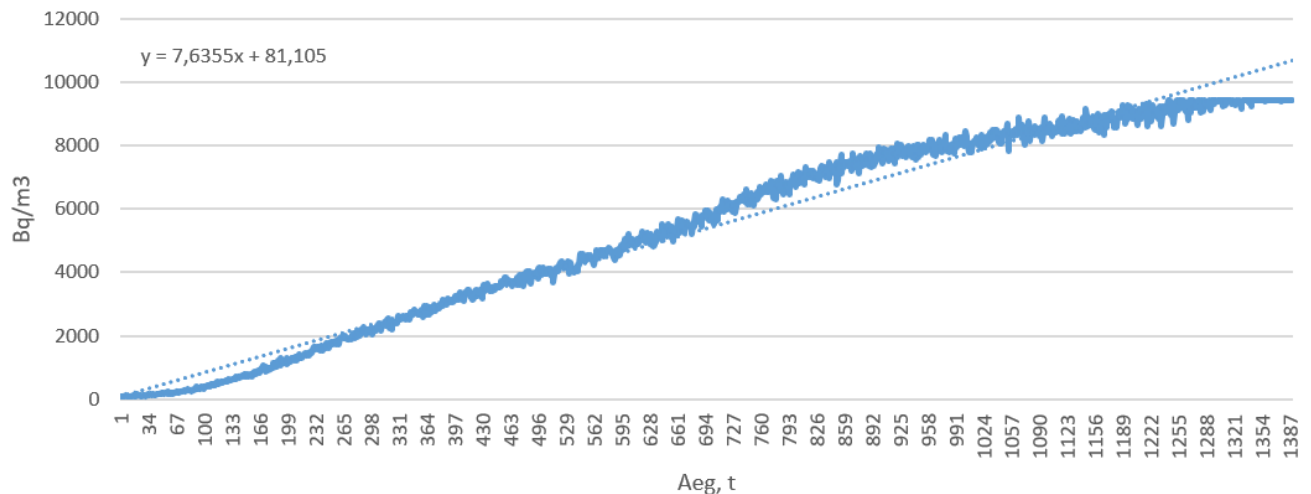
$$\frac{(N_0 - N)}{N_0} = (1 - e(\lambda_{dif} \times t)) \quad (7)$$

Radooni difusiooni suhteline voog D (1/(m²×s)) katsekehasse arvutatakse järgneva valemiga (8) [8]:

$$D = \frac{\Delta}{s \times t}, \quad (8)$$

kus Δ – radooni suhteline vähenemine tunni jooksul;
 s – katsekeha aktiivse osa pindala, m²;
 t – aeg, s mõõtmise algusest.

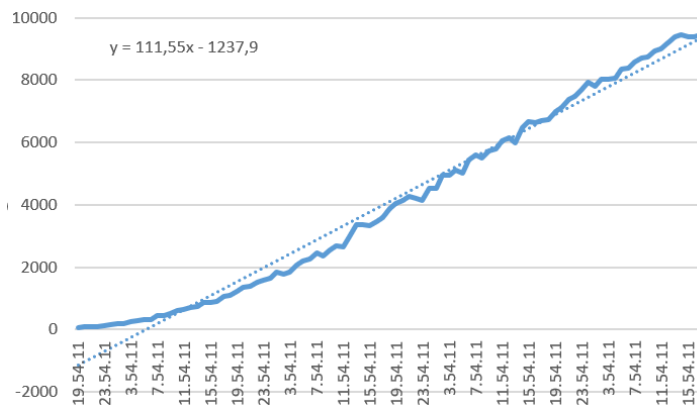
Saadud katse tulemused: Erinevate katsete käigus võrdlen katsekeha SK5P, (2 cm paksune, lisatud lisandiga) 28 päeva vees kivilinenud, radooni difusioone. Katsekeha SK5P juures näeme, et radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris (Joonis 5) on 7,64 Bq/m³ tunnis. Seda võib pidada üsna heaks tulemuseks. Kuid need katsed on tehtud labori tingimustes, mis ei anna reaalselt pilti betooni pikaajalise käitumise kohta. Betooni võivad tekkida praod, maja hakkab „elama“ ja siis on pilt kindlasti teine.



