

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Füüsika Instituut

Anne Serv

**Tartu ja Põlva hoonete siseõhu radoonisisaldus ning selle sõltuvus
õhurõhust ja ventilatsioonist**

Magistritöö keskkonnafüüsikas

30EAP

Juhendajad: Rein Koch, PhD
Alan Henry Tkaczyk, PhD

Tartu 2019

TARTU JA PÕLVA HOONETE SISEÕHU RADOONISISALDUS NING SELLE SÕLTUVUS ÕHURÕHUST JA VENTILATSIOONIST

Käesoleva lõputöö eesmärk oli uurida radooni kontsentratsiooni muutumisi hoonete erinevate ruumide õhus ning leida hoonete radoonisisalduse ja õhurõhu vahelised korrelatsioonid. Lisaks uuriti ventilatsiooni mõju Tartu Ülikooli füüsikahoone – Physicumi erinevate ruumide radoonisisaldusele. Tartu mõõtmisteks kasutati kodukasutajale taskukohaseid radooni mõõteseadmeid RadonEye RD200 (BLE)-d (4 seadet). Lühematel mõõteperioodidel kasutati ka laboratoorseks tööks mõeldud mõõteseadet AlphaGUARD DF2000, mille abil kalibreeriti ka RadonEye seadmed ning mõõdeti õhurõhku keldriruumis.

Lisaks Physicumis läbi viidud mõõtmiste analüüsile ja andmete analüüsile oli selle lõputöö eesmärgiks ka varem Põlva vallas läbi viidud lühiajaliste mõõtmiste analüüs. Analüüsi käigus võrreldi radooni kontsentratsioone keldri- ja eluruumides, et võrrelda radoonisisaldusi erinevat tüüpi hoonetes ja keldrites. Leiti keldri- ja eluruumis läbi viidud paralleelsetel mõõtmistel saadud mõõtetulemuste omavahelised korrelatsioonid ning ka radoonisisalduse ja (Põlva valla tulemuste jaoks Võrus mõõdetud) õhurõhu vahelised korrelatsioonid.

Põlvas läbi viidud mõõtmiste tulemusena selgus, et keskmiselt on radoonisisaldus keldrites kolm korda suurem kui esimese korruse eluruumis, kuid see erinevus võib kõikuda suurtes piirides. Lisaks sellele selgus mõõtmistulemuste analüüsil, et keldri radoonisisalduse ja õhurõhu vahel on negatiivne korrelatsioon. Üks mõõtmine näitas, et radoonisisaldus võib suurenedagi kuni 5 korda (30 hPa suuruse) õhurõhu languse ajal (korrelatsioon -0,93).

Tartu Ülikooli Physicumis läbiviidud mõõtmised näitasid tugevat päevast ja nädalast radoonikontsentratsiooni varieerumist suletud ventilatsiooniavadega keldriruumis. Radoonisisaldus saavutas oma maksimaalse väärtuse enam-vähem samal ajal, kui ventilatsioon hakkas tööle täisvõimsusel ning vahetult peale ventilatsiooni lülitumist täisvõimsuselt 1/3-le täisvõimsuse väärtusest saavutas radooni kontsentratsioon keldriruumis oma maksimumi. Keskmise päevane käik keldriruumis muutus vahemikus $390 \text{ Bq/m}^3 \dots 510 \text{ Bq/m}^3$. Lisaks radoonisisalduse varieerumise mõõtmisele, teostati radoonisisalduse mõõtmine samas keldriruumis eri kõrgustel: 10 cm, 78 cm, 140 cm ja 180 cm, hindamaks põrandast toimuva radooni ekshalatsiooni mõju. Tulemuseks selgus, et radoonisisalduse suurim väärtus on kõrgusel 10 cm põrandast. Kõrguse edasisel suurenemisel radoonisisalduse kahanemine ei olnud markantne. Neil kõrgustel mõõdetud radoonisisaldused erinesid teineteisest vähem kui 15 %. Physicumi teistes ruumides läbi viidud mõõtmiste tulemusena selgus, et radoonisisaldus võib varieeruda keskmiselt 2 ... 11 korda sõltuvalt ruumist, kuid keskmised radoonisisaldused jäid alla WHO soovituslikku viitetaset eluruumis – 100 Bq/m^3 .

Märksõnad: RadonEye, Radoon eluruumides, Radoon keldrites, Radoonisisalduse päevane muutlikkus, Radooni kontsentratsiooni sõltuvus atmosfääri õhurõhust

CERCS koodid: P220 Tuumafüüsika, P180 Metroloogia, instrumentatsioon, T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

INDOOR RADON CONCENTRATION IN TARTU AND PÕLVA AND ITS DEPENDENCE ON ATMOSPHERIC PRESSURE AND VENTILATION

The aim of this thesis was to study changes in radon concentration indoors in different rooms of Physicum (at the University of Tartu) and find out its correlation with the building ventilation and atmospheric pressure. Measurements were performed with four homeowner's affordable radon measurement devices RadonEye RD200 (BLE)'s. For shorter periods of measurements, the laboratory device AlphaGUARD DF2000 was used to calibrate the RadonEyes and to monitor radon concentration and atmospheric pressure. Another aim of this thesis was to carry out short-term radon measurements in cellars and living spaces in Põlva, to compare radon levels in different buildings, calculate radon concentration changes in these rooms, and find out possible radon-level dependence on atmospheric pressure.

The measurement results of dwellings in Põlva usually indicated a negative correlation between cellar radon concentration and atmospheric pressure. On average, the radon level in cellars is three times higher than in ground floor living space, but the difference can vary over a large range. One measurement indicated that the radon concentration can increase up to five times during an atmospheric pressure drop (correlation -0,93).

The results of measurements carried out in Tartu indicated strong daily and weekly variations in cellar rooms where ventilation openings were closed. The radon level reached its maximum value about the time when ventilation started to work at full power and the radon concentration had its minimal value when ventilation system switched to 1/3 of full power. Some measurements in the cellar rooms in Tartu were carried out to check if radon concentration depends on the height of the measurement from the floor. The highest concentration was measured at the height of 10 cm from the floor, but the value did not decrease linearly or exponentially with the elevation. The difference in the radon concentration measured at levels of 78 cm, 140 cm and 180 cm from the floor was less than 15 %. Measurements in other rooms of Physicum showed that average radon concentration in different rooms varies 2 ... 11 times, but as average, radon concentration in these rooms stay below WHO recommended reference level – 100 Bq/m³.

Keywords: Radon Eye, Radon in living space, Radon in cellars, Daily variation of radon, Dependence of radon concentration on atmospheric pressure

CERCS codes: P220 Nuclear physics, P180 Metrology, physical instrumentation, T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Radoon siseõhus	6
2. Radon Eye'de usaldusväarsus	6
2.1. Võrdlusmõõtmine	6
2.2. RadonEye seadmete stabiilsus	8
3. Põlva mõõtmised	9
4. Tartu Ülikooli Physicumis läbiviidud õhu radoonisisalduse mõõtmised	14
4.1. Radoonisisaldused keldriruumi A009 siseõhus peale ventilatsiooniavade sulgemist	14
4.2. Radoonisisalduse muutumine ruumis A009 perioodil 8. okt-19. dets 2018	15
4.3. Mõõtmised Physicumis keldrikorruse ruumides (A015, A009, B002) perioodil 19. dets 2018 – 8. jaan 2019	18
4.4. Mõõtmine ruumis A009 perioodil 8. jaan – 6. mai 2019	22
4.5. Mõõtmine ruumis D517 perioodil 7. aprill – 6. mai 2019	23
4.6. Mõõtmine ruumis A009 erinevatel kõrgustel, perioodil 6. mai – 20. mai 2019	26
5. Ventilatsioon ja Physicumis siseõhu radoonisisalduse käitumine	30
5.1. Nädalane radoonisisalduse muutumine	30
5.2. Õhu radoonisisalduse päevane käik erinevates ruumides	32
5.3. Keskmised radoonisisalduse kontsentratsioonid tööajal ja peale seda	35
5.4. Siseõhu radoonisisalduse muutumine ventilatsiooni väljalülitumise ajal	36
5.5. Õhurõhkude erinevus ruumis A009 ning Physicumis katusel mõõdetud ilmajaamas ...	40
Kokkuvõte	41
Kasutatud kirjandus	43
Lisa 1: Põlva mõõtmiste tulemused	44
Lisa 2. Paralleelsete mõõtmiste tulemused graafiliselt	46
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	50

Sissejuhatus

6. veebruar 2018 jõustus Euroopa Nõukogu direktiiv 2013/59/Euratom, millega kehtestatakse põhilised ohutusnormid kaitseks ioniseeriva kiirgusega kiiritamisest tulenevate ohtude eest [1]. Selles dokumendis seati liikmesriigi kohustuseks koostada ja vastu võtta radooni tegevuskava, et kaitsta elanikkonda ioniseeriva kiirguse eest ning olla valmis avariolukordadeks. Sellega seoses jõustus 6. august 2018 Keskkonnaministri määrus nr 28 „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“ [2], mille lisas on välja toodud kõrgendatud radooniriskiga linnad ja vallad. Nende omavalitsuste seas on ka Tartu linn ja Põlva vald, kus asusid ka hooned, mille radoonisisaldust käesoleva magistr töö raames uuriti. Radoonimõõtmistega siinses piirkonnas tegeles aktiivselt Eesti Geoloogiakeskus, mis nüüd jätkab tegevust Eesti Geoloogiateenistusena, et analüüsida põhjalikumalt pinnaseõhu ja elamuhoonete radoonisisalduse vahelist seost [3].

Selle magistr töö eesmärk on anda ülevaade radoonisisalduse muutlikusest siseruumides ning seda nii maja erinevates osades kui ka ajahetkede võrdluses. Töö esimeses osas uuriti kahe erineva otstarbega ruumide radoonisisaldusi lühikesel perioodil, et võrrelda radoonisisaldusi vähe kasutatavas keldriruumis, kus enamasti on ka kõrgem radoonisisaldus ning eluruumis, kus inimesed veedavad suure osa oma ajast. Osa Põlva mõõtmisi viidi läbi paralleelselt keldris ja eluruumis, et uurida nende omavahelist sõltuvust ja seda nii radoonisisalduse kui ka radoonisisalduse muutumise dünaamika järgi.

Magistr töö teises osas uuriti põhjalikumalt radoonisisalduse ajalist muutumist Füüsika Instituudi hoones. Physicumis läbi viidud pikaajaste mõõtmiste analüüsiks kasutati enamasti tarkvara Jupyter Notebook. Selle abil analüüsiti radoonimõõtmiste aegridasid, mille põhjal leiti erinevate perioodide keskmist nädalast või päevast radoonisisalduse muutumist kirjeldavad kõverad. Lisaks sellele uuriti mõõtetulemuste sõltuvust teadaolevast ventilatsioonirežiimist ning õhurõhust, mille andmed saadi sama hoone katusel asuvast e-ilmajaamast.

Oluline osa käesoleva magistr töö teostamise käigus oli uurida ka mõõtmistes kasutatavate mõõteseadmete – RadonEye RD200 (BLE)-de mõõtetulemuste usaldusväärsust. Selleks analüüsiti 2018. aasta kevadel kalibreeritud AlphaGUARD DF2000-ga läbi viidud võrdlusmõõtmiste tulemusi ning mõõteseadmete omavaheliste mõõtetulemuste vaheliste suhete muutlikust.

1. Radoon siseõhus

Radoon (Rn-222) tekib raadiumi (Ra-226) radioaktiivsel lagunemisel, seega leidub radooni raadiumit sisaldavates materjalides ning kohtades, kuhu radoon kui gaasiline element edasi on kandunud. Vaatamata oma peaaegu 8 korda suuremale tihedusele võrreldes õhuga, on siiski valdavaks transpordi viisiks rõhuerinevustest põhjustatud õhuvoolud (adveksioonid) pinnasest selle kohal asuvasse ruumi [4]. Radooni akumulierumist hoonetes mõjutavad lisaks maapinnast või ehitusmaterjalidest ekshalatsioonile ja ventilatsioonile ka kohalikud meteoroloogilised tingimused. Nendeks tingimusteks on näiteks maapinna niiskus, pinnase ja õhu temperatuurid (ja temperatuuri gradiendid), tuul ning õhurõhk [5].

WHO (Maailma Terviseorganisatsiooni) soovitusel võiks keskmine radoonisisaldus jääda alla 100 Bq/m^3 . Mõningates riikides on seda raske saavutada ning seetõttu soovitatakse viitetasemeks 300 Bq/m^3 , millele vastav aastane efektiivdoos on umbes 10 mSv [4]. Euroopa direktiiv 2013/59/EURATOMis ongi valitud viitetasemeks elu- ja tööruumides 300 Bq/m^3 [1]. UNSCEAR 2008 raporti põhjal on maailma keskmine efektiivdoos $3,1 \text{ mSv/y}$, seejuures looduskiirguse panus sellesse on $2,4 \text{ mSv/y}$ ja meditsiinikiirgusel $0,62 \text{ mSv/y}$ [6].

Rahvusvahelise Kiirguskaitsekomisjoni (ICRP) soovituslik valem [7] radoonisisalduse põhjal aastase efektiivdoosi leidmiseks on:

$$\text{Efektiivdoos (mSv)} = 6,7 \times 10^{-6} \frac{\text{mSv}}{\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \cdot \text{h}} \times C_{\text{Rn222}} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) \times t(h), \quad (1)$$

kus C_{Rn222} on sissehingatava õhu radoonisisaldus ning t on aeg, mille jooksul ollakse eksponeeritud radooni lagunemisel tekkivale ioniseerivale kiirgusele. Kordaja $6,7 \times 10^{-6} \text{ mSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ valemis (1) on saadud eeldusel, et tasakaalufaktor F radooni ja tema tütarde vahel 0,4, mis on standardeeldus.

2. Radon Eye'de usaldusväärsus

2.1. Võrdlusmõõtmine

04.09-12.09.2018 viidi Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi (W.Ostwaldi 1, Tartu) keldriruumis A009 läbi võrdlusmõõtmised, et leida parandid kodumõõtmisteks mõeldud radoonimõõteseadmete RadonEye RD200 (BLE)-de jaoks. Võrdlusmõõtmistes kasutati tabelis 1 väljatoodud seadmeid.

Võrdlusmõõtmistes kasutati AlphaGUARD DF2000 seadet võrdlusseadmena. Lisaks radooni (Rn-222) kontsentratsioonile õhus mõõdab seade ka meteoroloogilisi suursusi, nagu suhteline õhuniiskus, temperatuur ja õhurõhk ning salvestab ka seadme olekuparameetreid (nt mõõterežiim, voolukiirus). Mõõtmiste ajal kasutati AlphaGUARD'i difusioonirežiimis ehk mõõdetava õhu radoonisisalduse määramiseks koguti proovi passiivselt. RadonEye mõõdab radoonisisaldust ainult passiivses kogumisrežiimis (radoon difundeerub mõõtekambrisse läbi korpuses olevate avade).

Tabel 1. 04.09.2018-12.09.2018 läbi viidud võrdlusmõõtmistes kasutatud radoonisisalduse mõõteseadmed

Instrumendi nimi	Seeria number	Tootja (Riik)	Kalibreeritud	Tarnija poolt postitatud või Eestis kasutusele võetud
AlphaGUARD DF2000	AG00015	SAPHYMO GmbH (Saksamaa)	10.04.2018	07.2018
RadonEye RD200 (BLE)	SN0011	Radon FTLab (Korea)	* olemas	08.2017
	SN0024		12.2015 Lõuna-Korea Vabariigi poolt väljastatud veebisertifikaat	03.2018
	SN0067			10.2017
	SN0703			03.2019

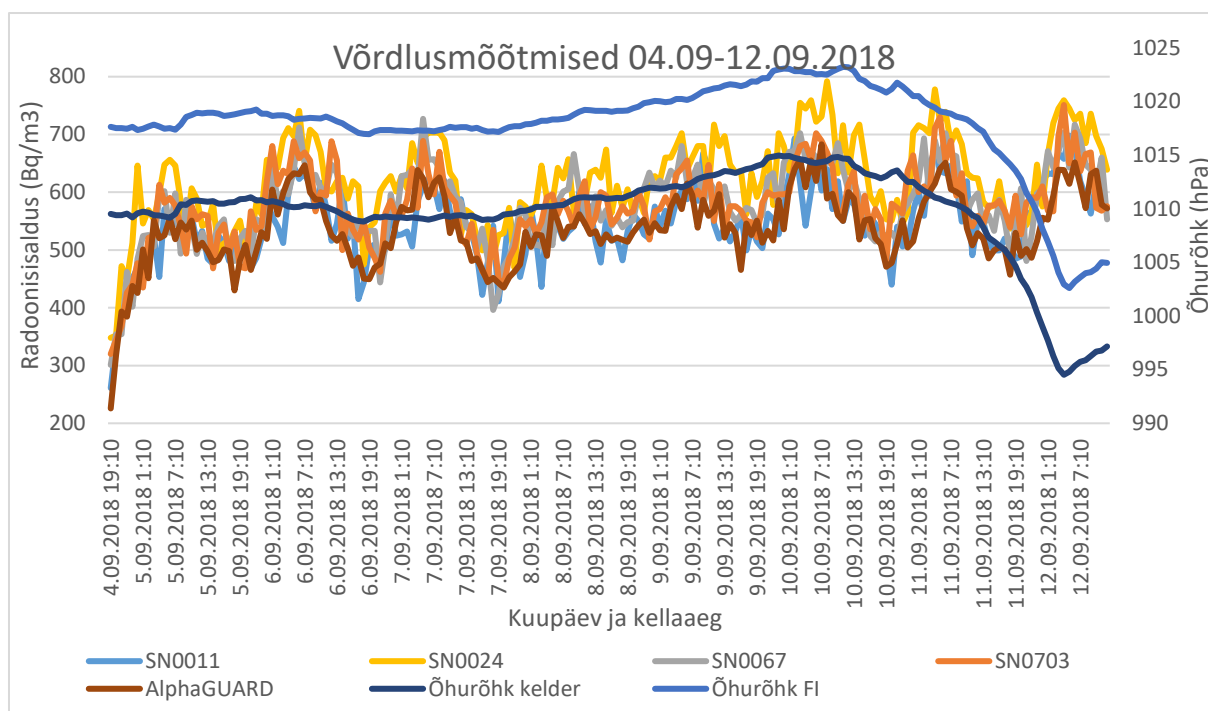
Mõlemad radooni mõõteseadmed on ionisatsioonikambriga, mis tähendab, et seade registreerib radooni lagunemisel mõõtekambris tekkinud laetud osakeste poolt põhjustatud ionisatsioonivoolu [8]. RadonEye RD200 (BLE) tootja FTLab andmetel on RadonEye suure tundlikkusega mõõtesead (0,5 pCi/l radoonisisalduse 10 pCi/l juures ehk 15 Bq/m³ radoonisisalduse 370 Bq/m³ juures). Tulemuste usaldusväärsust iseloomustav kordustäpsus on <10% 370 Bq/m³ juures ja täpsus <10% (minimaalne määramatus ±15 Bq/m³). Seade on mõeldud kasutamiseks <90% suhtelise õhuniiskusega keskkonnas ja temperatuurivahemikes 10 °C...40 °C. [9]

Radooni mõõteseadmed olid võrdlusmõõtmiste ajal paigutatud Physicumi keldrikorruse ruumi A009. Ruumi uksega eraldatud osa riiulile paigutatigi võrdlusmõõtmistes kasutatavad seadmed. Mõõtmiste ajal olid ruumide ventilatsioonivad nii A009 eesmisel kui ka tagumises ruumis kinni kaetud. Kõik instrumendid asusid samal riiulilaul (riiulilaua kõrgus 100 cm). Võrdlusmõõtmise iseloomustavad keskkonna parameetrite väärtused (AlphaGUARDi 10 minuti mõõtetulemuste põhjal) on välja toodud tabelis 2.

Tabel 2. Keskkonnatingimused võrdlusmõõtmiste ajal

	Suhteline õhuniiskus (%)	Temperatuur (°C)	Õhurõhk (mbar)	Radooni (Rn-222) kontsentratsioon (Bq/m ³)
Aritmeetiline keskmine	56,71	23,92	1009,68	537,77
Miinumum	55,02	23,41	994,41	94,50
Maksimum	59,46	24,30	1014,98	835,62

Nende mõõtmiste käigus lülitati seadmed samaaegselt sisse ning aega arvestati AlphaGUARD'i sisemise kella aja järgi. AlphaGUARD salvestas tulemusi iga 10 min tagant, kuid RadonEye'd iga tunni tagant, seetõttu AlphaGUARD'i tulemused on keskmistatud ühetunniste intervallide jaoks. Mõõtmiste tulemusena on olemas mõõteandmed ajavahemikus 04.09.2018 kell 19:10 kuni 12.09.2018 12:10. Võrdlusmõõtmiste graafikule kantud „Õhurõhk FI“ andmed on saadud Tartu füüsikahoone katusel olevast Füüsika instituudi keskkonnafüüsika labori hallatavast e-ilmajaama (<http://meteo.physic.ut.ee/>), andmebaasi arhiivist, kuhu neid kogutakse viieminutiliste intervallidega.



Joonis 1. Võrdluspõõtmise tulemused (algandmed).

Võrdluspõõtmiste tulemusi analüüsi kasutades avatud lähtekoodiga veebirakendus Jupyter Notebook versiooni 5.4.0 (Anaconda Navigator rakenduses) ning saadi järgmised suhted:

SN0011/AlphaGUARD=1,016;

SN0024/AlphaGUARD=1,155;

SN0067/AlphaGUARD=1,076;

SN0703/AlphaGUARD=1,070.

Arvutatud korrelatsioonid AlphaGUARD'i ja RadonEye RD200 BLE tulemuste vahel olid järgmised:

SN0011 - 0,803;

SN0024 - 0,823;

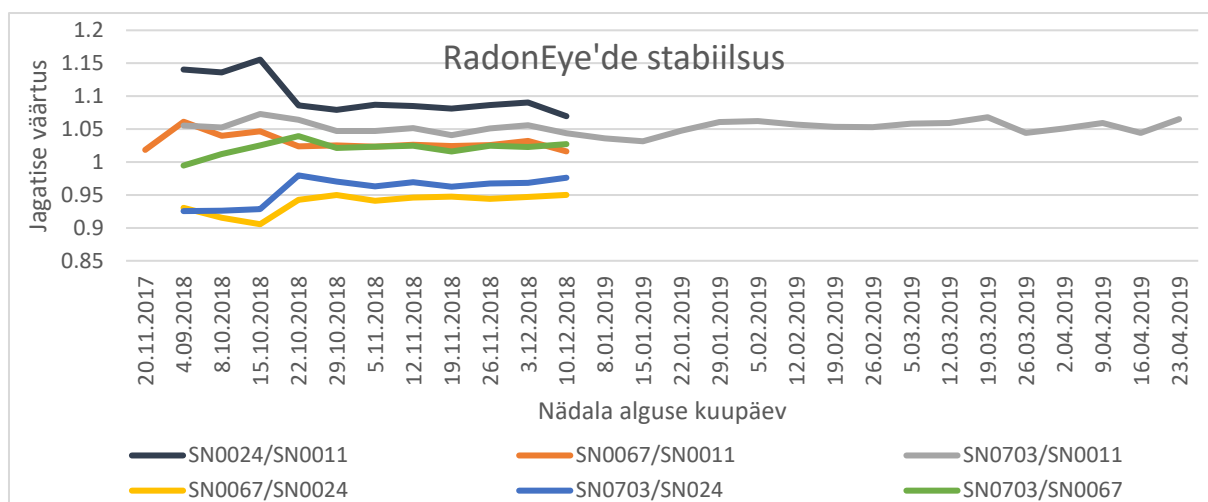
SN0067 - 0,828;

SN0703 - 0,815.

2.2. RadonEye seadmete stabiilsus

RadonEye stabiilsuse hindamiseks uuriti vähemalt kahe RadonEye seadmega paralleelselt läbi viidud mõõtmisi, mis olid vähemalt ühe nädala (168 tunni) pikkused. Analüüsiks kasutati seadmete nädala keskmisi mõõtetulemusi ning leiti seadmete omavahelised suhted. Andmete analüüsiks kasutati Microsoft Office Exceli programmi ning tulemused kanti joonisele 2.

Seadmete stabiilsust iseloomustavad statistilised suurused on välja toodud tabelis 3. Neist seadmetest kõige ebastabiilsem (suhte varieeruvus maksimaalselt 8%) on RadonEye RD200 (BLE) seeria numbriga SN0024, mis ühtlasi omab kõige suuremat erinevust etalonseadme AlphaGUARD'i mõõtetulemustega võrreldes (+16%).