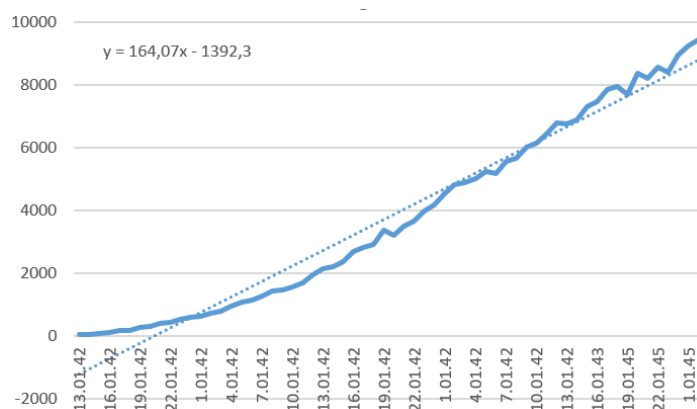
Joonis 5. Katsekeha SK5P 2 cm 04.06.2022-01.08.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris

Võrdluseks tehti katseid ka kiledega, kus on näha, et erinevate kilede korral on tõusu väärtust väga suur. Betooni kile 0,3 mm korral on kontsentratsiooni tõus $111,55 \text{ Bq/m}^3$ tunnis (Joonis 6) ja kauakestval kile 0,175 mm on kontsentratsiooni tõus $163,89 \text{ Bq/m}^3$ tunnis (Joonis 7). Betooni kile ja kauakestva kile korral ei ole tegemist radoonitõrjeks kasutatavate kiledega. Radoon ERGO 0,3 mm kile korral on kontsentratsiooni tõus $75,265 \text{ Bq/m}^3$ tunnis (Joonis 8). DELTA Radonsperre 0,4 mm kile korral on kontsentratsiooni tõus $29,982 \text{ Bq/m}^3$ tunnis (Joonis 9). Blue Seal 0,4 mm kile korral on kontsentratsiooni tõus $36,058 \text{ Bq/m}^3$ tunnis (Joonis 10).

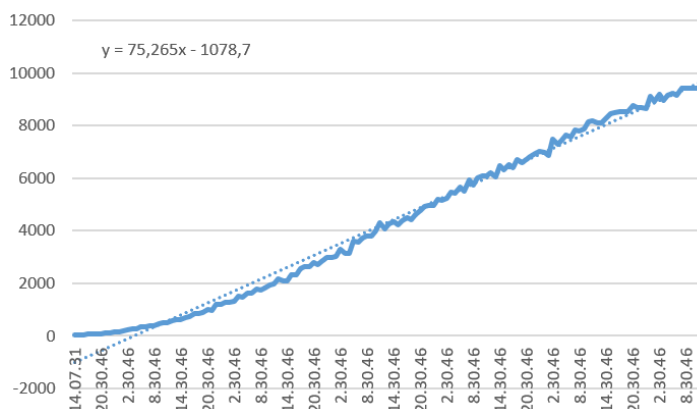
Paljude radooni tõkkekilede toimivusdeklaratsioonis puuduvad kile radooni tõkestamisomadusi iseloomustavad näitajad. Üksikutel radooni tõkkekilet müüvatel veebilehtede on radoonikile kirjelduses radooni näitajad siiski ka olemas.



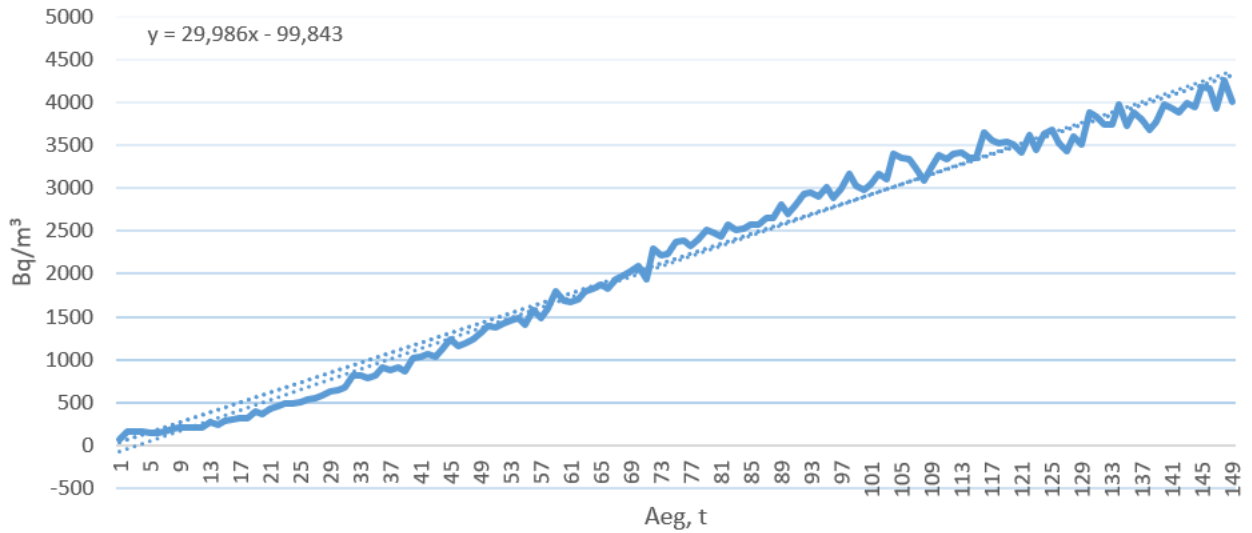
Joonis 6. Betooni kile 0,2 mm 21.10.2022-25.10.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus
mõõtekambris



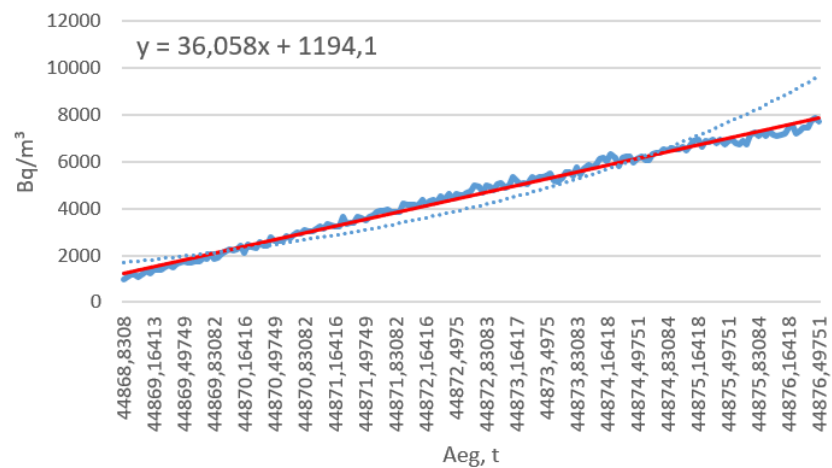
Joonis 7. Kauakestev kile 0,175 mm 18.10.2022-21.10.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus
mõõtekambris



Joonis 8. Radoon ERGO 0,3 mm 26.10.2022-01.11.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus
mõõtekambris

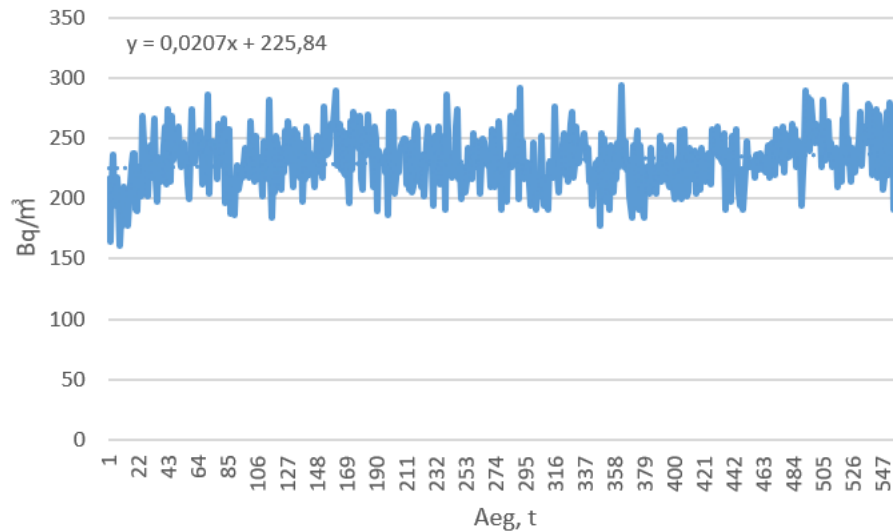


Joonis 9. DELTA Radonsperre 0,4 mm 04.01.2023-10.01.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris