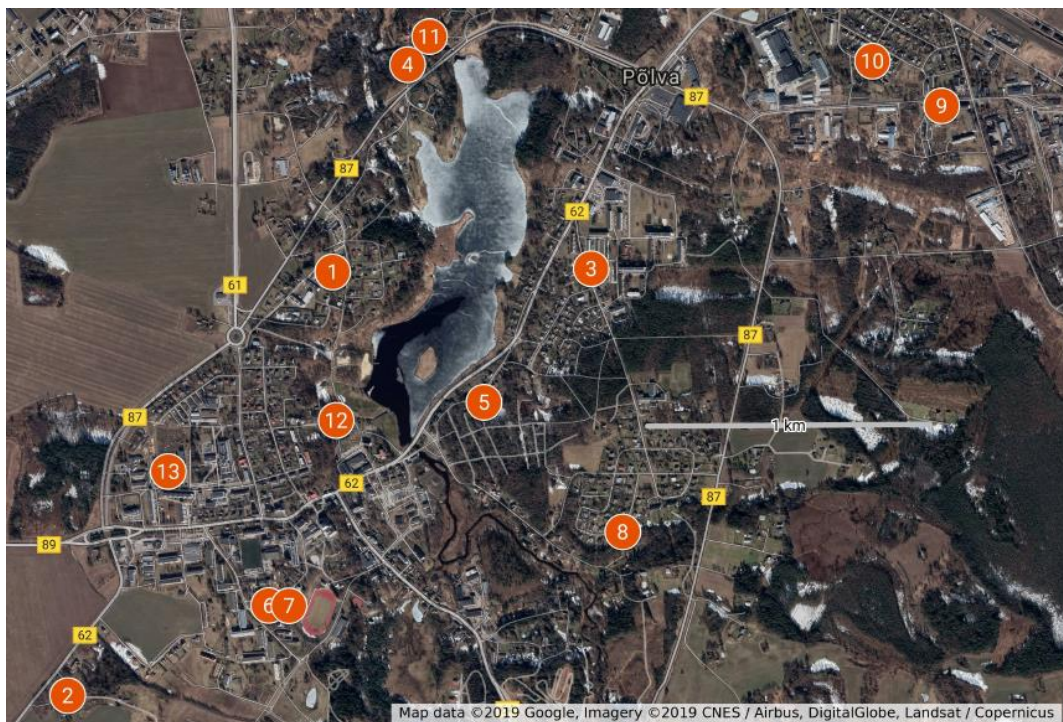
Joonis 2. RadonEye RD200 (BLE) stabiilsus.

Tabel 3. RadonEye RD200 stabiilsust iseloomustavad statistilised suurused

	SN0024/ SN0011	SN0067/ SN0011	SN0703/ SN0011	SN0067/ SN0024	SN0703/ SN024	SN0703/ SN0067
Nädalate arv	11	12	27	11	11	11
Min	1,070	1,016	1,032	0,906	0,925	0,995
Max	1,156	1,061	1,073	0,950	0,980	1,039
Max-Min	0,086	0,045	0,041	0,044	0,054	0,045
Keskmine	1,100	1,030	1,053	0,938	0,958	1,021
(Min-Max)/ Keskmine	0,078	0,044	0,039	0,047	0,057	0,044
Mediaan	1,086	1,025	1,053	0,944	0,967	1,023
Standardhälve	0,029	0,013	0,010	0,015	0,021	0,011

3. Põlva mõõtmised

2018. aasta kevadel perioodil 28. veebruar – 22. aprill viidi Põlva vallas läbi radoonimõõtmisi siseruumides (korrigeerimata mõõtetulemused kanti ette Prahast 18-20. septembril 2018 toimunud 14. rahvusvahelisel seminaril GARRM, kuhu esitatud poster on leitav leheküljelt http://www.radon.eu/workshop2018/pres/p_2_serv.pdf). Ruumideks olid kelder, sauna eesruum, magamistuba, elutuba ja garaaž. Põlva valla mõõtmiste asukohad on välja toodud joonisel 3 ning mõõtmiste täpsem info mõõtepunktide ja tulemuste kohta on välja toodud lisa 1. Lisis 2 on välja toodud ka paralleelselt kahes ruumis läbi viidud mõõtmiste graafilised tulemused, kus on arvestatud parandeid AlphaGUARD'i suhtes.

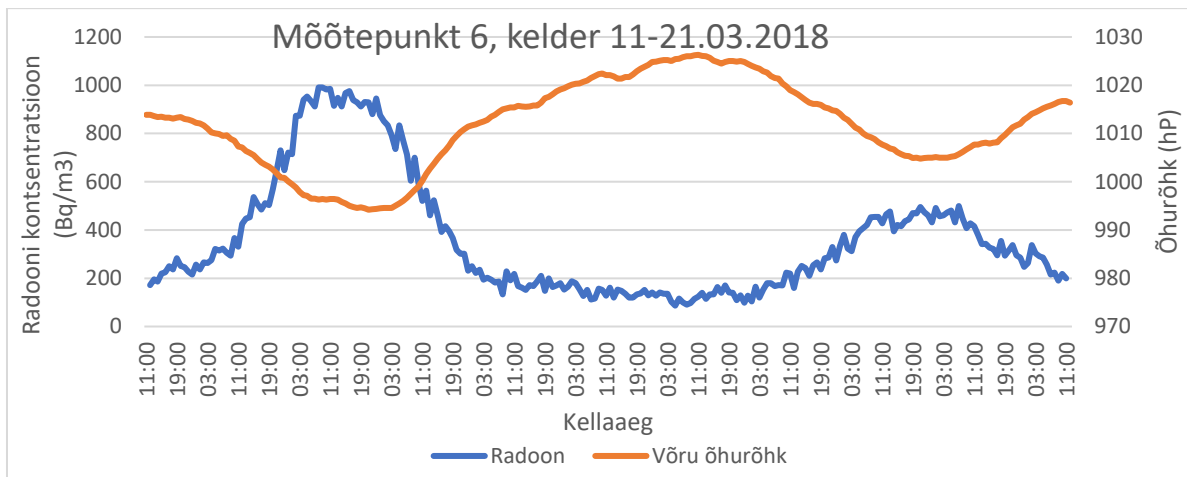


Joonis 3. Põlva mõõtmiste asukohad. Kaardi loomiseks kasutati Google My Maps'i.

Esialgu oli eesmärgiks teada saada lühiajalise mõõteperioodi jooksul radoonisisaldus autori kodus (mõõtepunkt 2; $192,7 \pm 19,5$ Bq/m³) ning hoone erinevates keldriruumides (73-100 Bq/m³). Lisaks teostas autor mõõtmisi elukaaslase vanemate juures Veriora vallas asuvas Pahtpää külas, kus keskmine mõõtetulemus ilma keldrita eluruumides oli ($144,4 \pm 15,7$ Bq/m³) ja eraldi hoones sauna all asuvas keldris ($239,9 \pm 24,7$ Bq/m³) ning Põlva linnas asuvas kortermaja keldris ($362,3 \pm 39,6$ Bq/m³). Põlva kortermaja (mõõtepunkt 6, joonis 4), keldri radoonisisalduse mõõtmiste oli näha suurt radoonisisalduse tõusu (170 Bq/m³-st 990 Bq/m³-ni), mis langes kokku suure (*ca* -30 hPa) õhurõhu langusega. Siit tekkis soov uurida, kui palju erinevad autori kodupiirkonnas radoonisisaldused keldrites ning esimese korruse eluruumides. Väike lootus oli avastada ka teisi hooneid, kus avaldub suurema õhurõhu muutusega ka siseõhu radoonisisalduse muutus, kuid mõõteperioodid oli selle märkamiseks üldiselt liiga lühike. RAM 2016 juhiste järgi ruumi (aasta) keskmise radoonisisalduse leidmiseks mõõdetakse vähemalt kahe kuu pikkuse perioodi jooksul radoonisisaldust, seejuures pool sellest ajast peaks langema kütteperioodi. Lühiajalisi mõõtmisi võib teostada igal aastaajal. Nendeks mõõtmisteks peaks kasutama pidevmõõtmisi võimaldavat seadet (antud töös kasutatud RadonEye RD200 (BLE-sid seeria numbritega SN0011 ja SN0024) ning periood vastama sellele, mille kohta soovitakse teada saada. [10] [11]

Käesolevas töös mõõteperioodiks valiti vähemalt 36 tundi, et saaks avalduda ööpäevane radoonisisalduse dünaamika, kui see on olemas. Mõõtmiste käigus üritati jälgida RAM 2016 radoonimõõtmise seadme paigaldamise juhiseid: 1-2 m kõrgusel; vähemalt 25 cm seinast; ustest, akendest, ventilatsiooniavadest ja küttekehadest vähemalt 1,5 m kaugusele. Paraku alati ei õnnestunud kõiki neid nõudmisi täita, eelkõige oli probleeme mõõteriista vähemalt 1 m kõrgusele põrandast paigaldamisega, kuna seade tuli ühendada vooluvõrku ning seetõttu tehti järeleandmisi eelkõige kõrguse suhtes. Mõõteseade paigutati mõõtmiste käigus siiski vähemalt 50 cm kõrgusele. Mõõtetulemuste analüüsis kasutatud vajaminevad õhurõhu andmed võeti

ilmateenistuse vaatlusandmete andmebaasist¹, täpsemalt kasutati Võru ilmajaama andmeid, kuna Võrus oli Põlvale lähim ilmajaam (umbes 25 km). Veebileheküljel ilm.ee on küll olemas õhurõhu andmed Põlva kohta, aga lehekülje haldajalt andmete päritolu ning andmebaasi kohta küsides saadi vastuseks, et andmed võetakse lähimast ilmajaamast, mis Põlva korral ongi Võru ilmajaam. Enne Põlva õhurõhu andmete päritolu teadasaamist võrreldi Võru (ilmateenistuse) ja Tartu (meteo.physics.ut.ee) andmeid perioodil 11. märts 11:00 - 15. märts 15:00 ning korrelatsiooniks saadi 0,999. Käesolevas töös pakkusid aga huvi eelkõige õhurõhu muutused ning seetõttu õhurõhu absoluutväärtus nii suurt rolli ei mänginud.



Joonis 4. Mõõtepunktis 6 märgatud suur radoonisisalduse muutus ja sellele vastavad õhurõhu andmed.

Esimesed mõõtmised viis autor läbi sugulaste/tuttavate kasutuses olevates hoonetes ning seejärel pakkus sotsiaalmeedias (täpsemalt Facebooki grupis „Põlva kodanik“) Põlva linna ja selle lähedase piirkonna elanikele võimalust lasta oma eluruumis ja keldris läbi viia lühiajaline radoonimõõtmine. Mõõtmine oli huvilistele tasuta ning hiljem edastati neile mõõtetulemused (mida polnud veel parandatud RadonEye/AlphaGUARD suhtega). Huvi mõõtmiste vastu oli võrdlemisi suur. Postitus avalikustati 5. aprillil kell 10:13 ning kell 18:00 samal päeval oldi sunnitud lisama juurde märge, et rohkem pakkumisi vastu ei võeta. Selle pakkumise raames teostati mõõtmisi seitse paralleelset mõõtmist, kusjuures valikusse jäi veel kuus objekti, kus võimalusel mõõtmisi veel läbi viiakse, aga seitsmest pakkumisest tuli keelduda, kuna pakutud piirkonnas oli juba mõõtmine kavandatud.

Esimesed mõõtmised viidi läbi ühe mõõteseadmega, algselt SN0011-ga (mõõtepunktid 2, 6) ja seejärel SN0024-ga (mõõtepunkt 9). Samaaegseid mõõtmisi eluruumis ja keldris viidi läbi mõõtepunktides 1, 3, 4, 7, 8, 10, 12, 13. Mõõtepunktis 5 viidi mõõtmisi läbi ilma keldrita hoone elutoas ja vett täis keldriga saunaruumis, mõõtepunktis 11 keldrit ei olnud ning keldri asemel viidi mõõtmised läbi garaazis, mida mõõteperioodil ei kasutatud sihtotstarbeliselt. Kuna ilmateenistuse kodulehel õhurõhuandmed on iga täistunni kohta, siis mõõtmistulemused nihutati lähima täistunnini ehk mõõtetulemused võivad olla õhurõhuga kuni pool tundi nihkes.

Mõõtetulemuste analüüsimisel jäeti arvestamata esimene mõõtetulemus ning mõningatel juhtudel jäeti arvestamata rohkem mõõtepunkte, kui oli võimalik, et esialgne radoonisisalduse suurem muutus oli põhjustatud eelmises mõõtepunktis seadmesse difundeerunud õhus leiduva

¹ <https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/tunniandmed/>

radooni lagunemisest, kuna seadme mõõtekambrit ei ole võimalik tuulutada. Lisas 1 toodud andmetes mõõteperiood ei ühti mõõtmiste analüüsis kasutatud mõõtepunktide arvuga, keskmise standardhälbe (*standard deviation of mean*) arvutamisel on kasutatud arvutuste aluseks olnud mõõtetulemuste arvu. Määramatuse arvutamisel arvestati mõõteseadme määramatust ($\pm 10\%$ või $\pm 15 \text{ Bq/m}^3$) ning saadud mõõtetulemuste keskmist standardhälvet. Kõiki sobibaid mõõtetulemusi kokkuvõtavad andmed on välja toodud tabelites 4 ja 5. Radoonisisaldus keldrite õhus oli üldiselt ühe komakoha täpsusega täpselt korda suurem kui eluruumide õhus. Keldrite suurem radoonisisaldus on põhjustatud nende kehvemast õhuvahetusest ning asjaolust, et maapind kui põhiline radooni allikas ümbritseb keldrit, mistõttu seal akumulereub radoon. Ootuspäraselt oli keldrita elumajade esimese korruse ruumides radoonisisaldus kõrgem kui keldriga elumajade esimese korruse ruumides, kuna enamasti puuduvad õhu otseühendused keldri ning eluruumi vahel, mis võimaldaks radoonirikkamal õhul konvektsiooni mõjul ülespoole liikumist. Nende mõõtmiste korral tähendab see 2,2 kordset erinevust keldrita ja keldriga hoonete eluruumide radoonisisaldustes.

Tabel 4. Põlva radoonimõõtmise tulemused keldrites

Keldrid	Arv	Aritmeetiline keskmine	Standardhälve	Geomeetriline keskmine	Geomeetriline standardhälve
Kõik	12	219,8	149,9	182,4	1,78
Maa sees	11	229,7	153,1	190,8	1,83
Mäe sees	1	111,3			
Korterimaja (ei arvestata mõõtepunkti nr. 2)	5	304,1	200,4	246,7	1,97
Ühe- ja kahe-pereelamu	5	188,6	51,4	182,2	1,36

Tabel 5. Põlva radoonimõõtmiste tulemused eluruumides

Eluruumid	Arv	Aritmeetiline keskmine	Standardhälve	Geomeetriline keskmine	Geomeetriline standardhälve
Kõik	12	72,4	54,9	54,8	2,19
Keldriga	7	48,7	26,6	40,8	1,92
Keldrita	5	105,6	69,7	82,8	2,17
Korterimaja (mõõtepunkt nr, 2-ta ²)	4	60,8	23,4	56,6	1,07
Ühe- ja kahe-pereelamu (mõõtepunkt nr, 2-ga)	8	78,3	66,2	53,9	1,08
Ühe- ja kahe-pereelamu (mõõtepunkt nr, 2-ta)	7	61,9	51,1	45,0	1,09

² Mõõtepunkt nr 2: Ametlikult viidi mõõtmine läbi korterimajas, kuid antud korter omab eraldi sissepääsu väljast, lisaks sellele korterimaja koosneb kahest osast – üks mõisaaegne punastest tellistest paksu seinaga (70 cm) ja maakivist vundamendiga ning teine osa hiljem juurde ehitatud betoonist vundamendiga 2-korruselise osa. Vanas osas on 2 ühekorruselise korterit, mille all on kelder ning 1 kahekorruselise korter, kus ei ole keldrit all.

Samaaegsete mõõtmiste tulemusena (tabel 6) selgus mõningate eranditega, et seos keldrite ning eluruumide radoonisisalduse vahel on nõrk. Üldiselt ühes hoones, antud mõõteperioodil mõõdetud ruumide keskmiste radoonisisalduste ja mõõdetud maksimumide suhe (keldris ja eluruumis) jäävad samasse suurusjärku, kuid enamasti ruumis on perioodi keskmiste väärtuste suhe natukene kõrgem. Tabelis 6 olevaid korrelatsioone ning õhurõhu muutumise ulatusi võrreldes ei paista olevat otsesest seost keldris radoonisisalduse muutumise ning õhurõhu muutuste vahel. Mõõdetud radoonisisaldused olid üldiselt väikesed (10 % mõõtetulemusest oli väiksem tootja poolt lubatud minimaalsest 15 Bq/m³) ning mõõteperiood võrdlemisi lühike, mistõttu leitud korrelatsioonide väärtusi võib vaadelda väherepresentatiivsena.

Paralleelsed mõõtmised kortermaja keldris ja 1. korruse eluruumis viidi läbi kolmes mõõtepunktis (nr. 1, nr. 7, nr. 13). Nendest selgus, et keskmiselt (ja ka mediaanväärtuse poolest) on keldri radoonisisaldus 4,4 korda kõrgem 1. korruse eluruumi radoonisisaldusest. Kõigi kolme mõõtmise korral õhurõhu ja radoonisisalduse vaheline korrelatsiooni väärtus eluruumis oli negatiivne.

Tabel 6. Samaaegselt läbiviidud mõõtmisi iseloomustavad suurused

Mõõtmis- punkti number:	Omavaheline korrelatsioon	Korrelatsioon keldri Rn ja õhurõhu vahel	Korrelatsioon eluruumi Rn ja õhurõhu vahel	Keldri ja elu- ruumi keskmise Rn-sisalduse suhe	Maksimaalne mõõdetud Rn- sisaldus keldris	Maksimaalne mõõdetud Rn- sisaldus eluruumis	Maksimumide suhe	Õhurõhu maksimaalse ja minimaalse väärtuse vahe
Nr. 1	0,262	-0,561	-0,493	1,20	237,2	170,5	1,39	23,3
Nr. 3	-0,215	-0,714	0,242	1,09	258,8	208,6	1,24	8,5
Nr. 4	0,372	-0,265	0,102	9,18	306,4	63,0	4,86	17,4
Nr. 5 ³	0,609	-0,467	-0,546	3,28	89,5	87,8	1,02	7,4
Nr. 7	0,813	-0,860	-0,873	7,64	1752,8	154,5	11,34	19,2
Nr. 8	0,556	-0,933	-0,654	3,08	473,3	159,3	2,97	26,6
Nr. 10	0,377	-0,779	-0,289	19,77	320,3	31,5	10,17	22,5
Nr. 11 ⁴	-0,113	-0,172	-0,039	1,80	59,0	44,1	1,34	17,4
Nr. 12	-0,288	-0,521	0,275	1,68	198,2	102,3	1,94	3,4
Nr. 13	0,281	-0,175	-0,144	4,35	223,4	61,5	3,63	9,7
Ar. kesk	0,265	-0,545	-0,242	5,31	391,9	108,3	3,99	15,4
Mediaan	0,326	-0,541	-0,216	3,18	248,0	95,1	2,45	17,4

Ühe- ja kahepereelamutes (nr. 3, nr. 4, nr. 8, nr. 10, nr. 12) läbi viidud paralleelsete mõõtmiste põhjal selgus, et korrelatsioon õhurõhu ja keldri radoonisisalduse vahel asub tugeva ja keskmise vahepeal (aritmeetiline keskmine -0,64; mediaan -0,71). Eramajades korrelatsiooni väärtus eluruumi radoonisisalduse ja õhurõhu vahel muutub palju (aritmeetiline keskmine -0,07; mediaan 0,10) ning seega õhurõhk enamasti ei mõjuta eramajade eluruumides radoonisisaldust. See korrelatsiooni puudumine või varieerumine on ilmselt põhjustatud asjaolust, et eramajade

³ Keldri asemel viidi mõõtmised läbi kõrvalhoones asuva sauna eesruumis, mis pidi andma indikatsiooni maapinnast ekshaleeruva radooni kohta. Analüüsis kasutati keldri radooni kontsentratsiooni väärtusena eluruumi radooni kontsentratsiooni mõõtetulemust, kuna selle all ei asu keldrit ning eluruumi mõõtetulemusena tinglikult sauna eesruumi mõõtetulemusi, kuna selle all on kelder.

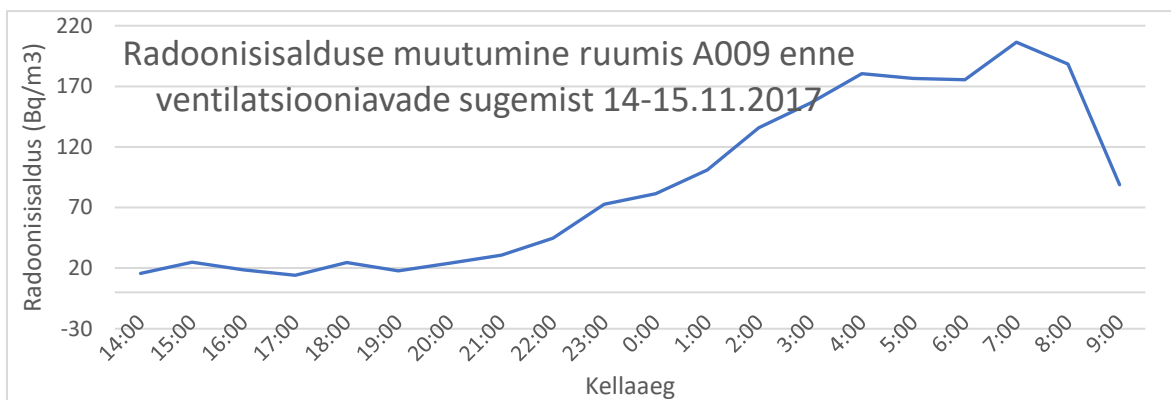
⁴ Keldri asemel on kasutatud garaaži mõõtetulemusi.

õhuvahetuse tagamiseks on kasutatud erinevaid ventilatsioonilahendusi ning ka majade planeeringud erinevad palju. Veel leiti, et eramajades varieerub suurtes piirides radoonisisalduste erinevus eluruumis ja keldris – aritmeetiline keskmine 7,0 ja mediaan 3,1. Seda kinnitab ka suurim mõõdetud erinevus keldri ning eluruumi radoonisisalduse vahel (19,8 korda), kuigi mõõteperioodi suurimad radoonisisalduse väärtused keldrites mõõdeti kortermajade keldris (nr. 6 – 990 Bq/m³ ja nr. 7 – 1753 Bq/m³).

4. Tartu Ülikooli Physicumis läbiviidud õhu radoonisisalduse mõõtmised

4.1. Radoonisisaldused keldriruumi A009 siseõhus peale ventilatsiooniavade sulgemist

Üks esimesi radoonisisalduse mõõtmisi toimus mõõteseadmega RadonEye RD200 (BLE) Tartu Ülikooli Physicumi keldriruumi A009 tagumises uksega eraldatud osas 14-15.11.2017, mil mõõdeti 20 tunni jooksul radoonisisalduse käiku keldriruumi siseõhus. Mõõtmisel kasutati seerianumbritega SN0011 ja SN0067 seadmeid. Aasta hiljem (4-12. september 2018) läbiviidud võrdlusmõõtmiste käigus leitud AlphaGUARD'i võrdlustulemuste suhtega läbijagatult ja peale andmete keskmistamist saadi joonisel 5 kujutatud päevane radoonisisalduse käik. Selle põhjal päeva maksimaalse radoonikontsentratsiooni väärtuseks kell 7:00 saadi 206 Bq/m³. Päeva minimaalne kontsentratsioon 14 Bq/m³ mõõdeti kell 17:00.

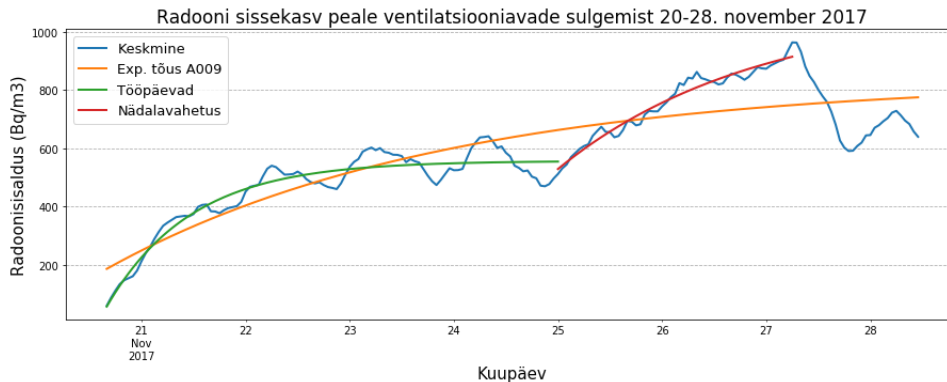


Joonis 5. Radoonisisalduse käik ruumis A009 enne ventilatsiooniavade sulgemist 20 h jooksul.

Radoonisisalduse kasvu uurimiseks otsustati 20. novembril 2017 ruumis A009 ventilatsiooniavad sulgeda. Radoonisisalduse mõõtmiseks õhus kasutati samu mõõteseadmeid, mida oli eelnevalt seal päevase käigu mõõtmiseks kasutatud. Joonisele 6 kantud radoonisisalduse kõver kujutab endast kahe mõõteseadmega mõõdetud väärtuse keskväärtust, mis on silutud kasutades 3-tunnise (keskasetusega) aknaga liikuvat keskmist programmis Jupyter Notebook. Esialgsed andmed olid ajavahemiku 0.11 kell 15:00 – 28.11 kell 12:00 kohta, kuid silutud andmed on ajavahemiku 20.11 kell 16:00 – 28.11 kell 11:00 kohta. Kuna esimeste mõõtmiste korral ei olnud algusaja täpne määramine oluline, siis erinevad need kellaajad natukene tegelikust kellaajast (kahe logifaili põhjal siin mõõtetulemus kell 13:00 väljendab tulemust, mis salvestati nutiseadmesse vahemikus 13:07 ... 13:27).