Joonis 10. Blue seal 0,4 mm radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris

Betoon keha vördluses toon välja veel iseparaneva betooni (Joonis 11), mille korral radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris on $0,0229 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Võrreldes seda tulemust katsekeha SK5P korral saadud tulemusega, näeme ca 335 kordset vahe. Siinkohal peab jällegi välja tooma, et katsed on tehtud laboritingimustes ja reaalsel pilti see tulemus siiski ei näita. Kuid võrreldes katsekehaga SK5P on tulemus siiski väga hea, mis kindlasti ka labori välistes tingimustes on parem.



Joonis 11. Iseparanev betoon 26.08.2022-26.09.2022 radooni kontsentratsiooni lineaarne tõus mõõtekambris

Katsekeha läbiva radooni difusiooni kiiruse mõõtmise alusel leiti ka katsekehade difusioonitegurid.

Tabel 7. Katsete tulemus

Katsekeha nimetus	Katsekeha paksus, m	Tõusukiirus, x-kordaja, Bq/m ³	Kontsentratsiooni gradient ΔC , Bq/m ³	Radooni aktiivsuskontsentratsioon radoonikambris, Bq/m ³	Difusioonitegur D, $\frac{1}{m \cdot s}$
Katsekeha SK5P	0,02	7,6355	389679,9	389761 ± 22374	8,89E-08
Radoon ERGO	0,003	75,265	261411,3	262490 ± 14522	1,96E-07
Kauakestevkile	0,00175	164,07	97110,7	98503 ± 5730	6,70E-07
Betoonikile	0,002	111,55	199936,1	201174 ± 11043	2,53E-07
Iseparanevbetoon PC1	0,02	0,0207	100269,16	100495 ± 5944	9,36E-10
Blue Seal	0,004	36,058	360083,3	361762 ± 19934	9,08E-08
DELTA RadonSparre	0,004	29,982	290196,9	290201 ± 11043	9,37E-08

Alumises kambris on 10 tseoliidi kotti, mille korral radooni aktiivsuskontsentratsioon kambris on 389761 ± 22374 Bq/m³. 2 cm paks katsekeha SK5P on valmistanud betoonist lisatud lisandiga REBA DM, ning see on vees kivistunud 28 päeva. Läbiva difusiooni mõõdeti ajavahemikul 04.06.22 - 01.08.22. Tabelist on näha, et tema difusioonitegur on 8,8863E-08. Võrreldes seda tulemust kilede korral saadud näitudega, saame: radoon ERGO radooni aktiivsuskontsentratsioon radoonikambris on 262490 ± 14522 Bq/m³ ning vastav difusioonitegur 1,95863E-07; kauakestva kile korral radooni aktiivsuskontsentratsioon radoonikambris on 98503 ± 5730 Bq/m³ ning vastav difusioonitegur 6,70443E-07; betooni kile radooni aktiivsuskontsentratsiooni radoonikambris on 201174 ± 11043 Bq/m³ ning vastav difusioonitegur 2,53029E-07; Blue seal radoonikile radooni aktiivsuskontsentratsioon

radoonikambris on $361762 \pm 19934 \text{ Bq/m}^3$ ning vastav difusioonitegur $9,08281\text{E-}08$ ja DELTA Radonsperre radoonikile radooni aktiivsuskontsentratsioon radoonikambris on $290201 \pm 11043 \text{ Bq/m}^3$ ning vastav difusioonitegur $9,3723\text{E-}08$. Iseparanevabetooni PC radooni aktiivsuskontsentratsiooni kambris on $100495 \pm 5944 \text{ Bq/m}^3$ ning vastav difusioonitegur $9,36255\text{E-}10$.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö käigus uuriti radooni olemasolu ja tema kahjulikust, samuti ka erinevaid lahendusi radooni tõkestamiseks. Lõputöö käigus kirjeldatakse erinevate katsekehade valmistamist ja koostist. Samuti katsetatakse kuubikukujuliste katsekehade survetugevust ja kettakujulise katsekeha radooni difusiooni.