Ventilatsiooniavade sulgemise katse jooksul mõõdetud andmete silutumise järgne miinimumväärtus 59,4 Bq/m³ oli ajahetkel 20.11 kell 16:00 ning maksimumväärtus 964 Bq/m³ oli 27.22 kell 6:00, mis tähendab, et radoonisisaldus tõusis 4-5 korda võrreldes varasemalt mõõtetud tööpäeva maksimumiga. Kuna tööpäeva maksimum jäi suletud ventilatsiooni korral

umbes 650 Bq/m^3 juurde, radoonisisaldus jõudis enam-vähem stabiliseeruda enne nädalavahetust, siis ventilatsiooniavade sulgemine suurendas ruumis kolm korda radoonisisaldust. Selle kaheksa päevase mõõteperioodi jooksul selgus, et nädalavahetusel oli ventilatsioonirežiim teistsugune, mis soodustas keldriruumis radoonisisalduse kasvu. Päevase radooni kontsentratsioonide käigu olemasolu viitab sellele, et ka tööpäevade jooksul võis toimuda ventilatsioonirežiimide muutusi, põhjustades mõnekümne Bq/m^3 ulatuses radoonisisalduse vähenemisi päevasel ajal.

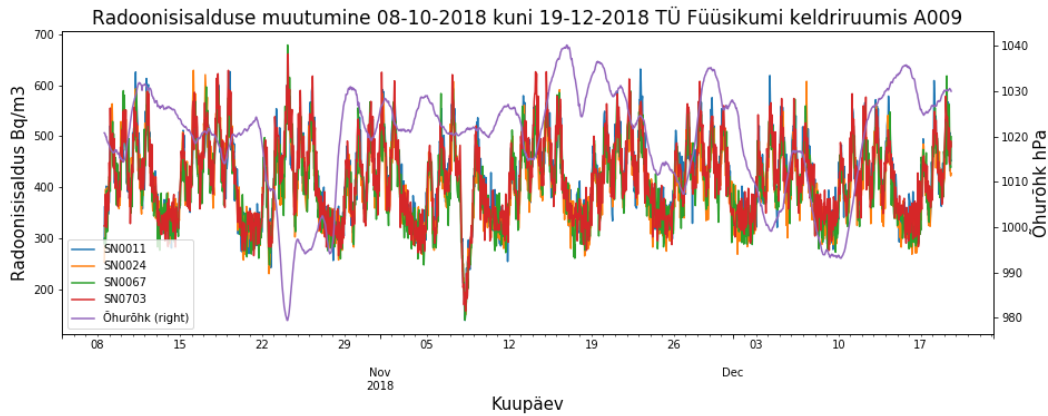


Joonis 6. Radoonisisalduse muutumine ruumis A009 perioodil 20-28. november 2017 koos eksponentsiaalsete lähenduskõveratega.

Kasutades *Jupyter Notebook*'i *Scipy* paketi *curve_fit* funktsiooni, leiti erinevate osade jaoks sobivad eksponentsiaalsed lähenduskõverad. Üldist kasvu (20.11 16:00 – 28.11 12:00) kirjeldab funktsioon $835,0 - 648,7 \cdot \exp(-0,013t)$, töönädalal (20.11 16:00 – 25.11 00:00) funktsioon $557,1 - 500,3 \cdot \exp(-0,051t)$ ja nädalavahetusel (25.11 00:00 – 27.11 06:00) funktsioon $1083,4 - 554,2 \cdot \exp(-0,022t)$, kus t on aeg sissekasvu algusest.

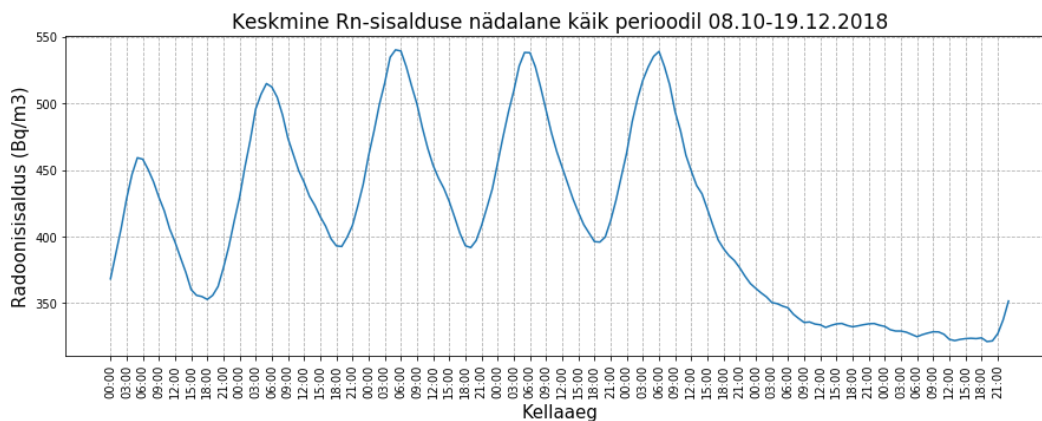
4.2. Radoonisisalduse muutumine ruumis A009 perioodil 8. okt-19. dets 2018

Uued mõõtmised Physicumis viidi läbi perioodil 8.10 – 19.12.2018 Physicumis keldrikorruse suletud ventilatsiooniavadega ruumi A009 tagumises uksega eraldatud osas. Radooni mõõtmisteks paigutati neli RadonEye RD200 (BLE) seadet 100 cm kõrgusele riulile kõrvuti. Nende mõõtmiste käigus ilmnis radoonisisalduse väärtuse nädalane rütm (joonis 7) ning lisaks üks siis seletamatu põhjusega radoonisisalduse järsk ja mittekorrapärase langus keldri õhus. Selle languse põhjuseks oli elektrikatkestus (majahalduri informatsioon), mistõttu ventilatsioon ei töötanud mõõtmisandmete põhjal umbes 1 päeva jooksul. Antud mõõteperioodi jäi ka üleminek talveajale (28.10.2018), mistõttu oldi sunnitud RadonEye' de mõõteandmetes üks rida kustuda. Kustutamist põhjustatud asjaolud, et aegrea (*pandas.date_range*) koostamise käigus automaatselt kirjutatakse igat täistundi ainult üks ning puudu oli ka vastava täistunni õhurõhu väärtus meteo.physic.ut.ee lehel andmete ülekirjutamise tõttu.



Joonis 7. Radoonisisalduse (algandmed) muutumine ruumis A009 perioodil 8. okt - 19. det 2018.

Analüüsi käigus RadonEye korrigeeriti mõõtetulemusi arvestades võrdlasmõõtmiste kesktel (04.09-12.09.2018) leitud RadonEye ja AlphaGUARD mõõtetulemuste suhteid. Detektorite ionisatsioonikambri väikese ruumala ning sellest tuleneva statistilise määramatuse tõttu kasutati mõõtetulemustes nelja mõõteseadme aritmeetiliselt keskmise mõõtetulemuse silumiseks liikuvat keskmist (keskasetusega kolmetunnine aken), mistõttu mõõtepunktide arv vähenes kahe võrra (1 mõõtepunkt algusest ja 1 lõpust). Lisaks sellele jäeti elektrikatkestusega seoses edasisel radoonisisalduse nädalase käigu leidmisel analüüsist välja periood 07.11.2018 20:00 – 09.11.2018 20:00. Kontsentratsioonide nädalane käik on välja toodud joonisel 8. Nädalase perioodi olemasolu kinnitas ka radoonisisalduse autokorrelatsiooni leidmine, kus korrelatsioonide väärtused, sõltuvalt nihkest, olid järgmised: 1 päev - 0.479, 1 nädal - 0.769, 2 nädalat - 0.759.



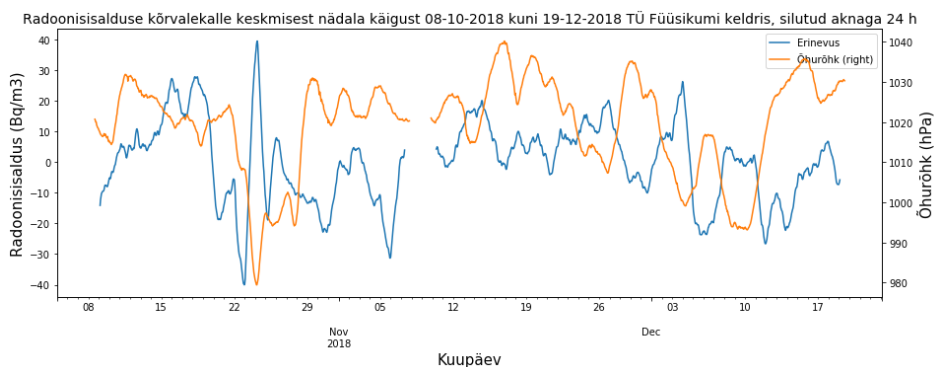
Joonis 8. Keskmise radoonisisalduse muutumise nädalane käik, keldriruumis A009, suletud ventilatsioonivadega, perioodil 08.10-19.12. 2018. Graafik on leitud kasutades kolmetunnise aknaga silutud keskmisi mõõtetulemusi, millest jäeti välja elektrikatkestusega seotud ajavahemik. Graafik algab esmaspäeval.

Mõõtetulemustes õhurõhust sõltuvuse leidmiseks lahutati tulemustest maha nädala keskmine radoonisisalduse muutumise käik ruumis A009 (õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vaheline korrelatsioon -0,116). Seejärel saadud tulemus siluti 24 tunnise aknaga ning saadi selgelt märgatav õhurõhu ja radoonisisalduse vaheline seos (joonis 9). Arvutus näitas siiski nõrgalt negatiivset korrelatsiooni (-0,128). Seejuures tasub märkida, et mõõteperioodi keskmine radoonisisalduse mõõtetulemuse silumisel 12 tunnise aknaga ja elektrikatkestust mitte

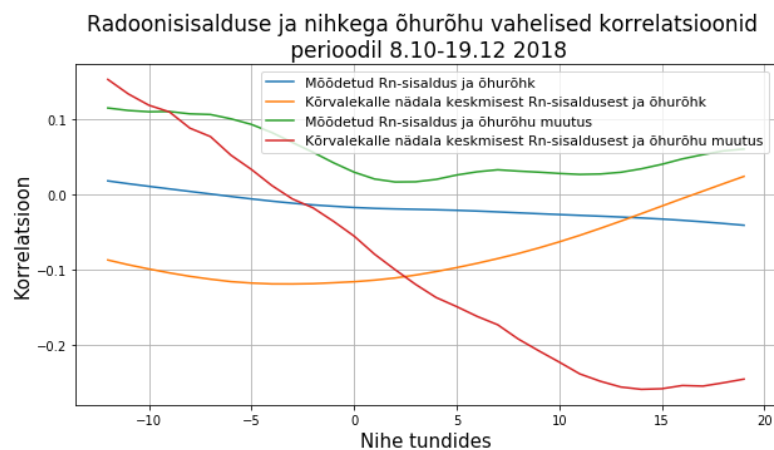
arvestades ning seejärel õhurõhu sõltuvust leidmisel korrelatsioon sisuliselt puudub on korrelatsioon peaaegu olematu (-0,019). Nädalase õhu radoonisisalduse keskmise käigu maha lahutamine mõõtetulemustest suurendas radoonisisalduse ja õhurõhu vahelise korrelatsiooni väärtust ligikaudu seitse korda.

3-tunnilise liikuva keskmisega silutud radoonisisalduse ja sellest maha lahutatud nädalase käigu andmeid kasutati nihetega korrelatsioonide leidmiseks. Analüüsist jäetu välja elektrikatkestuse periood (07.11 20:00 – 09.11 20:00).

Põlvas sooritatud mõõtmiste põhjal on korrelatsioon õhurõhu ja keldri radoonisisalduse vahel negatiivne ning seetõttu nihkega korrelatsioon analüüsides sai otsitud sellist nihet, mille korral on korrelatsioon võimalikult negatiivne. Saadud tulemused on toodud joonisel 10. Maksimalne leitud negatiivne korrelatsioon radoonisisalduse kõrvalekalde ja õhurõhu vahel on nihkega -3 tundi (korrelatsioon -0,1190). Uuritud vahemiku jooksul (-12...19 tundi) mõõdetud radoonisisalduse ja õhurõhu vahel lokaalset miinimumi ei ilmne, mistõttu leitud korrelatsioonide väärtusi võib vaadelda väherepresentatiivsena. Ootuspärasemad tulemused saadi kasutades õhurõhu asemel õhurõhu muutuse andmeid. Nii saadi minimaalseks korrelatsiooniks radoonisisalduse ja õhurõhu muutuse vahel nihke +2 tunni korral minimaalseks korrelatsiooniks +0,0170 ja radoonisisalduse mõõdetud muutumise kõrvalekalde radoonisisalduse väärtuste muutumise nädala keskmisest käigust ning õhurõhu muutuse vahel nihke +14 tunni korral: -0,260.



Joonis 9. 08.10-19.12.2018 radoonisisalduse kõrvalekalle nädala keskmisest radoonisisalduse käigust, andmed silutud aknaga 24 tundi.

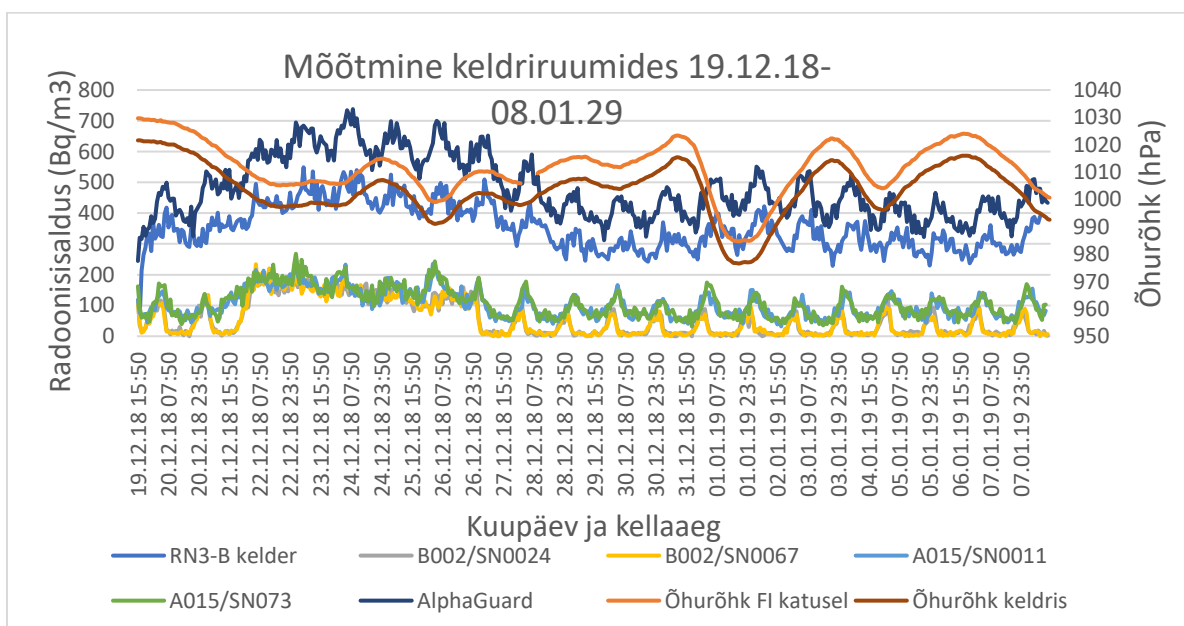


Joonis 10. Nihkega korrelatsioonid perioodi 08.10-19.12.2019 jaoks.

4.3. Mõõtmised Physicumi keldrikorruse ruumides (A015, A009, B002) perioodil 19. dets 2018 – 8. jaan 2019

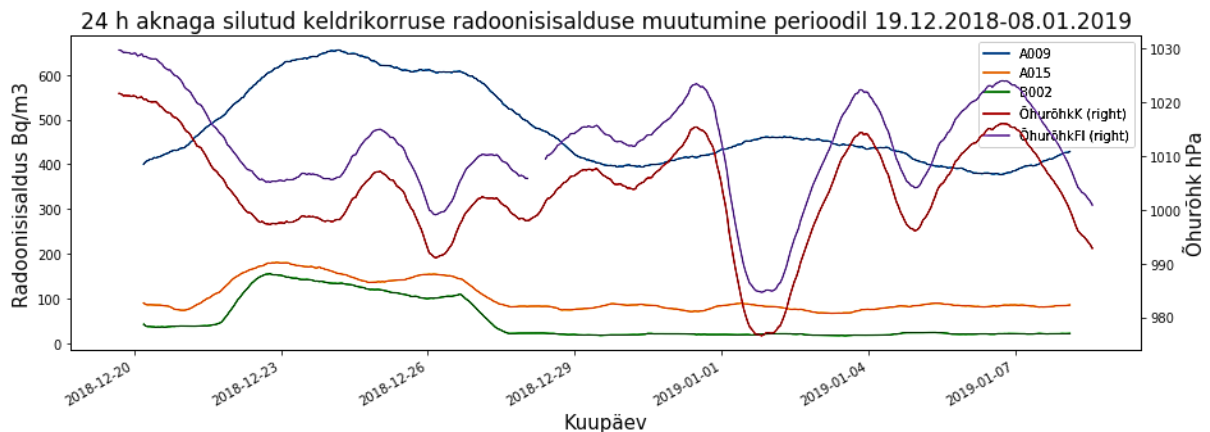
2018. aasta novembri teisel nädalal aset leidnud elektrikatkestuse tõttu tekkis soov uurida õhu radoonisisalduse käiku ventilatsiooni väljalülitamisel. Uurimiseks lülitati 2018. aasta jõulupühade ajal, mil Physicum eelduse kohaselt pidi tühi olema, ventilatsioon A ja B korpuses välja. Täpsemad andmed ventilatsiooni sisse- ja väljalülitamise aegade kohta läksid kahjuks kaduma, mistõttu on kasutatud ligikaudseid andmeid ventilatsiooni sisselülitamise ja väljalülitamise aegade kohta. Ventilatsioon lülitati välja peale 20. detsembril toimunud jõulupidu. Mõõtetulemusi vaadates sai hinnatud, et ventilatsioon lülitati välja 21. detsemberil 2018 umbes kella kuue paiku, vähemalt sellel kellaajal oli näha märgatavat mõju kõigi mõõdetavate ruumide õhu radoonisisaldusele ning ventilatsioon sai taas sisse lülitatud 27.12.2018 umbes kell 24. Alguses oli plaanis, et ventilatsioon on veel pikemalt väljas, kuid mingisuguse sündmuse tõttu lülitati ventilatsioon enne aastavahetust sisse tagasi. Ventilatsiooni logi säilib kahjuks ainult 1 kuu ning seetõttu hiljem neid andmeid kätte saada ei olnud võimalik.

Aastavahetusel mõõtmiste ajal oli kasutuses kuus radoonisisaldust registreerivat mõõteseadet. Ruumi B002, mis asub auditoriumi B103 all ning kus tavaliselt on ülerõhk, olid paigutatud seadmed RadonEye RD200 seerianumbritega SN0024 ja SN0067. Ruumi A015, milles põhiliselt hoiustati laudu ja toole, olid paigutatud seadmed RadonEye RD200 seerianumbritega SN0011 ja SN0703. Ruumi A009 tagumisse uksega eraldatud ossa, 100 cm kõrgusele riiulilauale, paigutati seadmed Radon Monitor RM3-B seerianumbriga 415 ning AlphaGUARD DF2000 seerianumbriga AG000115. Kõigis neis ruumides lülitati seadmed vooluvõrku täpselt kell 15:45, (seejuures seadme RadonEye lähtestamine võtab umbes 2 min töövalmis seadmiseks ning AlphaGUARD salvestab andmeid seadme sisemise kella järgi iga kümne minuti järel, täiskümnendal minutil (nt 13:00, 13:10, 13:20...). Seetõttu kasutati analüüsil FI ilmajaama andmeid alates kella 16:50-st ja ka RadonEye-ga registreeritud tulemuste ajaskaalat nihutati mõni minut.



Joonis 11. 19.12.2018 - 08.01.2019 mõõtetulemused.

Mõõtetulemused (ilma RadonEye-de ja RM3-B tulemusi korrigeerimata) on kantud joonisele 11. Õhurõhuandmed on saadud AlphaGUARD mõõtelogist („Õhurõhk kelder) ning füüsikahoone e-ilmajaama andmebaasist („Õhurõhk FI). FI õhurõhu andmetest valiti välja 50 min mõõtetulemused, kuid teadmata põhjustel on ilmajaama andmetes puudu andmed 28. detsembril perioodi 1:39 – 9:39 kohta. Hilisemal analüüsil (ruumide keskmine radoonikontsentratsioon) jäeti arvestamata vanema radoonisisalduse mõõtmisseadme RM3-B andmed, kuna see riist on teist tüüpi detektoriga (pooljuhtdetektor) ning suurema mõõtekambriga 1,2 liitrit. Seetõttu on siseõhu radoonisisalduste mõõtmistel mõõteinerts õhu radoonisisalduse kiirete muutuste mõõtmisel suhteliselt suurem.

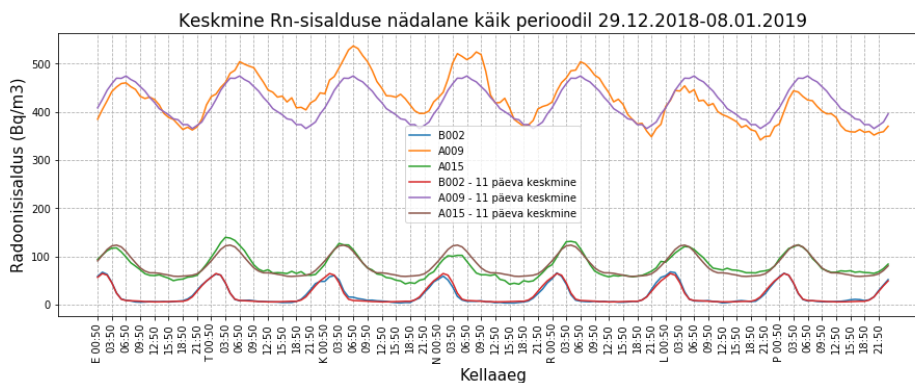


Joonis 12. 19.12.2018-08.01.2019 radoonisisalduse muutmine, silutud aknaga 24 tundi. "ÕhurõhkK" on AlphaGUARD'i poolt mõõdetud õhurõhk ning "ÕhurõhkFI" on FI ilmajaamas mõõdetud õhurõhk.

Nende mõõtmiste analüüsimisel kasutati radoonikontsentratsiooni päevase käigu maha lahutamiseks liikuva keskmisega (24-tunnine keskasetusega aken) silumist (joonis 12). Analüüsi tulemusena selgus, et kõige tugevam korrelatsioon on ruumide A009 ja A015 radoonisisalduste andmete vahel (0,976) ning natukene vähem korreleeruvad omavahel ruumide A009 ja B002 radoonisisalduste andmed (0,916). Ruumide A009 ja B002 õhu radoonisisalduste andmete vahel ilmneb samuti tugev korrelatsioon (0,885). Õhurõhu ja radoonisisalduse andmete vahel oli negatiivne nõrk või keskmine korrelatsioon (-0,220 ... -0,374), seejuures tugevaim oli korrelatsioon ruumis A009 ja hoone katusel mõõdetud õhurõhu väärtuste vahel ning nõrgim keldris mõõdetud õhurõhu ja ruumi B002 radoonisisalduse vahel.

Jättes korrelatsioonide arvutustest välja väljalülitatud ventilatsiooniga ajavahemiku perioodi (21.12 kell 5:50 – 27.12 kell 0:50), leiti ruumide radoonisisalduste andmete omavahelisteks korrelatsioonideks 0,144 (ruumid A009 ja A015), 0,432 (ruumid A009 ja B002) ning 0,511 (ruumid A015 ja B002). Sellega muutusid õhurõhu ja ruumide radoonisisalduste vahelised korrelatsioonid. Korrelatsioonid varieerusid seekord suuremates piirides: 0,186 ruumi B002 radooni sisalduse ja õhurõhu (nii keldris kui ka katusel mõõdetu) vahel; -0,152 ruumi A015 radoonisisalduse ja keldris mõõdetud õhurõhu vahel ja -0,423 ruumi A009 ning samas ruumis mõõdetud õhurõhu vahel. Ruumide omavaheliste korrelatsioonide erinevus toob välja tõsiasja, et korralikult toimiva ventilatsiooni (A015 ja B002) korral on mõõdetud radoonisisalduse käigud sarnasemad kui seda on suletud ventilatsioonivahuga ja sama ventilatsioonirežiimiga ruumide (A009 ja A015) radoonisisalduse käigud.

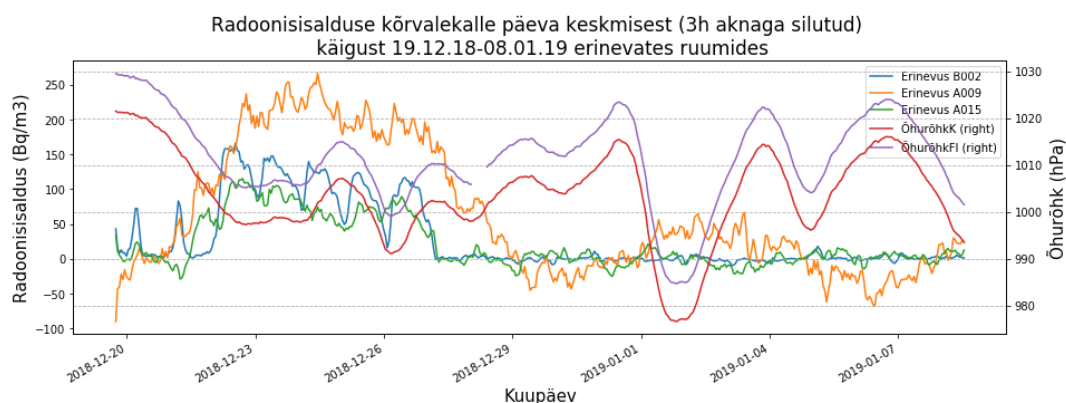
Alates 29.12.2018 kell 00:50-st leiti 3-tunnise keskasetusega liikuva keskmise aknaga silutud mõõtetulemuste põhjal keskmine radoonisisalduse muutumine päeva ja nädala lõikes. Algusaeg oli valitud selliselt, et graafiku järgi enam mingit olulist mõju jõulupühade ajal läbi viidud ventilatsiooni välja lülitamise katse radoonisisalduse tulemustele ei omanud, mis tähendab et radoonisisalduse loomulik päevane/nädalane käik oli taastunud. Tulemused kanti joonisele 13. Autokorrelatsioonid selle perioodi jaoks olid järgmised: nihke 1 päev korral ruumis A009 0,800, ruumis A015 0,834, ruumis B002 0,965 ja nihke 1 nädal korral 0,932, ruumis A015 0,873, ruumis B002 0,964. Autokorrelatsioonide järgi võiks eelistada nädalast käiku erinevate päeva käikudega, kuid siiski korrelatsiooni erinevused on võrdlemisi väikesed. Keskmise päevase (11 päeva keskmine) radooni kontsentratsiooni käigu suur erinevus teisipäevast neljapäevani on suuremalt jaolt põhjustatud sellest, et selles perioodis oli saadud ainult üks mõõtetulemus, ehk tegelikult mingit keskmistamist ei toimunud. Lisaks sellele võis olla mõju avaldada ka õhurõhu langus, kuna esmaspäevast (31.12.18) kuni neljapäevani (03.01.19) oli õhurõhk uuritava perioodi keskmisest madalam, toimus suur õhurõhu langus: kuni 40 hPa ulatuses (1023,4 hPa-lt 984,7 hPa-ni).



Joonis 13. Keskmine radoonisisalduse muutumine keldrikorruse ruumide õhus B002, A009, A015 perioodil 29.12.18-08.01.19. Teisipäev kella 13.50st kuni reede kella 23.50 keskmine nädalapäeva radoonisisalduse arvutamisel mingit keskmistamist läbi ei viidud.

Nende 11 päeva järgi leitud keskmine radoonisisalduse käik varieerus (teatud kellaaja maksimaalse ja minimaalse väärtuse erinevuse suhe keskmisesse sama ajahetke radoonisisaldusse) suurtes piirides: B002 – 13,7 % ... 109,8 %; A009 – 4,0 % ... 25,9%; A015 – 11,9 % ... 47,2 %. Varieeruvus oli seda suurem, mida väiksem oli keskmine radoonisisaldus ruumis ning seega oli tegemist pigem statistilise mõjuga.

Järgnevas analüüsis osas lahutati 11 päeva keskmine päevane käik kolmetunnise liikuva keskmisega silutud radoonisisalduse käigust maha (joonis 14). Nende andmete põhjal leitud korrelatsioonid on toodud välja tabelis 7. Uurides ajaperioodi alates 29.12 00:50, mil enam ventilatsiooni välja lülitamise mõju mõõtetulemustes näha ei olnud, saadi korrelatsioonid keldris mõõdetud õhurõhu ja ruumide radoonisisalduse vahel kõrvalekalde andmete põhjal järgmised: -0,105 ruumis B002, -0,624 ruumis A009 ja -0,176 ruumis A015.



Joonis 14. Radoonisisalduste kõrvalekalle päevasesest käigust perioodil 19.12.2018-08.01.2019.

Tabel 7. Kõrvalekalde andmete (kolmetunnise liikuva keskmise aknaga silutud mõõtmistulemustest maha lahutatud päevane käik) põhjal leitud korrelatsioonid

	Erinevus B002	Erinevus A009	Erinevus A015	ÕhurõhkK	ÕhurõhkFI
Erinevus B002	1.000000	0.840261	0.886476	-0.195120	-0.201316
Erinevus A009	0.840261	1.000000	0.837066	-0.385675	-0.386016
Erinevus A015	0.886476	0.837066	1.000000	-0.282592	-0.287122
ÕhurõhkK	-0.195120	-0.385675	-0.282592	1.000000	0.999966
ÕhurõhkFI	-0.201316	-0.386016	-0.287122	0.999966	1.000000

Korrelatsioonid ajalise nihkega õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahel leiti AlphaGuardi-iga mõõdetud õhurõhu andmete põhjal. Radoonisisalduse kõrvalekalde andmetena kasutati 3-tunnise aknaga silutud radoonisisalduse erinevust päevase radoonisisalduse muutumise käigust. Nende andmete põhjal saadi järgmised ajalise nihkega korrelatsioonid õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahel: -0,205 nihkega +4 h ruumis B002; -0,296 nihkega -5 h ruumis A015; -0,386 nihkega 0 h ruumis A009. Radoonisisalduse jaoks olid vastavad suhted järgmised: -0,187 nihkega +2 h ruumis B002; -0,266 nihkega -4 h ruumis A015; -0,374 nihkega 1 h ruumis A009.

Kolmetunnise liikuva keskmise aknaga silutud mõõtetulemustest päevase käigu maha lahutamisel ja tulemusi 24-tunnise aknaga liikuva keskmise aknaga silumisel saadi järgmised korrelatsioonid: -0,221 nihkega +1 tundi ruumis B002, -0,294 nihkega -4 tundi ruumis A015, -0,370 nihkega +1 tund ruumis A009. Kasutades päevase käigu maha lahutamiseks mõõtetulemuste silumist 24-tunnise aknaga liikuvat, saadi minimaalsed korrelatsioonid järgmiste nihetega: -0,220 nihkega +1 tund ruumis B002, -0,294 nihkega -4 tundi ruumis A015, -0,372 nihkega +1 tund ruumis A009 ning seega tulemused tulid väga sarnased 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud kõrvalekalde andmetega.

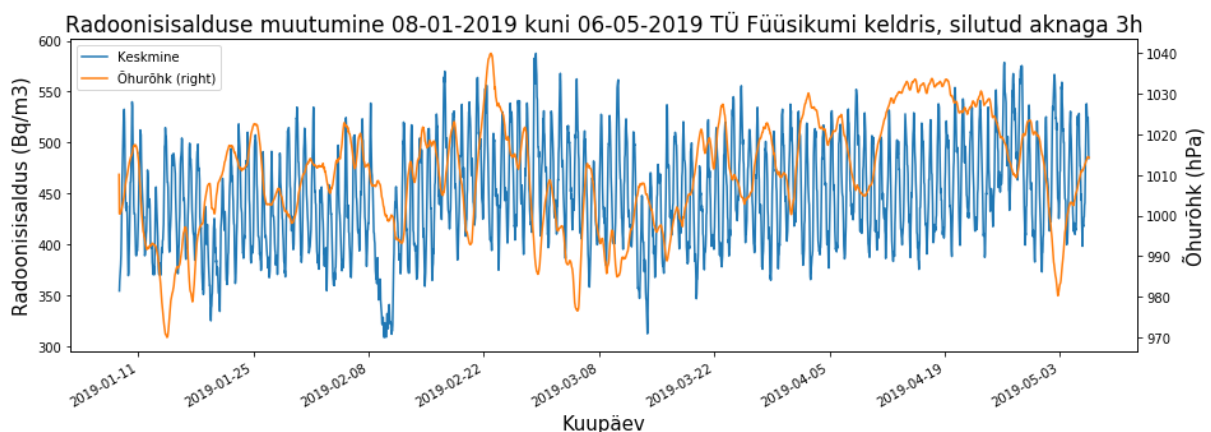
Kuna ventilatsiooni välja lülitamine toimus enam-vähem samaaegselt õhurõhu langusega, siis uuriti korrelatsioone radoonisisalduse kõrvalekalde ja ajalise nihkega õhurõhu vahel peale ventilatsiooni tavarežiimile lülitamist (alates 29.12.2018 00:50-st). Esialgsete kõrvalekalde andmete põhjal leitud korrelatsiooni miinimumid olid järgmised: -0,116 nihkega +3 tundi ruumis B002, -0,276 nihkega -6 tundi ruumis A015, -0,624 nihkega +0 tundi ruumis A009.

Seejärel 24-tunnise liikuva keskmisega silutud andmete põhjal korrelatsiooni väärtused natukene muutusid: -0,116 nihkega +2 tundi ruumis B002, -0,315 nihkega -8 tundi ruumis A015, -0,668 nihkega +0 tundi ruumis A009.

4.4. Mõõtmise ruumis A009 perioodil 8. jaan – 6. mai 2019

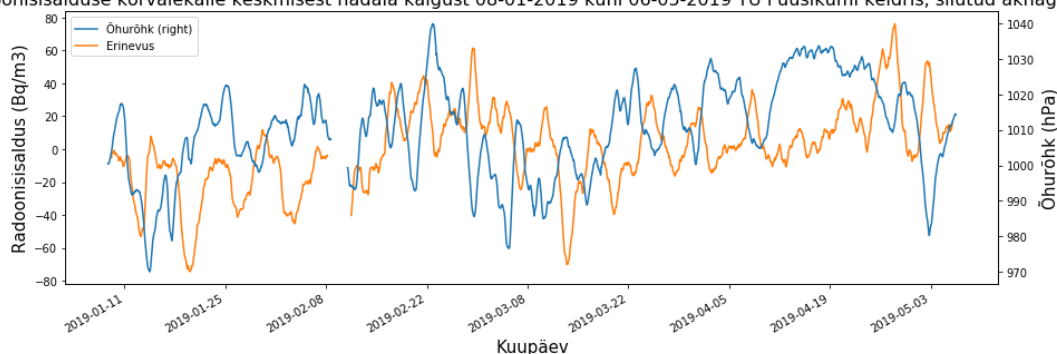
Edasised mõõtmised Physicumi keldriruumis A009 olid jätkuks eelmise perioodi mõõtmistele, kuid nüüd kasutati RadonEye RD200 (BLE)-sid seerianumbritega SN0011 ja SN0703. Mõõteperioodi sisse jäi ka üleminek suveajale (31. märts 2019), mille tõttu mõõtmisandmetesse tekitati valeandmed (radoonisisaldus ja õhurõhk) ning hiljem aegreast eemaldati valeandmetega rida (31. märts 2018 kell 3:00). Jätkuvalt mõlemad seadmed asusid 100 cm kõrgusel riivil.

Joonisele 15 kanti AlphaGUARD'i tulemuste alusel leitud parandeid arvestav ning kahe mõõteseadme aritmeetilist keskmist liikuva keskmisega (aknaga 3 tundi) silutud kõverad. Joonisel on näha perioodil 08.02.2019 – 10.02.2019 radoonisisalduste väärtuste käigu kõrvalekallet tavapärasest käigust. Hilisemates analüüsides (nt päeva keskmise käigu leidmisel) jäeti see periood välja (täpsemalt ajavahemikus R 17:00 – P 23:00). Radoonisisalduse kõrvalekalde leidmiseks nädala keskmisest radoonisisalduse käigust lahutati maha nädala käik, kus kõigi päevade andmed käituvad sarnaselt. Sellel perioodil nädalapäevade radoonisisalduse käik ruumi A009 õhus varieerus vähesel määral (<5%, täpsemalt 2,1%...4,4%). Kinnitust sarnase päevase radoonisisalduse käigu kohta andsid ka autokorrelatsiooni tulemused: nihe 1 päev – korrelatsioon 0,826, nihe 1 nädal – korrelatsioon 0,744, nihe 2 nädalat - korrelatsioon 0,689. Varasemal perioodil (oktoober-detsember) oli nädalase nihke korral korrelatsioon päevase nihke autokorrelatsioonist suurem. Joonisele 16 kanti 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud radoonisisalduse erinevus päevasest käigust. Pealevaatamisel võib joonisel märgata negatiivset korrelatsiooni õhurõhuga, kuid arvutus seda ei kinnita (korrelatsiooniarvutus Jupyteris andis väärtuseks 0,041). Enam-vähem sama korrelatsiooni (0,051) annab ka radoonisisalduse päevase käigu maha lahutamine 24-tunnise liikuva keskmise akna abil.



Joonis 15. Radoonisisalduse muutumine ruumis A009 perioodil 08.01-06.05.2018, tulemusi silutud kolmetunnise aknaga.

Radoonisisalduse kõrvalekalle keskmisest nädala käigust 08-01-2019 kuni 06-05-2019 TÜ Füüsikumi keldris, silutud aknaga 24h

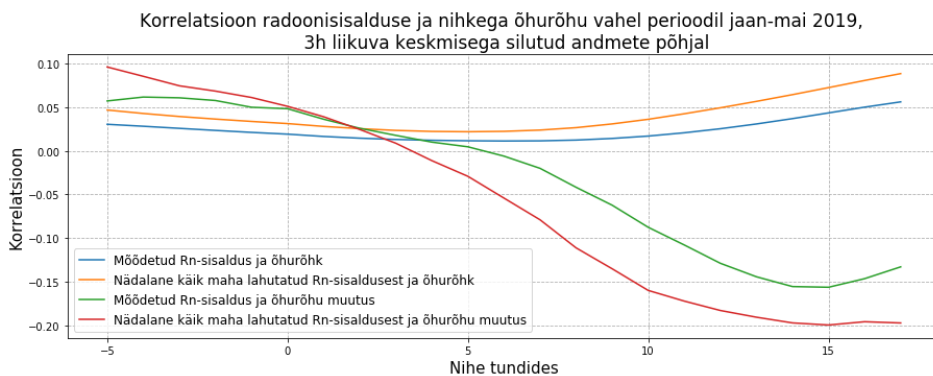


Joonis 16. Radoonisisalduse kõrvalekalle keskmisest nädala käigust perioodil 08.01-06.05.2019, kõrvalekalde tulemusi on silutud liikuva keskmisega, mille aken 24 tundi.

Nihkega korrelatsioonide (joonis 17) leidmine õhurõhuga andis järgmised tulemused:

- kolmetunnise liikuva keskmise aknaga silutud radoonisisalduse (va anomaalia veebruaris) ja e-ilmajaama mõõdetud õhurõhu vahel oli minimaalne (lokaalne miinimum) korrelatsioon +0,011 nihkega +6 tundi, samadest tulemustest päevase käigu maha lahtutamisel tuli erinevuse ja õhurõhu vaheliseks minimaalseks korrelatsiooniks +0,022 nihkega +5 tundi;
- 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud mõõtetulemuste põhjal tuli korrelatsioon +0,047 nihkega +4 tundi ning 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud kõrvalekalde tulemuste ja õhurõhu vahel oli minimaalne korrelatsioon +0,040 nihkega +2 tundi.

Seejuures leides korrelatsioone radoonisisalduse või selle kõrvalekalde (ilma 24-tunnise aknaga silumata) ning õhurõhu muutuse vahel, saadi nõrgalt negatiivsed korrelatsiooni väärtused (-0,157 ja -0,199) mõlemad nihkega +15 tundi. Peale kõrvalekalde tulemuste silumist õhurõhu muutuse ja uuritavate radoonisisalduse vahele olev korrelatsiooni väärtus jätkas kahanemist ka peale 19 tunnist nihet (suuremat nihet ei uurinud).

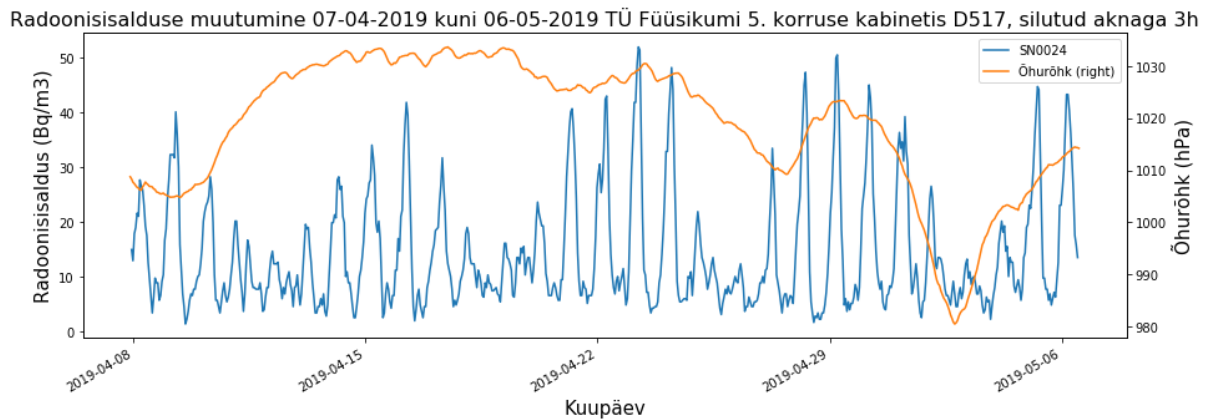


Joonis 17. Nihkega korrelatsioon õhurõhu ja radoonisisalduse vahel perioodil 08.01-06.05.2019.

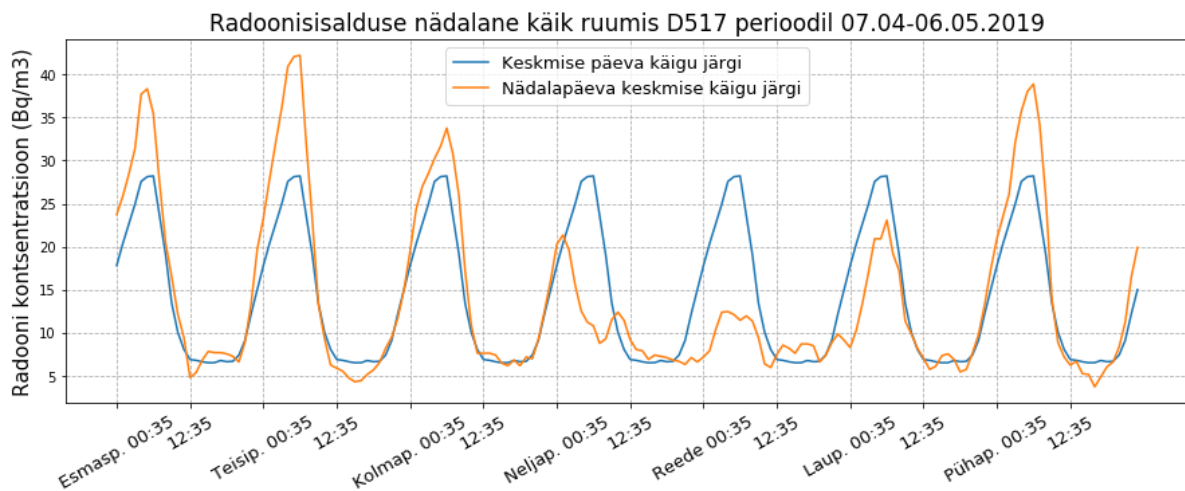
4.5. Mõõtmine ruumis D517 perioodil 7. aprill – 6. mai 2019

Physicumi 5-korruse kabineti D517 radoonisisalduse muutumist mõõdeti perioodil 07.04.2019 21:35 - 06.05.2019 12:35. Mõõtmisteks kasutati seerianumbriga SN0024 seadet RadonEye ning tulemused kanti joonisele 18. Graafikule kantud andmed on läbinud liikuva keskmisega

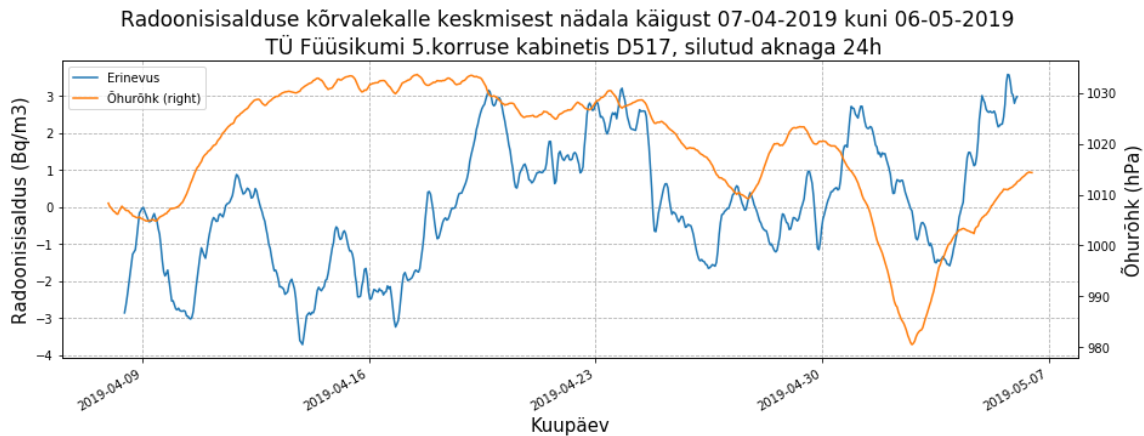
(aken kolm tundi) silumise ning lisaks väärtused jagati läbi AlphaGUARDIiga võrdlusmõõtmistel saadud parandussuhtega SN0024/AlphaGUARD. Graafikul on selgelt näha nädalane rütm, seejuures omavad nädala sees olevad nädalapäevad erinevat radoonisisalduse väärtuse amplituudi. Nädalast käiku kinnitavad ka autokorrelatsiooni tulemused: nihe 1 päev - korrelatsioon 0,745; nihe 1 nädal – korrelatsioon 0,877; nihe 2 nädalat – korrelatsioon 0,868. See kinnitab vajadust radoonisisalduse nädala keskmise käigu leidmisel arvestada nädalapäevi erisugusena (joonis 19). Nädalapäeva maksimaalne tunni varieeruvus keskmise päeva käigu sama kellaaja radoonisisalduse suhtes muutus vahemikus 22,6 % ... 107,4 %.



Joonis 18. Mõõtmised Physicumis 5. korruse ruumis D517 perioodil 07.04 - 06.05.2019. Mõõtetulemuste silumiseks kasutati keskasetusega kolmetunnist liikuvat keskmist.



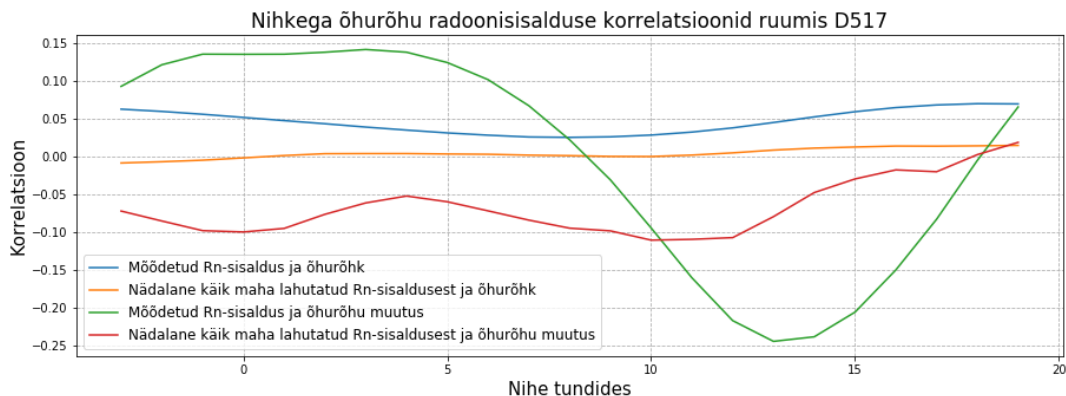
Joonis 19. Radoonisisalduse nädalane ja päevane käik ruumis D517.



Joonis 20. Radoonisisalduse kõrvalekalle keskmisest nädala käigust 07-04-2019 kuni 06-05-2019 TÜ FI 5.korruse kabinetis D517, silutud 24-tunnise liikuva keskmise aknaga.

Korrelatsioone analüüsid saadi radoonisisalduse ning õhurõhu vaheliseks korrelatsiooniks 0,052 ning peale radoonisisalduse nädalase käigu maha lahutamist muutus korrelatsioon negatiivseks (-0,002), mis siiski põhimõtteliselt tähendab sõltuvuse puudumist. Korrelatsiooni suurendas negatiivses suunas (-0,041ni) lahutustehte tulemuste silumine 24 tunnise aknaga (joonis 20). Silutud erinevuse amplituud (-3,7 ... 3,6 Bq/m³) on võrdlemisi suur võrreldes kolmetunnise aknaga silutud mõõtetulemuste amplituudi (1,4 ... 51,9 Bq/m³) ja keskmise radoonisisaldusega (14,3 Bq/m³), mis ühtlasi on samas suurusjärgus mõõteseadme minimaalse määramatusega (15 Bq/m³).