Katsetes kasutati katseseadeldist, mis koosneb mõõtekambrist ja radoonikambrist, mõõtevahendist AlphaGuard DF2000, mõõtevahendist Radon Eye Plus2, ühendusvoolikutest, erinevatest radoonigeneraatorist ning muudest lisadetailidest.

Lõputöö käigus valmistati neli kuubikukujulist ja kettakujuline katsekeha. Kõik katsekehad on ideaalselt 28 päeva vees kivinenud. Kaks kuubikukujulist ja kettakujulise katsekeha valmistamisel lisati lisandit REBA DM 2%. Kahe teise kuubikukujulist katsekeha valmistamisel lisandit ei lisatud.

Survetugevuse katsed näitavad, et lisandiga katsekehad on 28,6% nõrgemad, kui ilma lisandita katsekehad. Kuigi mahumassilt on kuubikukujulised katsekehad üpris sarnased.

Radooni difusiooni katse käigus võrdlesime radooni difusiooni ideaalselt 28 päeva vees kivinenud lisandiga kettakujulise katsekeha SK5P, radooni kilede ja iseparaneva betooniga.

Difusiooni katsetel saadud tulemused näitavad, et ideaalselt 28 päeva kivinenud ja lisatud lisandiga kettakujuline katsekeha SK5P korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $7,64 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Betooni kile 0,3 mm korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $111,55 \text{ Bq/m}^3$ tunnis ja kauakestval kile 0,175 mm korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $163,89 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Radoon ERGO 0,3 mm kile korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $75,265 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. DELTA Radonsperre 0,4 mm kile korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $29,982 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Blue seal 0,4 mm kile korral on radooni kontsentratsiooni tõus mõõtekambris $36,058 \text{ Bq/m}^3$ tunnis. Kõige parema radooni tõkestava tulemuse selles töös saadi DELTA Radonsperre 0,4 mm radooni tõkkekillega. Võrreldes katsekehaga SK5P on erinevus Betooni kilel ca 15 kordne, kauakesteval kilel ca 22 kordne, Radoon ERGO kilel ca 10 kordne, DELTA Radonsperre radooni tõkkekile ca 4 kordne, Blue seal radooni tõkkekilel ca 5 kordne. Iseparaneva betooni korral on tema difusioonitegurine erinevus, katsekeha SK5P difusiooniteguriga ca 335 korda. Mõõdetud/hinnatud kauakestev kile ja betooni kile ei ole mõeldud radooni tõkestamiseks.

Esitatud lõputöös on kõik katsed tehtud labori tingimustes, mis tõttu need ei näita katsekehade pikaajalise käitumise dünaamikat. Reaalsetes tingimustes hakkab maja „elama“, betooni võivad tekkida praod, mistõttu võivad ka töös saadud tulemused muutuda. Kuid ehitusmaterjalide tootjad teevad aastast aastasse tublit tööd, et parandada ja edasi arendada ehitusmaterjalide kvaliteeti. Seda on näha antud lõputöö katsete tulemusel ning, katsete tulemused on paljutõotavad.

SUMMARY

Radon Diffusion

As time goes on, the construction of buildings in increasingly safer ways for both the environment and people is becoming more important. Fewer and fewer products harmful to human health are used in the production of construction materials. But it's not only construction materials that we have to keep an eye on; we are also endangered by gases seeping through the earth's crust that are harmful to human health. One of these is radon, which 99% of people have probably never heard of and know nothing about the dangers of. Since radon has been little talked about and we lack the necessary knowledge, it is difficult to pay attention to the dangers of radon. Radon should be measured before construction works as well as before and after major repairs.

In the course of the dissertation, four cube-shaped and one disc-shaped test piece was prepared. All the test pieces have perfectly hardened in water for 28 days. The additive REBA DM 2% was added in the preparation of two cube-shaped and one disc-shaped test piece. No additive was added in the preparation of the other two cube-shaped test pieces.

The compressive strength test shows that test pieces with the additive are 28.6% weaker than test pieces without the additive. Although by bulk density, the cube-shaped test pieces are fairly similar.