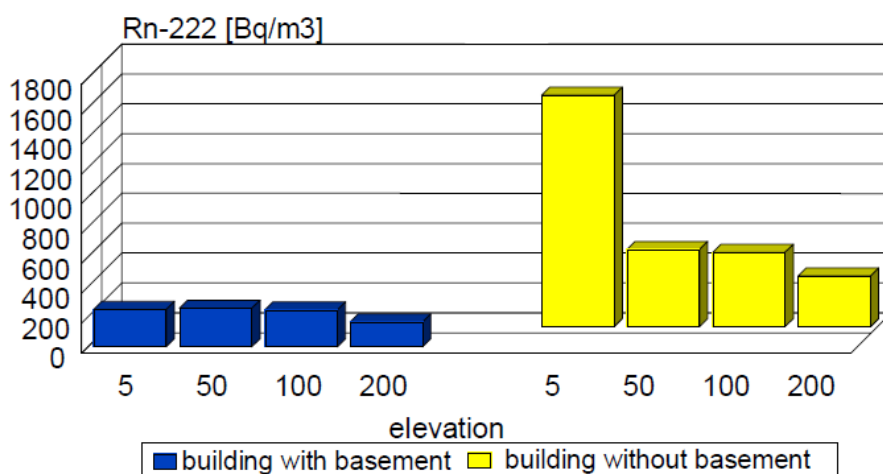
Nihkega korrelatsiooni (lokaalne) miinimum mõõdetud radoonisisalduse (3-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud) ja õhurõhu vahel oli 0,0253 nihke +8 tundi korral ning kõrvalekalde ja õhurõhu vahel -0,00002 nihke +10 tundi korral. Leides korrelatsioone õhurõhu muutuse ja radoonisisaldus muutumist kirjeldava suurusega, saadi järgmised korrelatsioonid: radoonisisalduse ja õhurõhu muutus vahel -0,244 nihke +13 tundi korral; kõrvalekalde ja õhurõhumuutuse minimaalne korrelatsioon -0,100 nihke 0 tundi korral või -0,110 nihke +10 tundi korral. (joonis 21). Antud juhul õhurõhu ja radoonisisalduse vahelise nihkega korrelatsiooni kõverad võisid omada mitmeid lokaalseid miinimume, kuna nädalase käigu (päevad erisugused) maha lahutamisel olid andmed ikka üpris mürased madalate radoonisisalduste ning lühikese keskmistamisperioodi (neli nädalat) tõttu, kõrvalekande andmete silumine 24-tunnise liikuva keskmisega jättis alles perioodilise käitumise (joonis 20).



Joonis 21. Nihkega korrelatsioonid õhurõhu ja radoonisisalduse vahel ruumis D517 perioodil 07.04-06.05.2019.

4.6. Mõõtmine ruumis A009 erinevatel kõrgustel, perioodil 6. mai – 20. mai 2019

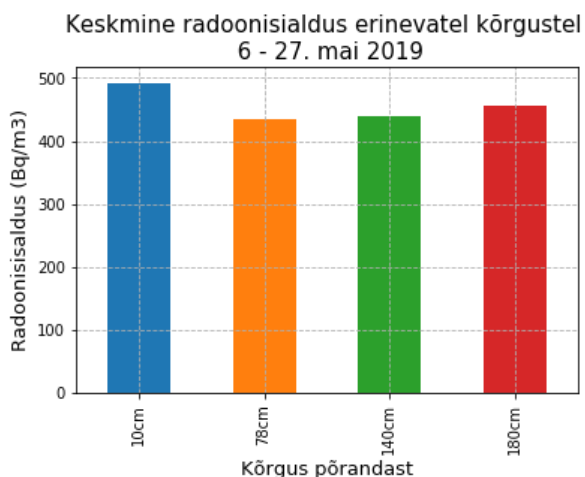
Erinevatel kõrgustel mõõtmisel oli eelkõige 1 eesmärk – kontrollida, kas saadakse sarnane tulemus kui Poola lasteaias radoonisisalduse mõõtmiseks mõeldud passiivdetektoritega läbi viidud mõõtmiste käigus, kus mõõtetulemused keldrita ruumis eriti ei erinenud kõrgusel 50 ja 100 cm ning kõrgusel 200 cm oli mõõtetulemus umbes 1/3 võrra väiksem kõrgusel 50-100 cm mõõdetud radoonisisalduse mõõtmistulemustest (joonis 22) [12]. Samuti annaks erinevatel kõrgustel mõõdetud radooni kontsentratsioonide väärtused indikatsiooni keldripõrandast võimaliku radooni ekshalatsiooni kohta. Poola saadud mõõtetulemus kinnitas, et Põlva mõõtmistel ei sõltu mõõtetulemus RadonEye kõrgusest põranda suhtes. Põlvas tehtud mõõtmiste korral olid detektorid hinnanguliselt paigutatud 0,5... 1,5 m kõrgusele, üldiselt aga kuni 1 m kõrgusele. RAM 2016 soovitusel tuleks detektor paigutada 1-2 m kõrgusele [10].



Joonis 22. Radoonisisalduse muutumine seoses detektori kõrgusest maapinnast ning hoone ehitusest [12].

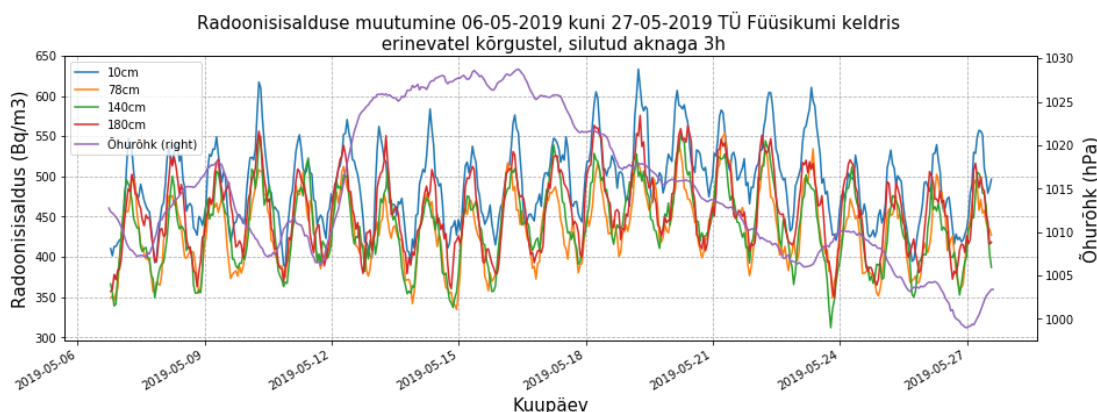
Radooni kontsentratsioonide mõõtmiseks keldri õhus erinevatel kõrgustel kasutati nelja RadonEye seadet, mis asetati keldri põrandast vastavalt kõrgusele 10 cm, 78 cm, 140 cm ja 180 cm. Nende mõõtmiste jaoks saadi andmed perioodi 06.05.2019 14:50 – 27.05.2019 14:50 kohta. Nende kolme nädala mõõtetulemused on kantud joonistele 23 (tulpdiaagramm) ja 24 (graafik). Leitud radoonisisaldused erinevatel kõrgustel olid järgmised: 10 cm – 492 Bq/m³, 78 cm – 435 Bq/m³, 140 cm – 440 Bq/m³ ja 180 cm – 457 Bq/m³. Aritmeetiliselt keskmine radoonisisaldus leiti 456 Bq/m³, seega maksimaalne varieeruvus keskväärtuse suhtes oli 12,6%. Varasem mõõtmine jaanuarist maini 100 cm kõrgusel andis keskväärtuseks 450 Bq/m³.

Selle mõõteperioodi andmetes (joonis 24) on näha ruumi A009 õhus radoonisisalduse päevane käik, seejuures päevad käituvad enam-vähem samamoodi. Kõige rohkem erineb radoonisisalduse käik kõrgusel 10 cm võrreldes teiste kõrgustega.



Joonis 23. Ruumi A009 õhu keskmine radoonisisaldus erinevatel kõrguste.

Autokorrelatsiooni tulemused erinevate nihete korral antud määdeperioodi jaoks on toodi välja tabelis 9. Kuna autokorrelatsioonid nihkega 1 päev on suurem kui nihkega 1 nädal, siis paremini kirjeldab radoonisisalduse muutumist erinevatel kõrgustel päevane käik. Nädalapäeva radoonisisaldus võrreldes keskmise päeva käiguga varieerus keskmiselt 6,3 %: kõrgusel 10 cm 1,9% ... 10,4 %; kõrgusel 78 cm 4,3 % ... 11,2 %; kõrgusel 140 cm 2,5 % ... 11,8 %; kõrgusel 180 cm 2,0 % ... 11,8 %.



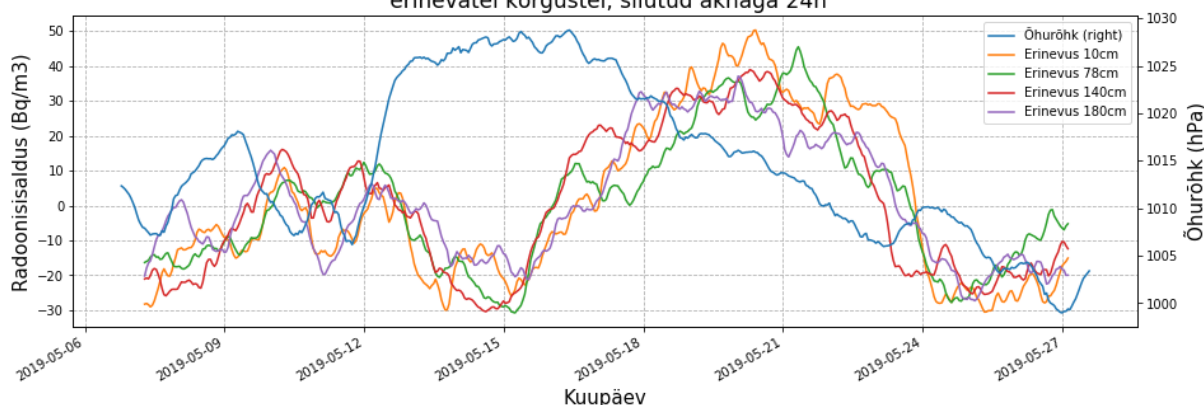
Joonis 24. Radoonisisalduse muutumine ruumis A009 erinevatel kõrgustel perioodil 6-27. mai 2019. Radoonisisalduse andmed on silutud kasutades 3-tunnise aknaga liikuvat keskmist.

Tabel 8. Autokorrelatsioonid erinevate nihetega erineva kõrgusega detektori radoonisisalduse määdetulemuste jaoks

	10 cm	78 cm	140 cm	180 cm
Nihe 1 päev	0,7421	0,8182	0,8294	0,8329
Nihe 1 nädal	0,4702	0,6488	0,6274	0,6627
Nihe 2 nädalat	0,5309	0,6720	0,6472	0,7635

Peale radoonisisaldusest (3-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud andmetest) päevase käigu maha lahutamist saadi kõrvalekalle keskmisest päevasest käigust, mis vajab veel täiendavat silumist. Järgnevas silumiseks kasutati kõrvalekalde andmete 24-tunnise aknaga liikuvat keskmist (joonis 25). Silumise mõju korrelatsioonile on näha tabelis 10 (A ja B).

Radoonisisalduse kõrvalekalde keskmisest nädala käigust 06-05-2019 kuni 27-05-2019 TÜ Füüsikumi keldris erinevatel kõrgustel, silutud aknaga 24h



Joonis 25. Radoonisisalduse kõrvalekalde päevasest käigust. Andmete silumiseks kasutati keskasetusega 24-tunnise aknaga liikuvat keskmist.

Kõrvalekalde andmete silumine suurendas märgatavalt erinevate kõrguste omavahelisi radoonisisalduse kõrvalekalde korrelatsioone. Silumine suurendas ka õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahelise korrelatsiooni absoluutväärtusi. Ainus negatiivne korrelatsioon õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahel oli kõrgusel 78 cm, kuid seegi korrelatsioon oli nullilähedane.

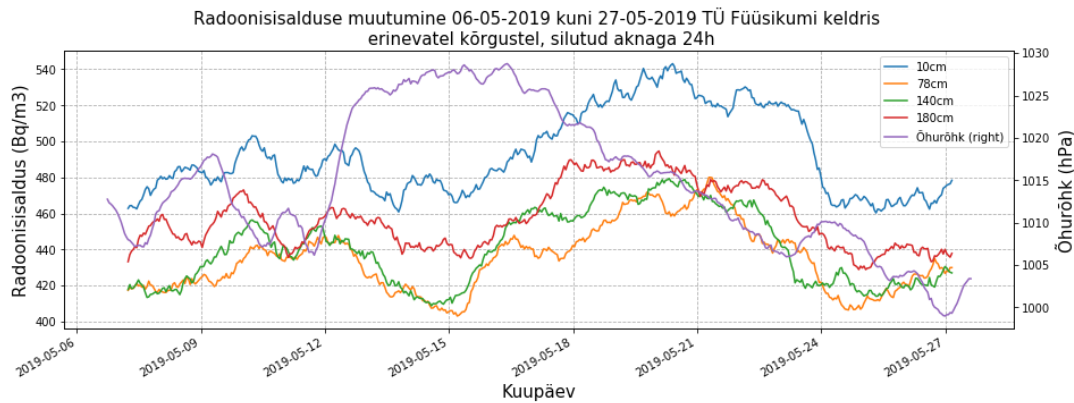
Tabel 9. Korrelatsioonid radoonisisalduse kõrvalekalde vahel erinevatel kõrgustel ning radoonisisalduse ja õhurõhu vahel. A: 3 h liikuva keskmise aknaga silutud mõõtetulemustest maha lahutatud päevase käigu andmete põhjal. B: 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud kõrvalekalde andmete põhjal

A	Õhurõhk	Erinevus 10cm	Erinevus 78cm	Erinevus 140cm	Erinevus 180cm
Õhurõhk	1.000000	0.032877	-0.039674	0.076039	0.103578
Erinevus 10cm	0.032877	1.000000	0.594993	0.585149	0.598043
Erinevus 78cm	-0.039674	0.594993	1.000000	0.659722	0.546191
Erinevus 140cm	0.076039	0.585149	0.659722	1.000000	0.627386
Erinevus 180cm	0.103578	0.598043	0.546191	0.627386	1.000000

B	Õhurõhk	Erinevus 10cm	Erinevus 78cm	Erinevus 140cm	Erinevus 180cm
Õhurõhk	1.000000	0.021093	-0.066260	0.086746	0.112025
Erinevus 10cm	0.021093	1.000000	0.882072	0.861893	0.914403
Erinevus 78cm	-0.066260	0.882072	1.000000	0.903732	0.821969
Erinevus 140cm	0.086746	0.861893	0.903732	1.000000	0.878812
Erinevus 180cm	0.112025	0.914403	0.821969	0.878812	1.000000

24-tunnise liikuva keskmise aknaga (joonis 26) eelnevalt kolmetunnise aknaga silutud radoonisisalduse andmete silumine parandab korrelatsioone, kusjuures kõverad on väga sarnased kõrvalekalde andmetele (erinev väärtus). Korrelatsioonid erineva silumisaknaga mõõtetulemuste ja õhurõhu vahel toodi välja tabelis 11. Silumine eelkõige suurendas kõrguste

radoonisisalduse vahelisi korrelatsioone, mõju õhurõhu korrelatsioonidele oli väike ning mõju polnud ühesugune (vähendas ja suurendas).

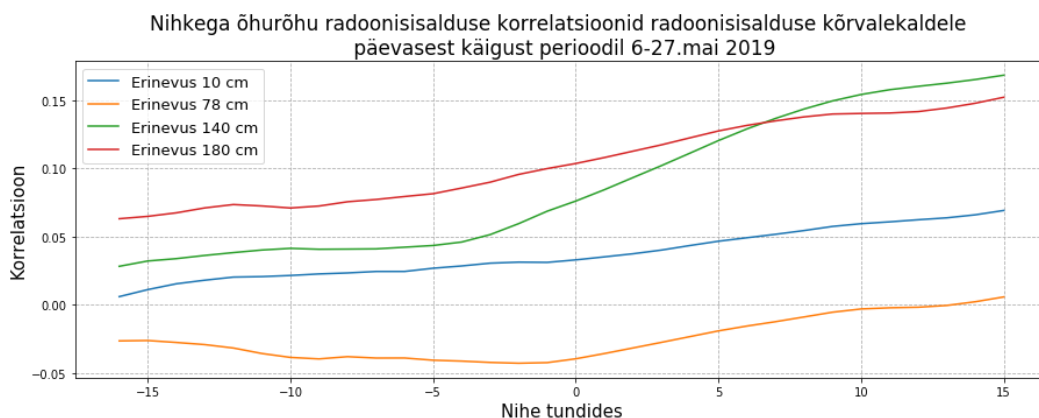


Joonis 26. 24-tunnise liikuva keskmise aknaga silutud radoonisisalduse käik keldris erinevatel kõrgustel.

Vabalt valitud võimalikus nihke vahemikus (-16...15 tundi) omas lokaalset miinimumi nihkega korrelatsioon õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahel (joonis 27) ainult kõrgusel 78 cm nihe -2 tundi – korrelatsioon -0,0429. Mitteoootuspäraselt käitus nihkega korrelatsioon mõõdetud radoonisisalduste ja õhurõhu vahel (joonis 28), kus antud nihkevahemikus omab korrelatsiooni sinusoidaalset muutumist. Korrelatsioonid on maksimaalsed nihke 0 h lähistel ja minimaalsed nihke ± 11 tunni lähistel.

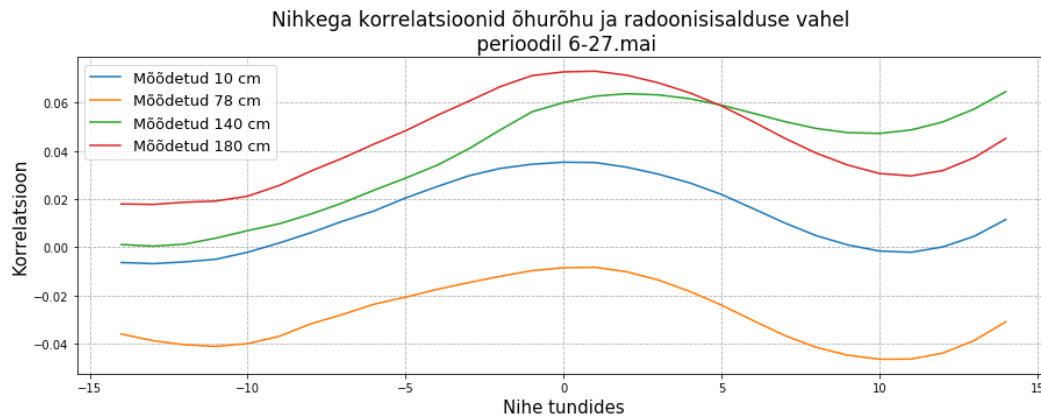
Tabel 10. A: Korrelatsioonid 3-tunnise keskasetusega liikuva keskmise abil silutud radoonisisalduse andmete ja õhurõhu vahel. B: Korrelatsioonid 24-tunnise keskasetusega liikuva keskmise abil silutud radoonisisalduse andmete ja õhurõhu vahel

A	10cm	78cm	140cm	180cm	Õhurõhk	B	10cm	78cm	140cm	180cm	Õhurõhk
10cm	1.000000	0.832884	0.828778	0.839550	0.035336	10cm	1.000000	0.878940	0.858998	0.910768	0.025859
78cm	0.832884	1.000000	0.879587	0.850944	-0.008455	78cm	0.878940	1.000000	0.900670	0.818349	-0.063101
140cm	0.828778	0.879587	1.000000	0.876537	0.060083	140cm	0.858998	0.900670	1.000000	0.875696	0.090530
180cm	0.839550	0.850944	0.876537	1.000000	0.072805	180cm	0.910768	0.818349	0.875696	1.000000	0.118016
Õhurõhk	0.035336	-0.008455	0.060083	0.072805	1.000000	Õhurõhk	0.025859	-0.063101	0.090530	0.118016	1.000000

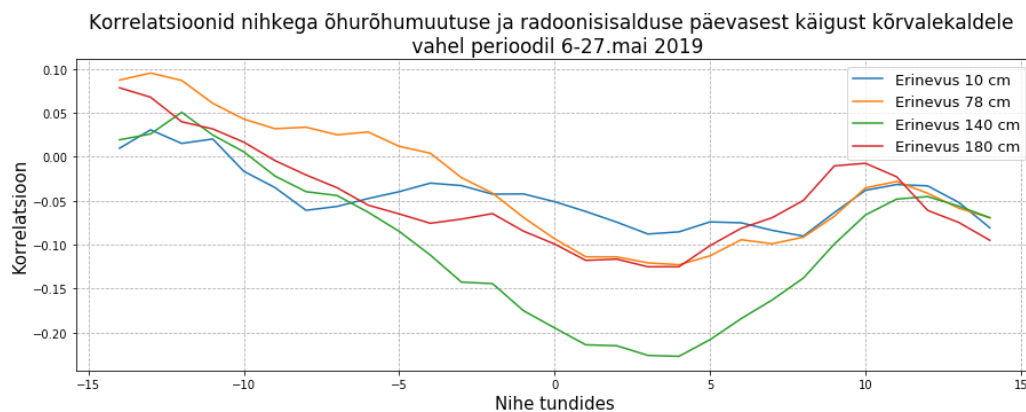


Joonis 27. Korrelatsioon radoonisisalduse päevasest käigust kõrvalekalde ja nihkega õhurõhu vahel.

Ootuspärasema nihkega korrelatsioonide graafiku (joonis 29) andis korrelatsioonide arvutamine, kui õhurõhu asemel kasutati õhurõhu muutuse andmeid. Nii saadi järgmised korrelatsioonid päevasest käigust radoonisisalduse kõrvalekalde ja õhurõhu muutuse vahel: 10 cm kõrgusel -0,090 nihke +8 tundi korral, kõrgusel 78 cm -0,123 nihke +4 tundi korral, kõrgusel 140 cm -0,227 nihke +4 tundi korral ning 180 cm kõrgusel -0,125 nihke +3 tundi korral.



Joonis 28. Keskmisest radoonisisalduse ja nihkega õhurõhu vaheline korrelatsioon perioodi 6-27. mai 2019.



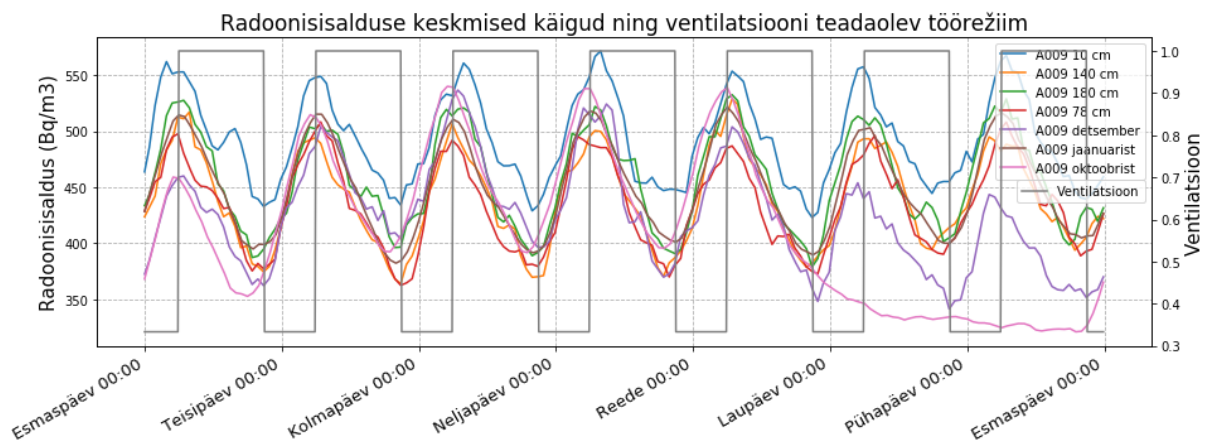
Joonis 29. Keskmisest radoonisisalduse päevasest käigust kõrvalekalde ja nihkega õhurõhu muutuse vaheline korrelatsioon perioodil 6-27. mai.

5. Ventilatsioon ja Physicumi siseõhu radoonisisalduse käitumine

5.1. Nädalane radoonisisalduse muutumine

Eelmiste analüüsitud mõõtmisandmete (peatükid 4.2. - 4.6.) nädalased ja päevased käigud salvestati .txt failina. Keskmiste käikude ühe tunni andmed olid toodud erineva kellaaja kohta: täistund ning 35 või 50 min üle täistunni. Nädalaste (või päevaste) käikude ühte *DataFrame*'i kokku panekul takistas statistikafunktsioonide kasutamist puuduvate andmete olemasolu. Sellest probleemiks vabanemiseks kasutati funktsiooni *pandas.DataFrame.interpolate()*, seejuures meetodiks valiti *'time'*, mis on mõeldud kasutamaks päevase ja kõrgema lahutusega

andmete interpoleerimiseks ette antud pikkusega intervalli korral. Lisaparameetritena kasutati piirangut (*limit*) 3, mis määras maksimaalse arvu väärtuseta andmeridu, mis täidetakse interpoleeritud tulemustega ning piirangusuunda (*limit_direction*) 'both' ehk mõlemas suunas, mis määras ära, kummale poole tulemusi interpoleeritakse. Lisaks sõltuvalt nädalaandmete ajahetkedest, lisati samadest radoonisisalduse andmetest 1 rida ette (viimane väärtus), taha (esimene väärtus) või mõlemale poole, et vältida äärmiste arvude kopeerimist interpoleerimise käigus. Seejärel juurde lisatud andmereal eemaldati andmetabelist (*DataFrame*'ist). Saadud tulemused kanti joonistele 30 ja 31. Joonisele kanti ka ventilatsiooni andmed, mis majahalduri sõnul töötab täisvõimsusel kella 6:00st kuni 21:00ni ning muul ajal 1/3 võimsusega. Jooniselt 30 on näha, et ventilatsiooni täisvõimsusele lülitumisega kaasneb enam-vähem samal ajal radoonisisalduse vähenemine umbes 500-lt Bq/m³ 400 Bq/m³-ni ning ventilatsiooni võimsuse vähenemisega sarnasel ajahetkel hakkab radoonisisaldus tõusma. Ainus nädalane käik, mis sellele ei vasta, oli mõõteperioodil 8. okt - 19. dets 2018, kui reedel umbes kella 21:00st alates radoonisisaldus ei hakanud tõusma vaid langes natukene veel, saavutades minimaalse sisalduse pühapäeval umbes selles samas ajavahemikus (21:00), kui ventilatsioon edaspidi majahalduri sõnul lülitus öisele režiimile. See eriskummaline käitumine viitab sellele, et ventilatsioon töötas tollel perioodil teise režiimiga ning kindlasti ei saanud nädalavahetuse režiimiks olla 1/3 võimsusest, pigem võis töötada täisvõimsusel edasi. Radoonisisalduse stabiliseerumine nädalavahetusel viitab sellele, et keldriruumis oli tekkinud mingisugune tasakaal radooni ekshalatsiooni (õhku lisandumise) ja ventilatsiooni (radooni väljatõmbe või lahjendamise) vahel.



Joonis 30. Radoonisisalduse keskmised nädala käigud ruumis A009 erinevate mõõtmiste käigus ning teadaolev ventilatsiooni režiim.

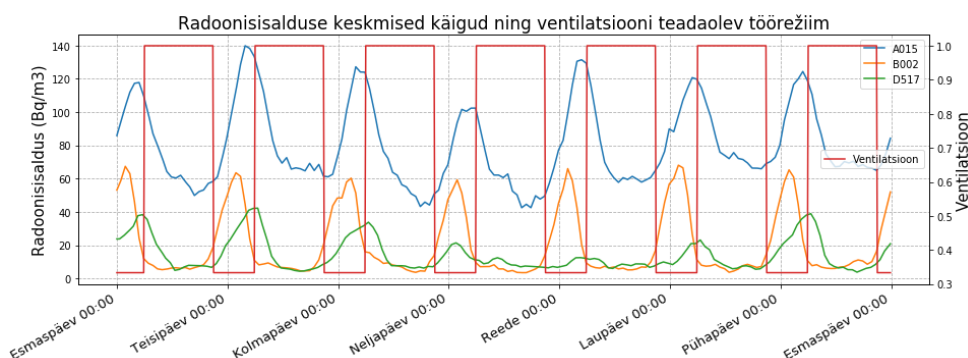
Ruumis A009 erinevatel perioodidel ja kõrgustel läbi viidud mõõtmiste nädalased käigud erinevad teineteisest maksimaalselt 241 Bq/m³ võrra, kui aga välja jätta keskmine nädala käik perioodil 08.10 - 19.12.2018 (ehk A009 oktoobrist), siis erinevad tulemustest teineteisest maksimaalselt 143 Bq/m³ võrra. Keskmine mõõtetulemuste erinevus (ajahetkel maksimaalse ja minimaalse Rn-sisalduse vahe) oli vastavalt 98 Bq/m³ ja 78 Bq/m³ ehk ligikaudu 20 %. Samal kõrgusel (100 cm) kahel sarnase radoonisisalduse dünaamikaga ajaperioodidel (A009 detsember ehk 19.12.2018 - 08.01.2019 ja A009 jaanuarist ehk 08.01-06.05.2019) teostatud mõõtmiste keskmised nädalased käigud erinesid teineteisest maksimaalsel 88 Bq/m³ võrra (keskmiselt 32 Bq/m³). Rohkem statistilisi andmeid nädala käikude kohta toodi välja tabelis 12.

Tabel 11. Nädala keskmise käigu statistiline analüüs ruumis A009 erinevatel perioodidel

	A009 10 cm	A009 140 cm	A009 180 cm	A009 78 cm	A009 detsember	A009 jaanuarist	A009 oktoobrist
count	504.000000	504.000000	504.000000	504.000000	504.000000	504.000000	504.000000
mean	492.309891	439.970516	456.685131	434.514991	425.585774	450.048987	412.520159
std	39.308074	41.304548	42.917977	38.956758	46.640050	40.934958	66.588582
min	423.136598	364.101064	379.029554	362.676455	341.525000	382.349414	321.148557
25%	457.122376	404.358763	420.786167	400.449241	388.266597	411.404399	348.391212
50%	488.388380	436.460771	450.441672	432.908351	423.900694	445.621553	408.102207
75%	527.622363	477.708343	497.742462	469.527036	452.495000	488.589415	461.218622
max	571.617089	528.747049	532.552624	508.285617	536.696667	521.681490	540.058223

Joonisele 31 kanti madalama radoonisisaldusega ruumide õhu radoonisisalduse nädalane dünaamika. Jooniselt on näha, et ruumis A015 käitub radoonisisaldus sarnaselt ruumi A009 radoonisisaldusega. Hoopis teisiti käitub radoonisisaldus ruumis B002, mis asub auditooriumi B103 all ning kuhu ajavahemikul 03:00 – 19:30 tekitatakse ülerõhk auditooriumiruumi ventileerimiseks. Ventilatsiooni täisvõimsusel töötamise ajal on radoonisisaldus ruumis B002 minimaalne (alla 10 Bq/m³), kuid saavutas maksimum mõni tund peale südaööd (umbes 60 Bq/m³). Radoonisisalduse nädalane käik ruumides A015 ja B002 saadi 11 päeva põhjal, ning mistõttu nädala käik pole väga stabiilne.

D-korpuse 5-korruse kabineti D517 radoonisisalduse keskmine nädalane käik on saadud ligikaudu neljanädalase mõõtmise andmete põhjal. Radoonisisalduse nädalane dünaamika on sarnane vahepealsele keldriruumide A009/A015 ja B002 radoonisisalduse käigule. Nädalane käik meenutab rohkem tavaliste keldriruumide radoonisisalduse muutumist, kuna üldiselt radoonisisaldus hakkab tõusma ventilatsiooni nõrgenedes ning radoonisisaldus väheneb taas, kui ventilatsioon lülitub täisvõimsusele. Ruumis D517 meenutab radoonisisalduse käik neljapäeviti B002 päevast radoonisisalduse muutumist, andes maksimaalse radoonisisalduse õhus natukene peale südaööd. Neljapäeva teise radoonisisalduse maksimumi põhjuseks on radoonisisalduse ebakorrapärane muutumine neljapäeviti.



Joonis 31. Keskmine radoonisisalduse nädalane käik ruumides B002, A015 ja D517 ning teadaolev ventilatsiooni režiim.

5.2. Õhu radoonisisalduse päevane käik erinevates ruumides

Tartu Ülikooli Physicum'i hoones läbi viidud õhu radoonisisalduste mõõtmiste päevased käigud on välja toodud joonistel 32 ja 33. Päevaseid käike iseloomustavad suurused ning ka

päeva käikude arvutamise aluseks olnud liikuva keskmisega (3-tunnise keskkasutusega aknaga) silutud andmeid (kui mitu mõõteseadet oli kasutusel, siis nende keskmist) iseloomustavad statistilised suurused toodi välja tabelites 13 ja 14. Kasutades funktsioone *DataFrame.describe()*, *DataFrame.idxmax()* ja *DataFrame.idxmin()* leiti päevaseid käike iseloomustavad ekstreemumid ning neile vastavad ajahetked (andmed olemas ajahetkede hh:00, hh:35 ja hh:50 koha, kus hh tähistab täistundi). Leitud ekstreemumid kanti tabelisse 13.

Minimaalse õhu radoonisisalduse ajahetk kõrgusel 10 cm (20:50) on tund aega hiljem, kui seda on teistel kõrgustel, see viitab asjaolule, et radoon peaks pärinema põrandalähedasest kihist, kus seda tekib pidevalt juurde. Interpoleerimise tulemusena mainitud miinimumi asukoht ilmselt nihkus varasema aja peale (erinevatel kõrgustel läbi viidud mõõtmiste tulemused salvestati 50 min peale täitundi) ning tegelik minimaalne kontsentratsioon 10 cm kõrgusel võis olla ka mõnikümmend minutit hiljem.

Erinevatel kõrgustel ja aastavahetuse ajal läbi viidud mõõtmiste maksimaalse kontsentratsiooni väärtused ajahetkeks saadi kell 6:50, mis viitab asjaolule, et ventilatsioon ei jõua nii ruttu vähendada radoonisisaldust keldriruumis. Kuna ventilatsiooniavad mõõdetavas keldriruumis suletud, siis tegemist on siiski kaudse mõjuga, ventilatsioon suure tõenäosusega toimib läbi uksepragude, kuid mõningal määral võib see siiski toimida ka läbi ventilatsiooniavade, mis on suletud paksema kartongiga. Samas pikaajase mõõtmise tulemusena (jaan - mai 2019) mõõdeti maksimaalne radoonisisaldus õhus kell 6:00, kuid joonise 32 kõvera täpsemal uurimisel on näha, et radooni kontsentratsioon muutub sellel kellaajal aeglaselt ning eriti suurt radooni kontsentratsiooni erinevust tegelikult me ei näe.

Tabel 12. Keskmiste õhu radoonisisalduste päevaste käikude ekstreemumid ja neile vastavad ajahetked. Kontsentratsioonid on välja toodud ühikutes Bq/m³

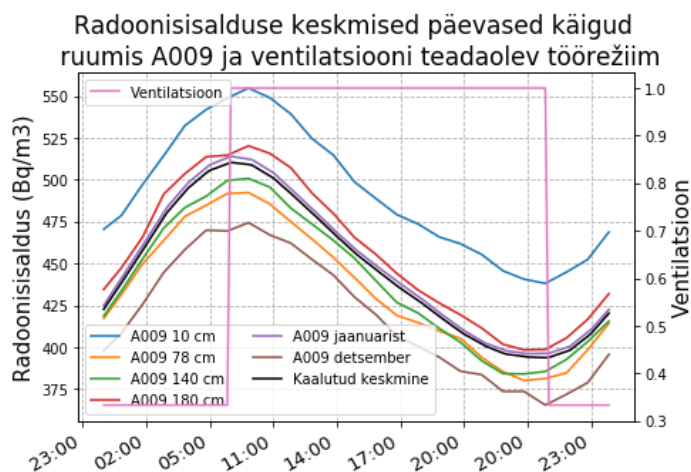
	A009 detsenber	A009 jaanuarist	Kalutud keskmine	A009 10 cm	A009 78 cm	A009 140 cm	A009 180 cm	A015	B002	D517
Min	365	396	394	438	380	384	398	58,6	5,8	6,5
Aeg min	20:50	20:00	20:50	20:50	19:50	19:50	19:50	17:50	12:50	15:35
Max	474	514	510	555	492	501	520	123,6	64,6	28,2
Aeg max	06:50	06:00	6:00	06:50	06:50	06:50	06:50	04:50	01:50	06:35

Viienda korruse kabineti D517 maksimaalse radooni kontsentratsiooni ajahetk 6:35 erineb suletud ventilatsiooniavadega keldriruumi maksimaalse kontsentratsiooni ajahetkest, kuid see erinevus võib olla põhjustatud nii andmepunktide kogumise ajahetkede erinevusest (interpoleerimine jättis miinimumi samale ajahetkele kui see oli mõõtetulemustes) ning mõningal määral võib erinevus olla põhjustatud ka asjaolust, et viienda korruse ruumis pääseb ventilatsioon paremini mõjule.

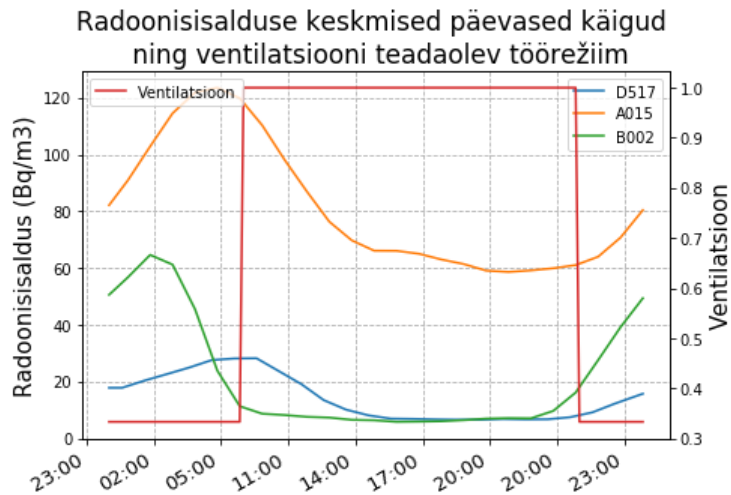
Tabel 13. Päevase õhu radoonisisalduse keskmisi käike ning nende arvutamise aluseks olnud (kolmetunnise liikuva keskmise aknaga silutud) andmete statistilised näitajad (ühikutes Bq/m³)

	A009 detsember	A009 jaanuar- mai	A009 10 cm	A009 78 cm	A009 140 cm	A009 180 cm	A015	B002	D517
Päeva aritmeetiline keskmine	419	450	492	434	440	457	81,2	20,6	14,2
Päeva standardhälve	36	41	38	38	40	42	22,5	19,8	7,9
Perioodi aritmeetiline keskmine	420	450	492	435	440	457	82,0	20,8	14,3
Perioodi standardhälve	46	50	49	45	48	48	24,6	20,3	10,5
Perioodi miinimum	335	312	388	335	312	350	42,5	1,3	1,4
Perioodi maksimum	537	588	633	554	553	576	143,1	79,1	51,9

Keldriruumi A015 varasem (2-3 tundi varem) minimaalne kontsentratsiooni väärtus võrreldes ruumiga A009 on ilmselt põhjustatud ventilatsiooni efektiivsemast toimimisest, kuid kuna keskmine päevane radoonisisalduse käik on leitud kõigest 11 päeva põhjal (erinevatel kõrgustel 21 päeva järgi ja jaanuarist alates läbi viidud mõõtmiste käik umbes 115 päeva järgi) ja kontsentratsioonid ei ole väga suured, siis võib siin tegemist olla ka statistilise mõjuga.



Joonis 32. Radoonisisalduse päevane käik keldriruumis A009 erinevatel kõrgustel ja aegadel. Graafikul kaalutud keskmine on leitud kasutades nädala käike „A009 detsember“ kaaluga 253 ning „A009 jaanuarist“ kaaluga 2772. Kaalud on vastavate nädala käikude jaoks kasutatud andmepunktide arv.



Joonis 33. Radoonisisalduse päevased käigud keldrikorruse ruumides A015 ja B002 ning 5-korruse ruumis D517.

Hoopis teistsuguse käiguga on radoonisisalduse muutumine ruumis B002, kuid selle põhjuseks on ilmselt asjaolu, et tööajal on ruumis tekitatud ülerõhk. Joonise 33 põhjal hinnates lõpeb ülerõhu tekitamine kell 19:00 (majahalduri sõnul 19:30). Radoonisisalduse maksimum saavutatakse kell 1:50, mis tähendab, et ilmselt kella 2 ajal hakatakse ruumi tekitama ülerõhku (tegelikult 3:00), et tagada värske õhk auditooriumiruumis B002. 11 päeva mõõtetulemuste põhjal oli minimaalne radoonisisaldus kell 12:50 ning seega radoonisisalduse muutumine on sümmeetrilisem kui ruumis A009.

5.3. Keskmised radoonisisalduse kontsentratsioonid tööajal ja peale seda

Keskmete radoonisisalduste leidmiseks kasutati päevaseid õhu radoonisisalduse käike. Päevase radoonisisalduse käiku kirjeldava kõvera alune pindala jagati trapetsiteks ning nende järgi leiti keskmine radoonisisaldus huvipakkavas ajavahemikes.

Keskmed radoonisisalduse erinevatel ajaperioodidel on kantud tabelisse 14. Ruumides, kus toimib tavapärase ventilatsioon (A015, B002 ja D517) jäävad tööajal ruumide siseõhu radoonisisaldused ruumides alla Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) poolt soovitatud kontsentratsiooni 100 Bq/m³ [4]. Päevaste õhu radoonisisaldus käikude põhjal leitud keskmistest radoonisisaldust järeldeb, et mõistlik on kaheksatunnist tööpäeva alustada üks tund hiljem ehk kella 8 asemel kell 9, kuid kuna kontsentratsiooni erinevused on siiski väga väikesed (mõõteseadme minimaalne määramatus 15 Bq/m³) ning lisaks radoonisisaldus õhus fluktueerub suuremates piirides (vt tabelid 13 ja 14, ruumis D517 päeva keskmise käigu maksimum 28,2 Bq/m³, kui samal ajal analüüsi aluseks olnud kolmetunnise aknaga silutud keskmise andmete põhjal oli maksimum 51,9 Bq/m³), siis ruumides see ühe tunni võrra hiljem tööle tulek ei mõjuta oluliselt tööruumide radoonist saadavat doosi. Kõige usaldusväärsema info keskmise radoonisisalduse kohta on saadud ruumi A009 jaoks. Võrreldes ruumi A009 radoonisisalduse andmetega vähendab teiste ruumide keskmise radoonisisalduste väärtuste usaldusväärset mõõtmiste suhteliselt lühike periood (11 kuni 30 päeva).

Tabel 14. Keskmise õhu radoonisisaldus erinevate mõõtmiste käigus erinevatel ajaperioodidel ning aastane efektiivdoos valemi (1) järgi, arvestades 2000 tunnist eksponeerimisega aastas ja tööpäeva keskmist radoonisisaldust ajavahemikus 08:00-16:00

	08:00-17:00	08:00-16:00	09:00-17:00	17:00-08:00	20:00-05:00	Ef. doos (mSv)
A009 10 cm	497	502	492	489	542	6,73
A009 78 cm	438	442	433	433	481	5,92
A009 140 cm	445	450	440	437	487	6,03
A009 180 cm	462	467	456	454	505	6,26
A009 detsember	425	429	420	416	461	5,75
A009 jaanuar-mai	454	459	449	447	497	6,15
A009 kaalutud keskmine (dets-mai)	452	457	446	445	494	6,12
A015	69,7	70,9	67,0	88,1	101,1	0,95
B002	6,6	6,6	6,4	29,0	47,4	0,09
D517	9,6	9,9	8,3	17,1	19,5	0,13

5.4. Siseõhu radoonisisalduse muutumine ventilatsiooni väljalülitumise ajal

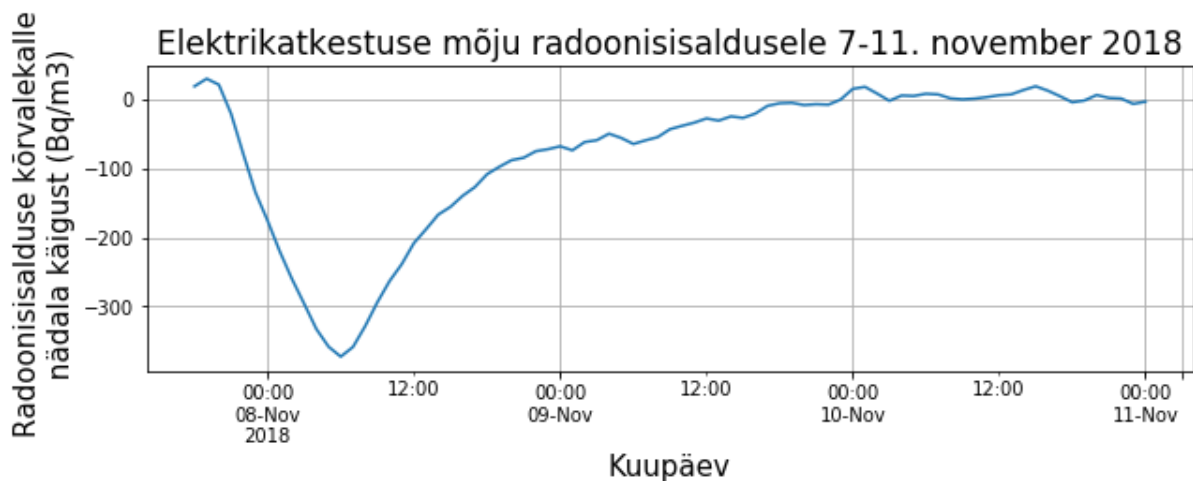
Peatükis 4.2. kirjeldatud mõõtmiste (oktoober-detsember 2018) käigus oli Physicumis elektrikatkestus, mistõttu ventilatsioon lülitus mõneks ajaks välja. Kahjuks täpsem info päevade ja kellaaegade kohta puudub. Elektrikatkestuse mõju hindamiseks uuriti kolmetunnise liikuva keskmise aknaga silutud andmete kõrvalekallet keskmisest radoonisisalduse nädalasest käigust (joonis 34).

Elektrikatkestuse mõju radoonisisaldusele algas vahemikus 20:00-21:00 7. november 2018, kui radooni kontsentratsioon suletud ventilatsiooniavadega ruumis langes 417 Bq/m^3 -lt 387 Bq/m^3 -ni (ehk erinevus nädala keskmisest radoonisisalduse käigust langes väärtuselt $+20 \text{ Bq/m}^3$ väärtuseni -21 Bq/m^3). Elektrikatkestuse mõju oli suurim neljapäeval, 8. novembril 2018 kell 06:00, mil radoonisisalduse kõrvalekalle nädala keskmisest käigust oli -372 Bq/m^3 ning radoonisisaldus ruumis oli 166 Bq/m^3 .

Radoonisisalduse andmete põhjal (7. november alates 21:00) leitud lineaarse lähenduse korral kahanes radoonisisaldus eelmainitud suuruste põhjal ruumis kiirusega $-27,6 \text{ Bq}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, kuid kasutades *scipy.optimize.curve_fit()* funktsiooni, saadi lineaarse lähenduse tõusuks $-23,4 \text{ Bq}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. *Curve_fit()* funktsiooni abil leitud eksponentsiaalse lähenduse korral tuli radoonisisalduse vähenemist kirjeldavaks valemiks $291,1 \cdot \exp(-0,150t) + 92,5$, kus t on aeg kahanemisest alates ($t = 0, 1, \dots, 9$), seejuures mõõdetud radoonisisalduse vähenemist kirjeldavate andmetega võrreldes erines lineaarne lähendus keskmiselt 0,07 % ($-4,94 \text{ %} \dots 9,72 \text{ %}$) ja eksponentsiaalne lähendus $-0,02 \text{ %}$ ($-2,57 \text{ %} \dots 1,17 \text{ %}$). Võrdluseks keldriruumis hilisemate mõõtmiste käigus saadud päevane radoonisisalduse käik varieerub vahemikus $394 \dots 510 \text{ Bq/m}^3$, seejuures radooni kontsentratsiooni kasvamisel saavutatakse maksimaalne väärtus 9 tunni ja 10 minutiga ning ventilatsiooni täisvõimsusel töötamisel saavutatakse minimaalne väärtus 14 tunni ja 50 minutiga. Ehk siis päevase radooni kontsentratsiooni käigu korral on kahanemiskiirus nende kahe ekstreemalse radooni kontsentratsiooniga ajahetkede järgi arvatult $7,8 \text{ Bq}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ning vastavalt kasvamiskiirus $12,7 \text{ Bq}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$.

Radoonisisalduse kõrvalekalde eelmainitud andmete põhjal, keskmisest nädala käigust, saadi sama perioodi jaoks lineaarse lähenduse korral tõusuks $-39,4 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ ning eksponentsiaalse lähenemise korral tuli valemiks $575,5 \cdot \exp(-0,108 t) - 596,1$, kus t on aeg kahanemisest alates ($t = 0, 1, \dots, 9$). Radoonisisalduse kõrvalekalde negatiivsemaks muutumist kirjeldav lineaarne lähendus erines keskmiselt $-11,3 \%$ (-125% ... $6,8 \%$) ja eksponentsiaalne lähendus $0,27 \%$ ($1,79\%$... $3,45 \%$). See kahanemiskiirus tuli suurem radoonisisalduse järgi leitud kahanemiskiirusest, kuna tavaliselt kella 9 ajal ventilatsioon lülitub nõrgema režiimi peale, mistõttu radoonisisaldus hakkab hoopis üldiselt tõusma. Radooni kontsentratsiooni nädala käigust maksimaalne kõrvalekalle jäi täpselt sama aja peale, mil tavalisel päeval lülitub ventilatsioon täisvõimsuse peale.

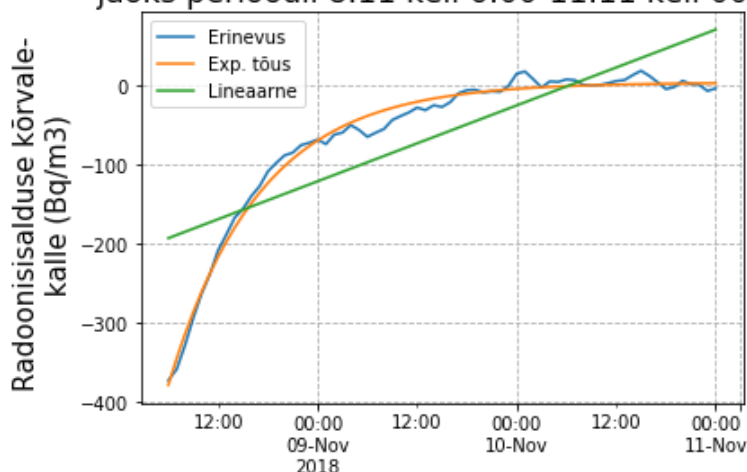
Joonisel 35 kujutatud radoonisisalduse nädala keskmisest käigust kõrvalekalde kõver, radoonisisalduse erinevuse vähenemise ajal, (perioodi 08.11 kell 06:00 kuni 11.11 kell 00:00) omab eksponentsiaalset tõusu, mille kaju iseloomustavaks valemiks saadi optimeerimisfunktsiooni *curve_fit()* kasutades saadi: $3,4 - 381,6 \cdot \exp(-0,92 t)$; seejuures $t = (0, 1, \dots, 66)$. Lineaarne lähendus sama ajahetke jaoks annab tõusukiiruseks $3,99 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$. Mõõdetud kõrvalekaldest eksponentsiaalne kasv erineb keskmiselt 28% (-460% ... 186%), kusjuures suur erinevus väikestel radoonisisalduste kõrvalekalletel on tingitud mürast. Lineaarse lähenduse korral on kõrvalekalded veelgi suuremad, kuna piirkond ei ole sobiv lineaarse lähenduse jaoks. Lühema perioodi jaoks (08.11 kell 12:00-ni) on kasvu tõus $28,4 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$, erinedes seega mõõdetust kõrvalekalde kõverast keskmiselt $-0,04 \%$ ($-2,08 \%$... $1,89 \%$).