During the radon diffusion test, we compared radon diffusion with the disc-shaped test piece SK5P with additive that had perfectly hardened in water for 28 days, radon membrane and self-healing concrete.

The results of the radon diffusion tests show that the disc-shaped test piece SK5P with additive that had perfectly hardened for 28 days has a linear increase of 7.64 Bq/m^3 . The increase of 0.3 mm concrete membrane is 111.55 Bq/m^3 , a long-lasting 0.175 mm membrane has an increase of 163.89 Bq/m^3 , the increase of 0.3 mm radon ERGO membrane is 75.265 Bq/m^3 , the increase of 0.4 mm Blue seal radon membrane is $36,058 \text{ Bq/m}^3$ and for the increase of 0.4 mm DELTA RadonSperre radon membraane is $29,982 \text{ Bq/m}^3$. Compared to the test piece SK5P, the difference for the concrete membrane is approx. 15 times, for a long-lasting membrane approx. 22 times, radon ERGO approx. 10 times, Blue seal radoon membrane is approx. 5 times and for DELTA Radonsperre radon membraane is approx. 4 times. Self- healing concrete has an increase of 0.0229 Bq/m^3 . Comparing the result to that of test piece SK5P, we can see a difference of approx. 335 times.

For the dissertation, all tests were carried out in a laboratory and do not depict the actual situation. In reality, the building starts to live, cracks emerge, and the result is different. However, manufacturers of construction materials work hard year after year to improve and develop the quality of construction materials. What we can see from the results of this dissertation is that the test results are good.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] "Radoonitõrjekeskus," [Online]. Available: <https://radoonitorjekeskus.ee/mis-on-radoon/>. [Kasutatud 14. Veebruar 2023].
- [2] "Betonimeister," [Online]. Available: <https://betonimeister.ee/beton/betooni-lisandid/>. [Kasutatud 14. Veebruar 2023].
- [3] A. Serv, "EESTI RANNALIIVADE RADOONI EMANATSIOON," [Online]. Available: http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/57445/serv_anne.pdf. [Kasutatud 05. Aprill 2022].
- [4] E. 840:2017, "Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus," [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-840-2017>. [Kasutatud 15. Mai 2022].
- [5] E. Keskkonnaministeerium, "RAM 2016," [Online]. [Kasutatud 15. Jaanuar 2023].
- [6] K. Melnikov, *KLAASJÄÄTMETE KASUTAMINE BETOONI JÄMETÄITEMATERJALINA NING SELLE MÕJU BETOONI SURVETUGEVUSELE*, Tartu, 2019.
- [7] E. 11665-13:2017, "Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus," [Online]. [Kasutatud 15. Jaanuar 2023].
- [8] "IAEA, „Measurement and Calculations of Radon Releases from Norm Residues,“,“ [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf. [Kasutatud 22. Mai 2022].
- [9] E. 12390-2:2019, "Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus," [Online]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=92767&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 18. Mai 2022].
- [10] E. 12390-3:2019, "Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus," [Online]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=93007&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 15. Mai 2022].
- [11] www.southernscientific.co.uk, "Alpha Guard DF2000," [Online]. Available: <https://www.southernscientific.co.uk/news/2019/09/monitor-the-concentration-of-radon-isotopes-with-the-bertin-alphaguard-df2000>. [Kasutatud 15. Jaanuar 2023].
- [12] V. Moseitšuk, *Erinevate betoonist proovikehade valmistamine ning difusiooni katsetamine: Lõputöö*, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2022.

- [13] [www.radonshop.com](https://www.radonshop.com/ftlab-radoneye-plus2-en), "Radon Eye Plus2," [Online]. Available: <https://www.radonshop.com/ftlab-radoneye-plus2-en>. [Kasutatud 15. Jaanuar 2023].
- [14] Wikipedia, "Radioaktiivse lagunemise seadus," [Online]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Radioaktiivse_lagunemise_seadus. [Kasutatud 15. Jaanuar 2023].

DELTA® KEN

Dörken GmbH & Co. KG · Wellenstraße 58 · 58313 Herdecke · Tel.: 0 23 30 63-0 · Fax: 0 23 30 63-355 · info@dorken.de · www.dorken.de
Dörken Group est/eette · A Company of the Dörken Group · Une société du groupe Dörken · Lid van de Dörken groep