Joonis 34. Radoonisisalduse kõrvalekalle nädala keskmisest käigust elektrikatkestuse ajal.

Uurides radoonisisalduse kasvu perioodil 8 – 11. november, oli esimene maksimum $479 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ajahetkel 09.11 kell 5:00 ning seetõttu leiti lineaarse lähendusena tõus hoopis selle perioodi jaoks: $+13,6 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$, mis ei erine väga palju ventilatsiooni öisele režiimile mineku ajal keskmisest radoonisisalduse kasvust ruumis A009 ($12,7 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$). Mõõdetud maksimumi ajahetk ning leitud kasvukiirus viitavad sellele, et hiljemalt sel ajal ventilatsioon hakkas toimima tavapäraselt.

Lähenduskõverad radoonisisalduse kõrvalekalde jaoks perioodil 8.11 kell 6:00-11.11 kell 00:00

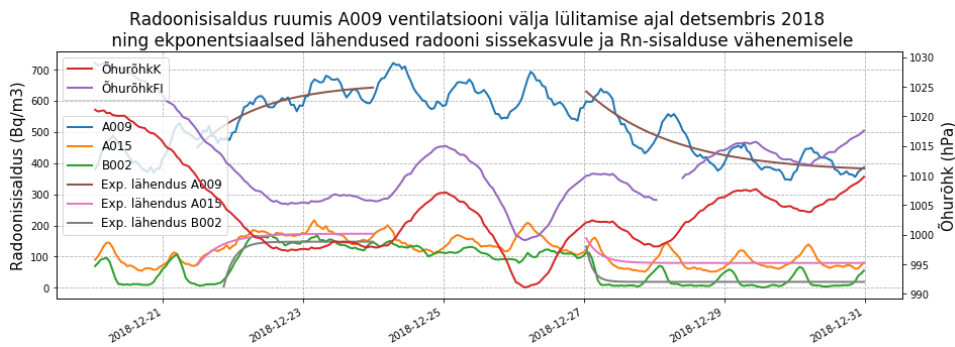


Joonis 35. Radoonisisalduse kõrvalekalle koos lähenduskõveratega.

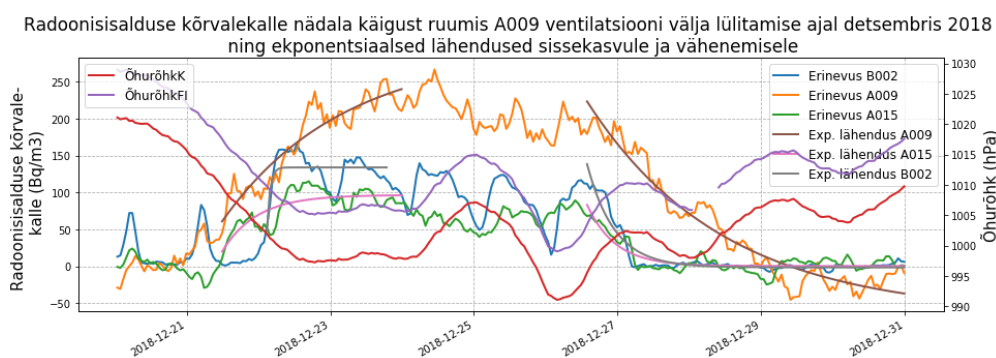
Elektrikatkestuse mõju nädala keskmisest käigust kõrvalekallet kirjeldas hästi eksponentsiaalne piirangule lähenev eksponentfunktsioon. Sarnaselt sellele leiti eksponentsiaalsed lähendused detsembris 2018 läbi viidud ventilatsiooni välja lülitamise katsele, leides lähendused nii radoonisisalduse kui ka selle kõrvalekalde jaoks päevasest käigust (joonised 36 ja 37). Saadud lähendusvalemid on välja toodud tabelis 15. Radoonisisalduse ja radoonisisalduse kõrvalekalde eksponentsiaalse kasvamise uurimisel kasutati ruumide A009 ja A015 korral ajavahemikku 21.12.2018 11:00 – 24.12.2018 00:00, kuid B002 radoonisisalduse korral ajavahemikku 21.12 kell 20:00 – 24.12 00:00 ning radoonisisalduse kõrvalekalde korral 21.12 kell 20:00 – 23.12 kell 19:00. Radoonisisalduse kõrvalekalde kahanemise uurimisel kasutati kõigi ruumide korral ajavahemikku 26.12.2018 kell 13:00 – 31.12.2018 kell 00:00 ning radoonisisalduse korral ajavahemikku 27.12 kell 00:00 – 31.12 kell 00:00.

Tabel 15. Leitnud eksponentsiaalsed lähendused ventilatsiooni välja lülitamisel radoonisisalduse kasvule ja hiljem taas sisse lülitamisel radoonisisalduse vähenemisele. Valemites t tähistab aega kasvu või kahanemise algusest ning tulemus on antud ühikutes Bq/m^3

	Radoonisisaldus (Bq/m^3)	Radoonisisalduse kõrvalekalle päeva keskmisest (Bq/m^3)
A009 kasv	$655,5 - 204,7 \cdot \exp(-0,045t)$;	$292,3 - 231,4 \cdot \exp(-0,025t)$
A015 kasv	$173,6 - 100,3 \cdot \exp(-0,121t)$	$96,7 - 76,7 \cdot \exp(-0,086t)$
B002 kasv	$148,0 - 143,4 \cdot \exp(-0,279t)$	$133,9 - 84,9 \cdot \exp(-0,984t)$
A009 kahanemine	$258,2 \cdot \exp(-0,033t) + 371,4$	$288,3 \cdot \exp(-0,022t) - 65,0$
A015 kahanemine	$79,0 \cdot \exp(-0,216t) + 79,8$	$82,8 \cdot \exp(-0,106t) + 0,4$
B002 kahanemine	$112,9 \cdot \exp(-0,442t) + 19,3$	$139,9 \cdot \exp(-0,109t) - 1,5$



Joonis 36. Ventilatsiooni välja lülitamise ajal radoonisisalduse muutus ning radoonisisalduse kasvu ja kahanemist kirjeldavad eksponentsiaalsed lähenduskõverad.



Joonis 37. Radoonisisalduse kõrvalekalle ventilatsiooni välja lülitamise ajal ning eksponentsiaalsed lähendused radoonisisalduse kõrvalekalde suurenemisele ja vähenemisele.

Nii radoonisisalduse kui ka radoonisisalduse kõrvalekalde graafikutelt on näha, et mingi päevane radoonisisalduse käik jäi sisse. See võib olla tingitud C-korpuse ventilatsioonist, mis peab olema sisse lülitatud ööpäevaringselt seal asuvates tõmbe- ja hoiukappides hoitavate kemikaalide tõttu.

Radooni poolestusaeg on 3,8 päeva, mis teeb lagunemiskonstandiks 0,008 1/h. Kõikide leitud kahanevate eksponentkõverate korral on eksponendi astmenäitaja lagunemiskonstandist kuni 2 suurusjärku suurem, mistõttu radooni enda lagunemine ruumis on vähetähtis ning radoonisisalduse vähenemine peab olema põhjustatud muudest teguritest, nagu ventilatsioonist. Kuna radoonisisalduse kõrvalekalle päevasest käigust ruumis B002 algas A korpuse ruumide radoonisisalduse kõrvalekaldest mitu tundi hiljem (~9 tundi) ning öhtusel ajal, siis on see võimalik märk asjaolust, et ventilatsioon tolles ruumis võis toimida tavapäraselt veel mitu tundi kauem. Lisaks kinnitab seda ka asjaolu, et hiljem ventilatsiooni sisse lülitumise ajal radoonisisaldused hakkasid enam-vähem samal ajal langema.

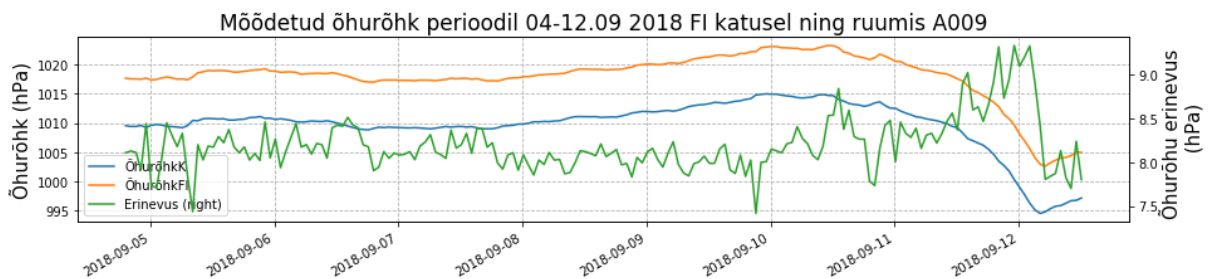
Kõik kolm ruumi on tavaolekus erineva ventilatsioonirežiimiga ning see väljendus ka radoonisisalduse ja radoonisisalduse kõrvalekalde kasvukiiruses. Kuna ruumis B002 on üldiselt ülerõhk, siis ventilatsiooni välja lülitamine avaldas seal kiiret mõju radoonisisaldusele. Ruumis A009 on ventilatsioon suletud ventilatsiooniavad tõttu kõige rohkem pärsitud ning seetõttu olid ka kasvu- ja kahanemiskiirused kõige väiksemad. Huvitav on asjaolu, et elektrikatkestuse (~8. november 2018) ajal suletud ventilatsiooniavadega ruumis A009 radoonisisalduse kõrvalekalde muutust kirjeldavad astmenäitajad tulid mitu korda suuremad. Üks võimalik põhjus sellele on ventilatsioonirežiimi muudatus. Perioodil oktoober-detsember läbi viidud

mõõtmiste käigus oli näha selget nädalast käiku, kuid peale jõulupühadeks ventilatsiooni välja lülitamist käitusid kõik päevad peaaegu samamoodi.

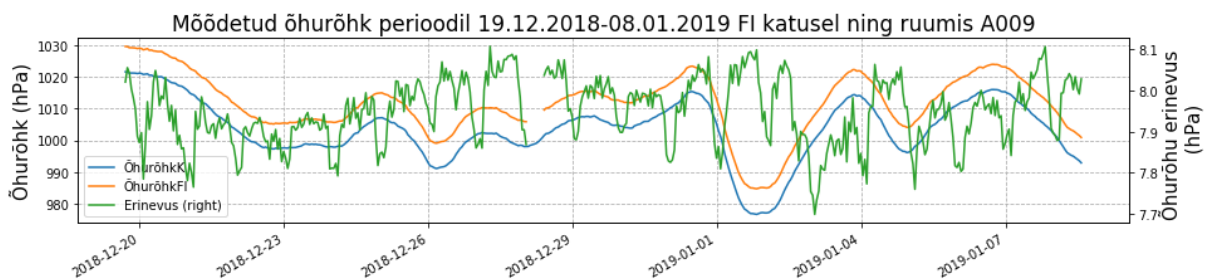
5.5. Õhurõhkude erinevus ruumis A009 ning Physicumi katusel mõõdetud ilmajaamas

Õhurõhu andmed Physicumi ruumi A009 kohta on olemas kahe perioodi kohta: võrdlusemõõtmiste ajal 4 - 12. september 2018 ning jõulupühade ajal 19. detsember 2018 – 8. jaanuar 2019 läbi viidud mõõtmiste kohta. Õhurõhu käigud ning erinevused kahe mõõtepunkti vahel on toodud joonistel 38 ja 39. Õhurõhu erinevus kahe ruumi vahel septembris on ühtlasem kui aastavahetuse perioodil. Aastavahetuse perioodi mõõtmistel õhurõhkude erinevuses on näha päevane rütm – väikseim erinevus südaöö paiku ja suurim päevasel ajal, kuid päevase rütmi kõrvalekalded erinevad mõningal määral üksteisest. Korrelatsioonid õhurõhu ja õhurõhu erinevuse vahel on negatiivsed ning absoluutväärtuselt suurem on korrelatsioon keldris mõõdetud õhurõhu ja õhurõhu erinevuse vahel. Septembris olid korrelatsioonid järgmised: õhurõhu erinevuse ja keldri õhurõhu vahel $-0,298$ ning õhurõhu erinevuse ja katusel mõõdetud õhurõhu vahel $-0,232$. Seevastu aastavahetuse mõõtmiste käigus saadi õhurõhu erinevuse ja keldri õhurõhu vaheliseks korrelatsiooniks $-0,187$ ja katusel mõõdetud õhurõhu ja õhurõhu erinevuse vaheliseks korrelatsiooniks $-0,179$. 24-tunnise liikuva keskmise aknaga aastavahetuse perioodist päevast käiku maha lahutades saada septembri mõõtmistega sarnasemad korrelatsioonid – vastavalt $-0,295$ ja $-0,290$.

Õhurõhu erinevuse perioodilisus aastavahetuse mõõtmiste käigus võib olla põhjustatud nii suuremast ruumide kütmise vajadusest kui ka ventilatsioonirežiimide muutusest, mida kinnitavad nädala käikude erinevused erinevate mõõteperioodide mõõtmistulemustes.



Joonis 38. Õhurõhk perioodil 4-12. september 2018.



Joonis 39. Õhurõhk perioodil 19. detsember 2018 - 8. jaanuar 2019.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö „Tartu ja Põlva hoonete siseõhu radoonisisaldus ning selle sõltuvust õhurõhust ja ventilatsioonist“ raames analüüsitud tulemustest selgus, et:

- RadonFTLab poolt toodetav RadonEye RD200 (BLE) on hea mõõteseadme radoonisisalduse muutuste mõõtmisteks. Käesolevas töös kasutatud neljast mõõteseadmest üks seade omas võrreldes võrdlusmõõtmisseadme AlphaGUARD DF2000 mõõtetulemusega võrreldes üle 10% mõõtetulemuse erinevust. Asjaolu, et RadonEye-d andsid võrdlusseadmest kõrgema tulemuse, kiirgusohutuse koha pealt midagi halba kaasa ei too;
- Põlva hoonete keldrite õhu radoonisisalduse mõõtmistes saadi järgmised tulemused: Ühe- ja kahepereelamutes (5 mõõtepunkti, edaspidi MP) 189 Bq/m³, paneelmajas (5 MP) 304 Bq/m³. Seejuures kõigi keldrite (12 MP) keskmine mõõdetud radooni aktiivsuskontsentratsiooni väärtus oli 220 Bq/m³. Seega jääb enamasti keldrite õhus radoonisisaldus alla direktiivis 2013/59/EURATOM kehtestatud viitetasel 300 Bq/m³;
- Põlva hoonete esimese korruse eluruumides õhu radoonisisalduse mõõtmistes saadi järgmised tulemused: keskmine (12 MP) 72 Bq/m³, keldriga elumaja eluruumis (7 MP) 50 Bq/m³ ja keldrita elumajade eluruumis (5 MP) 106 Bq/m³. Seega jääb enamasti radoonisisaldus esimese korruse eluruumides alla WHO soovitusliku radoonisisalduse viitetasel 100 Bq/m³;
- Samaaegsete mõõtmiste tulemuste põhjal eluruumis ja keldris selgus, et keldrite õhu radoonisisalduse ja õhurõhu vahel on negatiivne korrelatsioon. Ühe- ja kahepereelamute keldrites oli õhurõhu ja radoonisisalduse vahel nõrk või keskmise tugevusega korrelatsioon. Seejuures ühe- ja kahepereelamuste eluruumide radoonisisalduse sõltuvus keldrite radoonisisaldusest varieerus rohkem kui kortermajades;
- Suurim mõõdetud radoonisisalduste erinevus (20 korda) keldris ja eluruumis mõõdeti ühe- ja kahepereelamutes, kuid suurimad radoonisisalduse väärtused kortermajade keldriõhus, kus ilmnes ka tugev korrelatsioon õhurõhu ja radoonisisalduse vahel;
- Physicumi õhu radoonisisalduse muutuste pikaajaliste mõõtmiste käigus selgus, et radoonisisaldus suletus ventilatsiooniavadega keldriruumis A009 omab päevast käiku. Kusjuures mõõdetud radoonisisalduste ekstreemumid asuvad lähedastel ajahetkel teadaoleva ventilatsioonirežiimi ümberlülitumiste aegadega. Päevase käigu minimaalne ja maksimaalne väärtus erineb umbes 120 Bq/m³ ja seejuures keskmine radoonisisaldus ruumis on ~450 Bq/m³;
- Physicumi keldriruumis A009 läbi viidud õhu radoonisisalduse mõõtmised põrandast erinevatel kõrgustel kinnitasid põrandalähedase õhukihi natukene suuremat radoonisisalduse kontsentratsiooni, kuid mõõtmise tulemused ei kinnitanud radoonisisalduse monotoonset kahanemist mõõtekoha kõrguse suurendamisega;
- Ruumides, kus toimib tavapärane ventilatsioon (A015, B002 ja D517) jääb keskmine radoonisisaldus alla WHO soovitusliku viitetaseme 100 Bq/m³. Tööaja (8:00-16:00) jooksul on keskmine radoonisisaldus erinevate ruumide õhus järgmine: A009 – 457 Bq/m³, A015 – 71 Bq/m³, B002 – 6,6 Bq/m³, D517 – 9,9 Bq/m³. Nendele sisaldustele vastavad ligikaudsed aastased efektiivdoosi väärtused on järgmised: A009 – 6,1 mSv, A015 – 1,0 mSv, B002 – 0,09 mSv, D517 – 0,13 mSv;

- Ventilatsiooni sisse- või välja lülitamine mõjutab radoonisisaldust keldrikorruse ruumidest kõige kiiremini ruumis B002 ning kõige aeglasemalt ruumis A009;
- Analüüsides radoonisisalduse kasvu peale 20. novembril 2017 ventilatsiooniavade sulgemist ruumis A009 ning ventilatsiooni välja lülitamist 21. detsember 2018, saadi järgmised eksponentsiaalse kõvera astmenäitajad: 0,051 ja 0,045. Need on samas suurusjärgus. Teiste ruumide astmenäitajad ventilatsiooni välja lülitamisel olid tunduvalt suuremad: ruumis A015 0,121 ja ruumis B002 0,279;
- Physicumis läbi viidud mõõtmiste põhjal peale mõõtetulemustest päevase või nädalase käigu maha lahtutamist kindlat korrelatsiooni õhurõhu ja radoonisisalduse kõrvalekalde vahel ei tuvastatud. Korrelatsioonide väärtused varieerusid vahemikus -0,67 (A009 detsembris) ... 0,11 (A009 kõrgusel 180 cm);
- Korrelatsioonid samaaegselt keldrikorruusel läbi viidud erinevate ruumide radoonisisalduste vahel ventilatsiooni välja lülitamise ajal olid tugevad (0,89 ... 0,98), kuid peale tavarežiimile minekut erinesid korrelatsioonide väärtused suurtes piirides: 0,144 (ruumid A009 ja A015), 0,432 (ruumid A009 ja B002) ning 0,511 (ruumid A015 ja B002).

Kasutatud kirjandus

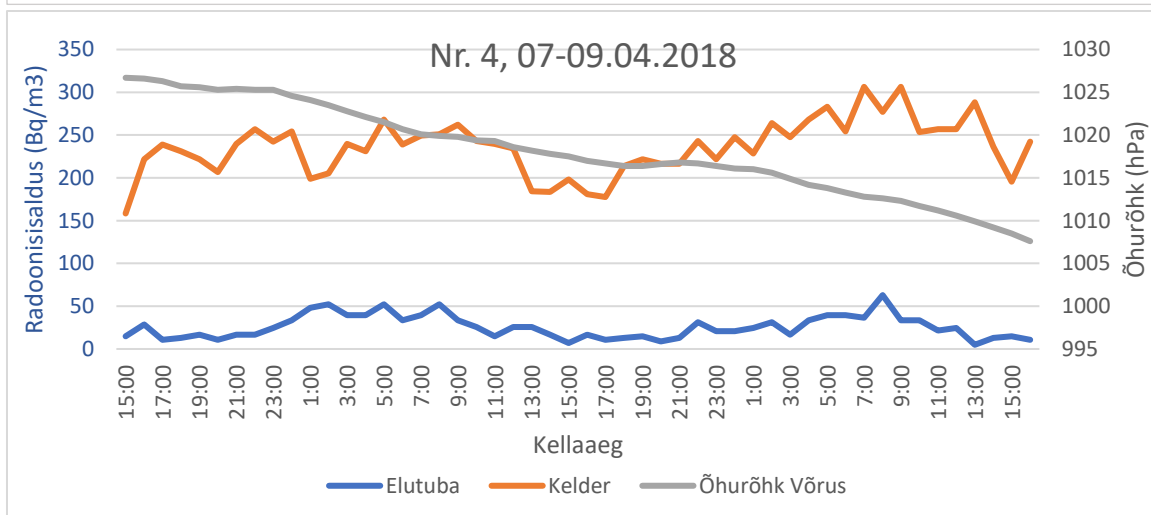
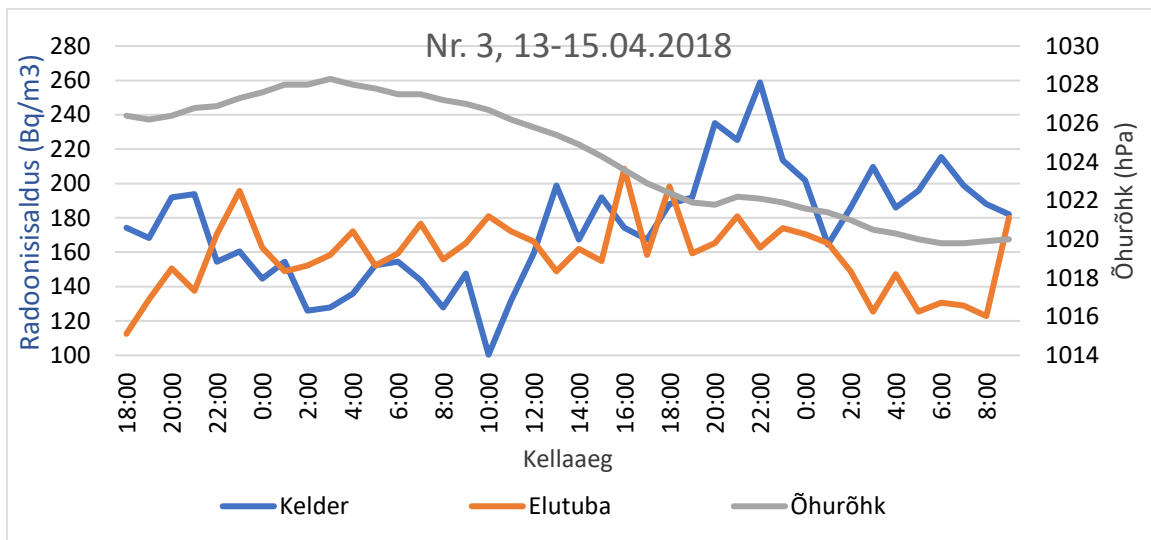
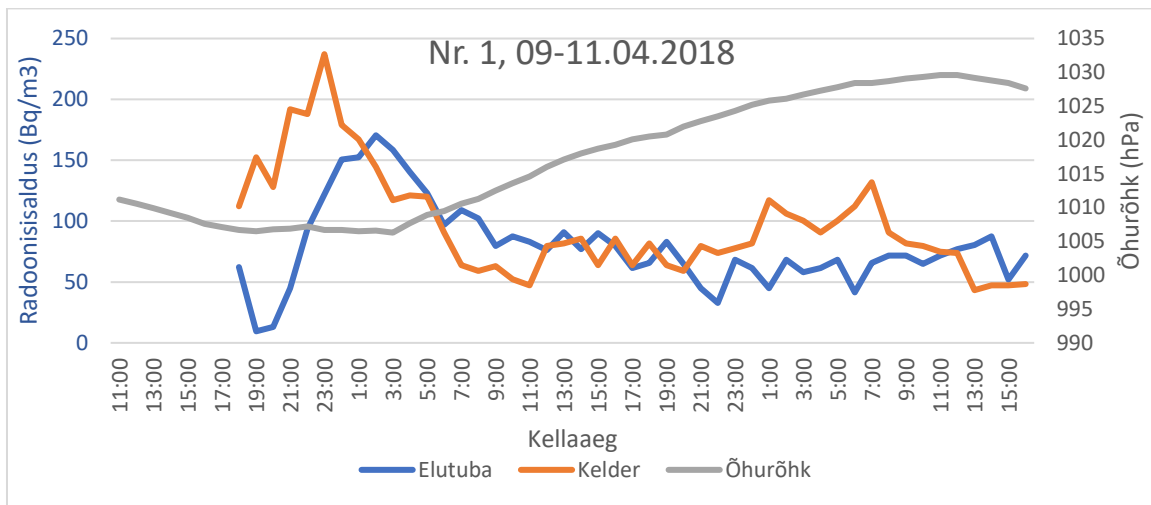
- [1] Euroopa Liidu Nõukogu, *Direktiiv 2013/59/EURATOM* (2013).
- [2] Keskkonnaminister, „Määrus nr 28 Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel, 30. juuli 2018,“ *Riigi Teataja*. Kasutatud 02.06.2019, <https://www.riigiteataja.ee/akt/103082018004>.
- [3] LõunaLeht, „Kagu-Eestis algavad radooniuringud,“ *LõunaLeht*, lk. 7, 26. juuli 2018.
- [4] World Health Organization, *WHO handbook on indoor radon.: a public health perspective* (World Health Organization, Geneva, 2009).
- [5] M. Schubert, A. Musolff ja H. Weiss, „Influences of meteorological parameters on indoor radon concentrations (^{222}Rn) excluding the effects of forced ventilation and radon exhalation from soil and building material,“ *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, pp. 81-85 (2018).
- [6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. (Vol 1, Annex B: Exposures of The Public and Workers from Various Sources of Radiation)* (United Nations, New York, 2010).
- [7] International Commission on Radiological Protection, „Summary of ICRP Recommendations on Radon,“ *ICRP ref 4836-9756-8598, January 26, 2018*. Kasutatud 01.06.2019, <http://icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf>.
- [8] Y. Ishimori, K. Lange, P. Martin, Y. Mayya ja M. Phaneuf, *Technical Reports Series No. 474 Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues*, (International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna, 2013).
- [9] Radon FTLab, „Radon Eye Quick Guide (BLE),“ kasutatud 27.05.2019, [http://radonftlab.com/wp-content/uploads/2015/data_sheet/RadonEye_Quickguide_\(web\).pdf](http://radonftlab.com/wp-content/uploads/2015/data_sheet/RadonEye_Quickguide_(web).pdf).
- [10] Keskkonnaministeerium, *Radooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmine (RAM 2016)* (2016).
- [11] Eesti Standardikeskus, „EVS840:2017 Juhised radoonikaitse meetmete kasutamiseks uutes ja olemasolevates hoonetes,“ (2017).
- [12] J. Skowronek, M. Wysocka, A. Mielnikow ja S. Chalupnik, „Radon measurements in kinderkartens in area affected by underground mining,“ in *Radon in the Living Environment, 19-23 April* (Athens, 1999).

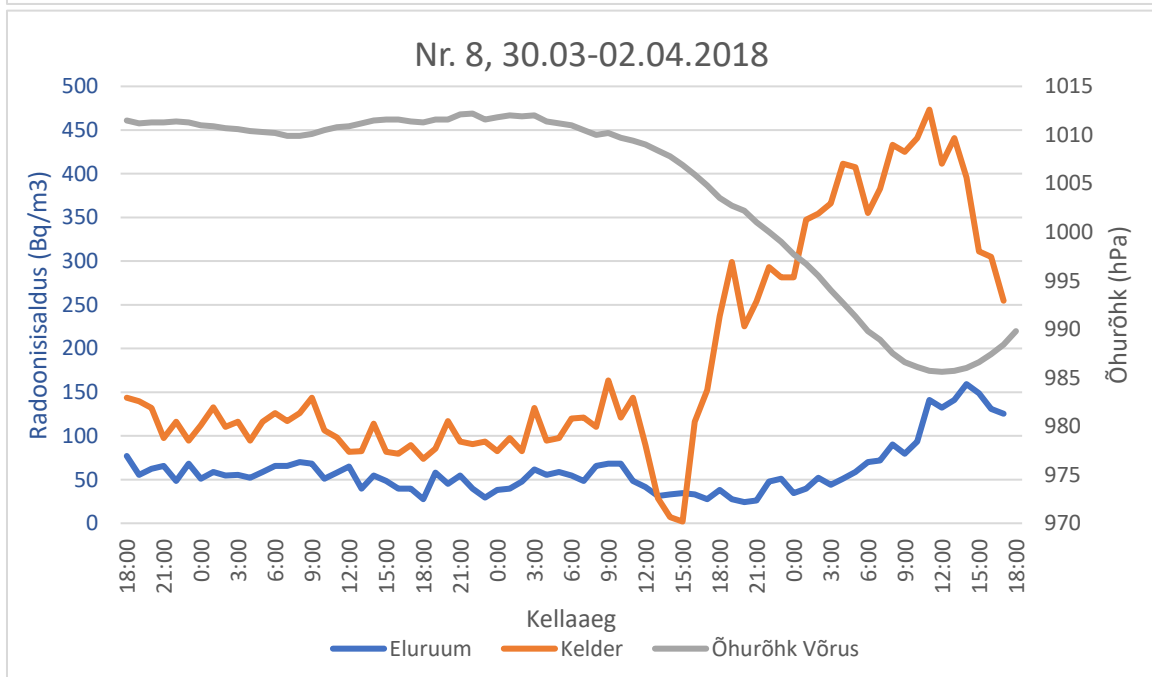
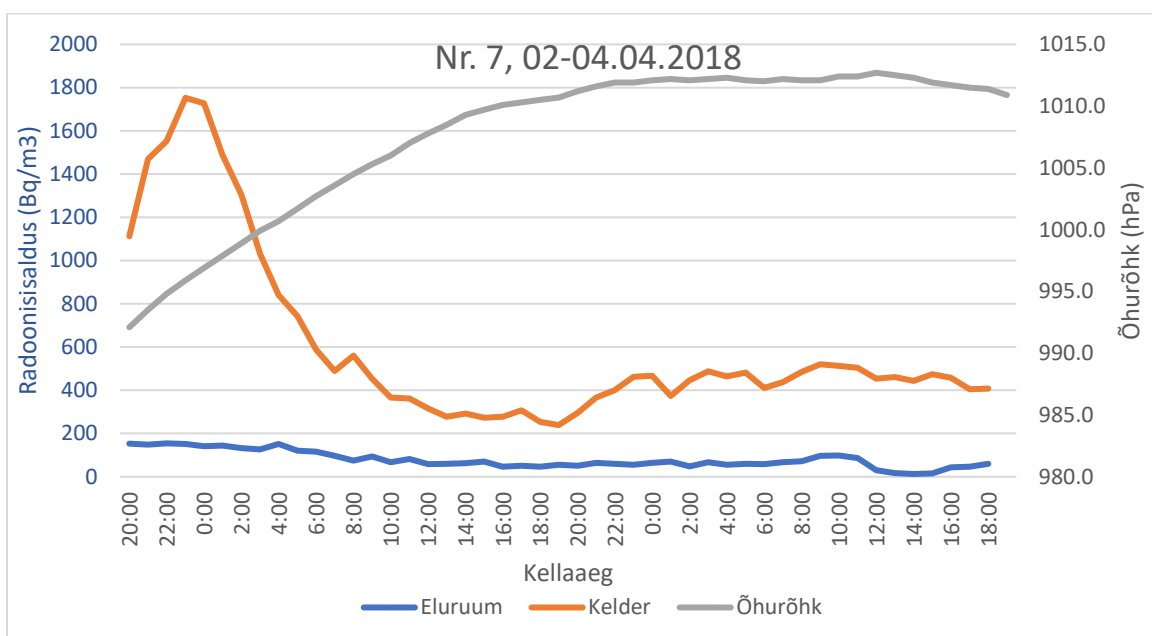
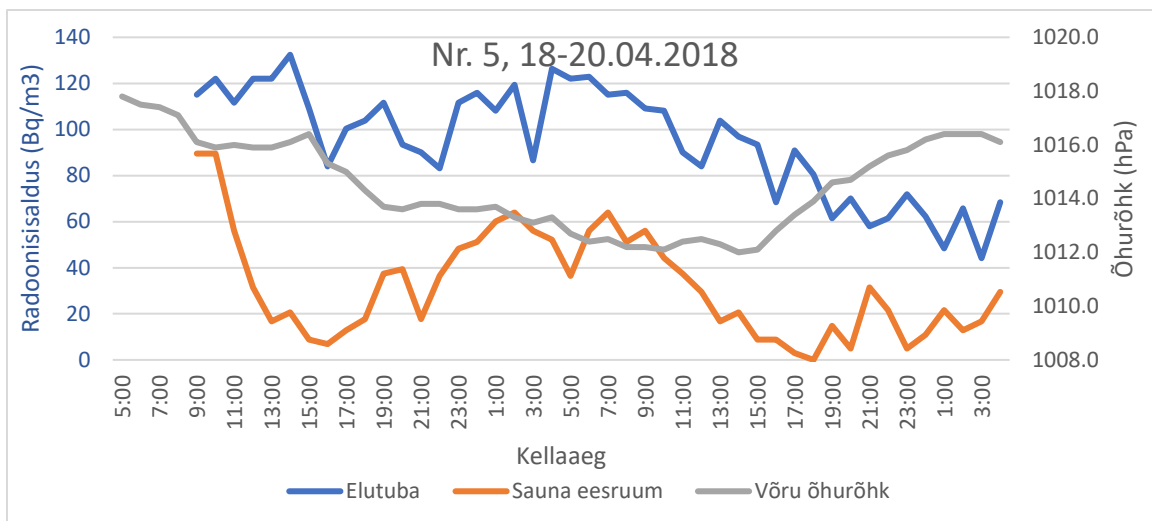
Lisa 1: Põlva mõõtmiste tulemused

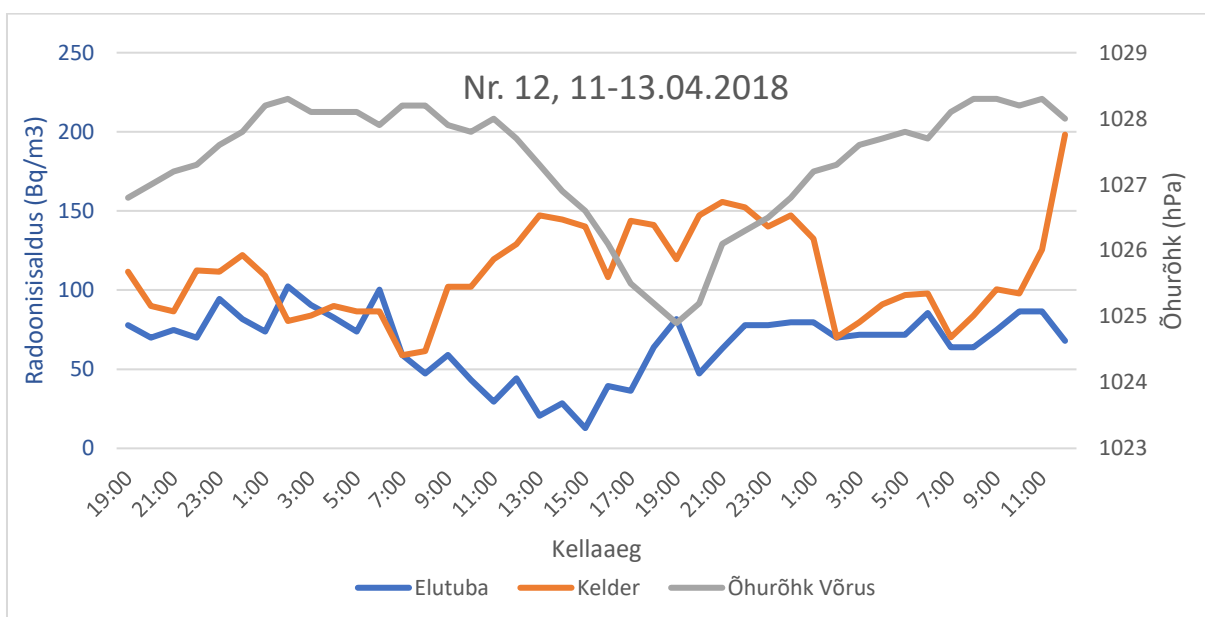
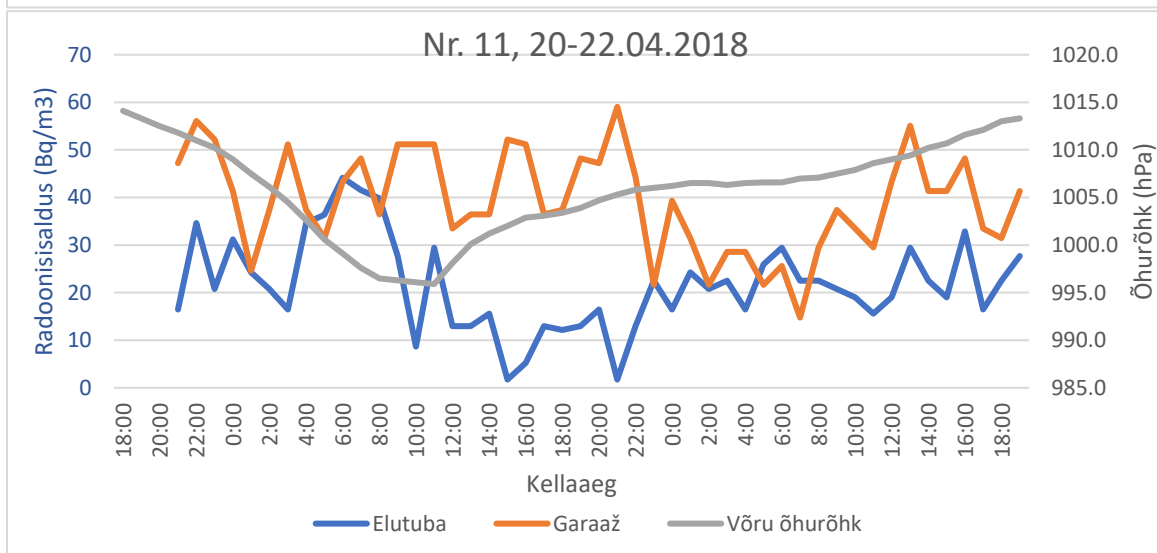
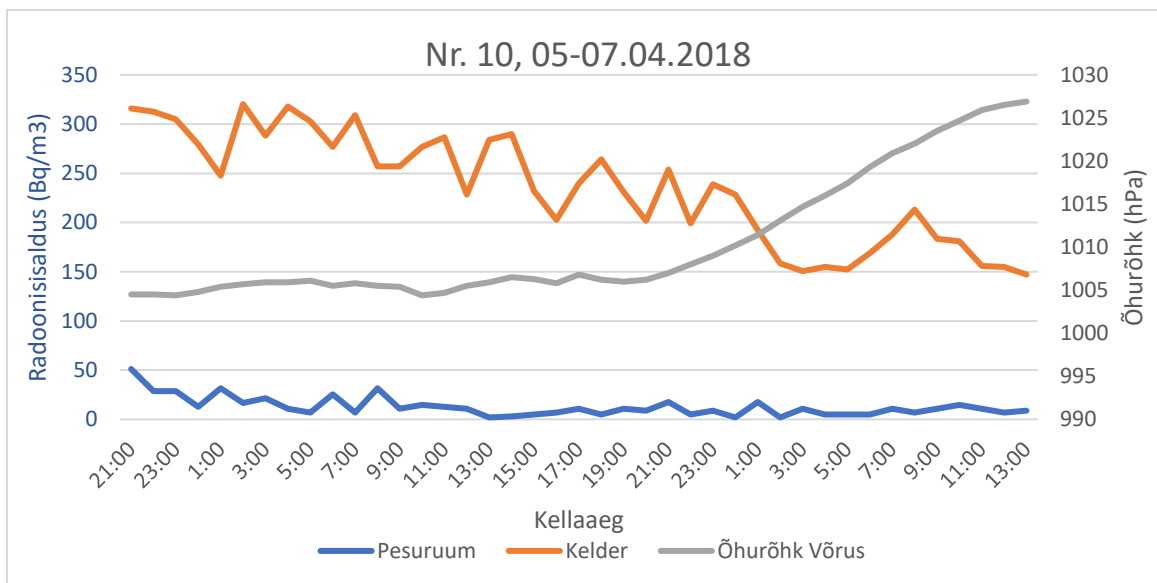
Mõõtepunkti number	Mõõtmisaeg	Korrelatsioon õhurõhuga	Aritmeetiline keskmine (Bq/m ³)	Määramatus (Bq/m ³)	Mõteseadme määramatus	Standardhälve	Keskmine standardhälve	Mõõtmisperiood (h)	Märkused	Maapinna kõrgus
Nr. 1, kelder	9-11.04.2018	-0.56	96.6	16.3	9.66	43.63	6.43	47	Uue aknaga keldriboks	68 m
Nr. 1 elutuba	9-11.04.2018	-0.49	80.2	15.9	8.02	34.85	5.14	47	2-korruselise kortermaja sündventilatsiooniga	67,5 m
Nr. 2 vanem keldri osa	9-11.03.2018	0.39	73.9	15.1	7.39	11.87	1.70	50	Mõisaegne kelder (maakivid), akendeta, ventilatsioonivavad	76 m
Nr. 2, elutuba 1 korrus	28.02-1.03.2018, 5-7.03.2018		192.7	19.5	19.27	25.70	3.24	64	Kortermaja, kuid antud korter asub mõisaegses osas, kus aiukestena elamiseks 2 kortust, eraldi sissepääsuga maja osas. Toas puipõrand, lae kõrgus umbes 3.4 m	76 m
Nr. 2, keldri unem osa	7-9.03.2018	-0.54	100.3	15.4	10.03	20.36	3.44	36	Betoonist põrand ja seinad, akrnad keldris, selles kortermaja osas korterid kahel korrusel.	76 m
Nr. 2, magamistuba 2 korrus	27-29.03.2018		141.8	15.2	14.18	15.51	2.42	42	Avatud trepiga, ventilatsiooniva esimese ja teise korruse vahel	76 m
Nr. 3, elutuba	13-15.04.2018	0.24	159.7	16.3	15.97	19.95	3.19	40	Elutoa all ei olnud keldrit, kelder naaberkorteri all, ahiküttega maja	65.5 m
Nr. 3, kelder	13-15.04.2018	-0.71	174.8	18.3	17.48	33.47	5.36	40	Kahetrepelamu. Korteriite ühistrepikojast uks alla keldrisse.	65.5 m
Nr. 4, elutuba	7-9.04.2018	0.10	25.8	15.1	2.58	13.70	1.96	50	Erantaja. Elutoa all kelder, kõrvaltoal mitte, ukseid lahti	48 m
Nr. 4, kelder	7-9.04.2018	-0.27	237.7	24.2	23.77	30.11	4.30	50	Muld põrand, madal ruum	48 m
Nr. 5, elutuba	16-18.04.2018	-0.55	87.8	15.4	8.78	24.95	3.33	57	Ahiküttega erantaja	46.5 m
Nr. 5, sauna eestruum	16-18.04.2018	-0.47	26.8	15.2	2.68	20.27	2.71	57	Eraldi maja, saunaruumi all kelder, milles vesi sees.	46.5 m
Nr. 6, eluruum 4 korrus	29-30.03.2018		19.7	15.1	1.97	7.23	2.09	13	Otsakorter	73.5 m
Nr. 6, kelder	11-21.03.2018	-0.93	362.30	39.6	36.23	247.65	16.02	240	Kortermaja 36 korteriga, renoveerimata paneelmaja	73.5 m

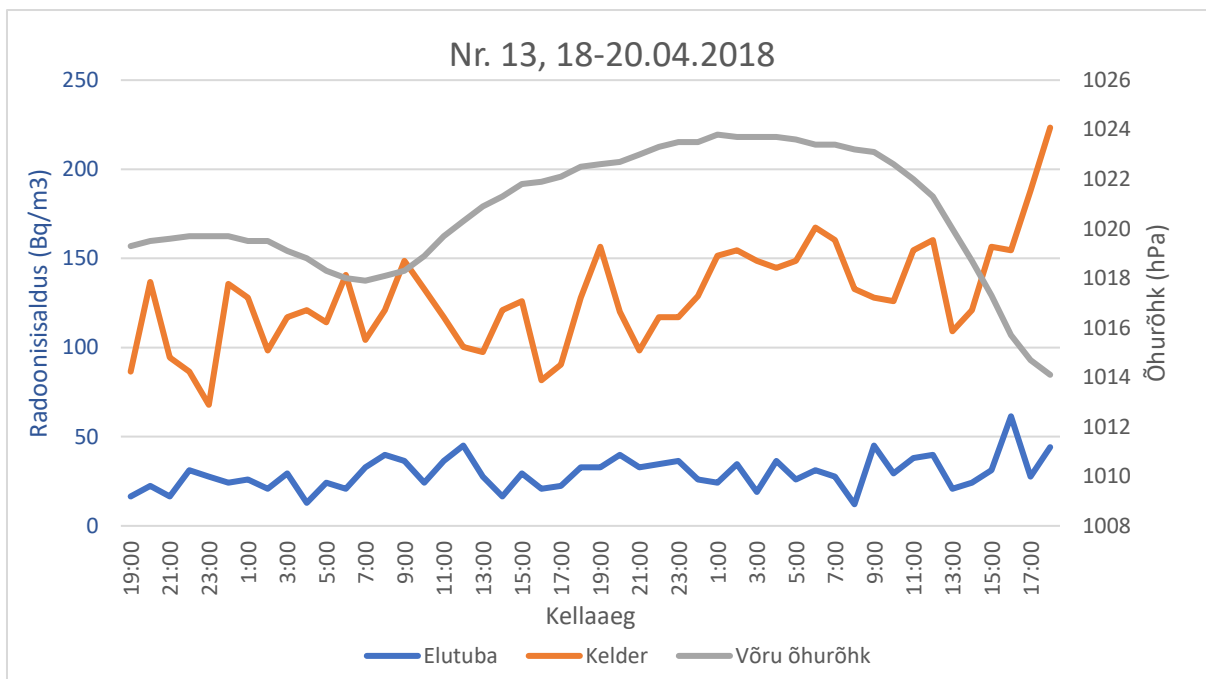
Mõttepunkti number	Mõõtmisaeg	Korrelatsioon õhurõhuga	Aritmeetiline keskmine (Bq/m ³)	Määramatus (Bq/m ³)	Mõtteseadne määramatus	Standardhälve	Keskmine standardhälve	Mõõtmisperiood (h)	Märkused	Maapinna kõrgus
Nr. 7, kelder	2-4.04.2018	-0.86	591.0	84.1	59.10	405.44	59.78	47	Kortermaja. Keldriuks avaneb välja.	72.5 m
Nr. 7, magamisituba	2-4.04.2018	-0.87	77.4	16.0	7.74	38.15	5.63	47	Renoveeritud hoone, magamisruumid õhutusava	72.5 m
Nr. 8, kelder	30.03-02.04.2018	-0.93	186.1	24.0	18.61	127.52	15.13	72	Eramaja. Kaks keldriruumi erimevatel poolkorrustel, mõõtmise kõige alumises keldriruumis	65 m
Nr. 8, kontorituba	30.03-02.04.2018	-0.65	60.4	15.4	6.04	30.34	3.60	72	1,5 korrus (poolkorrustega maja), maja asub nõlval	65.5 m
Nr. 9, elutuba	28-30.03.2018	-0.40	55.8	15.3	5.58	19.90	3.23	39	Esimene korrus, otsaskorter	66.5 m
Nr. 9, kelder	24-28.03.2018	-0.35	341.4	34.7	34.14	58.95	5.96	99	3-korruselise kortermaja. Välisukse juurest hargneb trepikoda kaheks, puudub üks keldrikoruse ja trepikoja vahel. Keldris aken. Vahapeal seal aken tuulutuse peal, aga initsiaal mitte mõõteperioodil.	66 m
Nr. 10, kelder	5-7.04.2018	-0.78	233.3	24.9	23.33	55.10	8.71	41	Betoonist lagi, põrand ja seinad. Seines peroplastiga suletud aknad + katkine klaas, kelder terve maja all, tihti	64.5 m
Nr. 10, pesuruum	5-7.04.2018	-0.29	11.8	15.1	1.18	8.08	1.28	41	Eramaja. Betoonist põrand, uks köögi vahel lahti	64.5 m
Nr. 11, elutuba	20-22.04.2018	-0.04	21.7	15.1	2.17	9.69	1.43	47	Elumaja poolkorrustega. Kõrge veetase, põhjavee tasemeni 1,5 kaevuraket	41.5 m
Nr. 11, garaaž	20-22.04.2018	-0.17	39.0	15.1	3.90	10.57	1.56	47	Garaaž majas sees	42 m
Nr. 12, elutuba	11-13.04.2018	0.28	66.3	15.4	6.63	21.22	3.31	42	Eramaja	52.5 m
Nr. 12, kelder	11-13.04.2018	-0.52	111.3	15.7	11.13	30.46	4.76	42	Kelder 1. korrusel künka sees, veidi kõrgemal toapõrandast, betoonist seinete ja põrandaga. Keldris olemas õhu väljapuhkumise võimalus (ventilaator), mis mõõtmiste ajal oli välja lülitatud.	53.5 m
Nr. 13, elutuba	18-20.04.2018	-0.14	29.7	15.1	2.97	9.35	1.36	48	5-korruselise kortermaja künka otsas	81 m
Nr. 13, kelder	18-20.04.2018	-0.18	129.3	15.6	12.93	28.64	4.18	48	Trepikojast keldriuks alla.	81 m

Lisa 2. Paralleelsete mõõtmiste tulemused graafiliselt









Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anne Serv,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Tartu ja Põlva hoonete siseõhu radoonisisaldus ning selle sõltuvus õhurõhust ja ventilatsioonist,

mille juhendajad on Rein Koch ja Alan Henry Tkaczyk,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Anne Serv

03.06.2019