

**AHIKÜTTEGA HOONETES PÕLEMISEKS VAJALIKU
LISAÕHU SAAVUTAMINE RENOVEERITUD JA
RENOVEERIMATA KORTERITE NÄITEL**

**ACHIEVING THE ADDITIONAL AIR REQUIRED FOR COMBUSTION
IN STOVE-HEATED BUILDINGS USING THE EXAMPLE OF
RENOVATED AND NON-RENOVATED APARTMENTS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mark Vaino

Üliõpilaskood 177560EAKI

Juhendaja: Anti Hamburg, PhD
Konsultant: Ülar Palmiste, doktorant

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2023

Autor: Mark Vaino

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023

Juhendaja: Anti Hamburg

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Mark Vaino

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Ahiküttega hoonetes põlemiseks vajaliku lisaõhu saavutamise renoveeritud ja renoveerimata korterite näitel

mille juhendajad on Anti Hamburg ja Ülar Palmiste

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Mark Vaino, 177560EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI Küte, ventilatsioon, jahutus

Juhendaja: PhD, Anti Hamburg, +372 53 419 274

Doktorant, Ülar Palmiste

Lõputöö teema:

Ahiküttega hoonetes põlemiseks vajaliku lisaõhu saavutamise renoveeritud ja renoveerimata korterite näitel

Achieving the additional air required for combustion in stove-heated buildings using the example of renovated and non-renovated apartments

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Ahiküttega hoonetes ventilatsiooni lahenduste leidmine
2. Analüüsida ja võrrelda renoveeritud ja renoveerimata hoonete vajalikku õhu pealevooluhulka ja rõhu erinevusi kütmise ajal
3. Pakkuda välja lahendused kindla võimsusega ahjude puhul ventilatsiooni õhuvooluhulkadele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Valmis peab olema ca 75%	
2.	Kaitsmistaotluse esitamise tähtaeg dekanati	18.12.23
3.	Lõputööde esitamine	22.12.23
4.	Lõputööde kaitsmine	12.01.24

23

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....2023a

Üliõpilane: Mark Vaino ".....".....2023a
/allkiri/

Juhendaja: Anti Hamburg ".....".....2023.a
/allkiri/

Konsultant: Ülar Palmiste. ".....".....2023a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Thalfeldt. ".....".....2023a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	6
1 Sissejuhatus	7
2 Metoodika.....	9
2.1 Hoonete valim.....	9
2.2 Mõõtmised ja seadmed	11
2.3 Arvutusmetoodika.....	15
2.3.1 Õhulekke arvutamine	15
2.3.2 Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevuse arvutusmetoodika.....	18
2.3.3 Kamina efektiivseks tööks vajaliku õhuhulga arvutusmeetodid.....	19
2.3.4 Infiltratsioon.....	24
2.4 Siseõhu kvaliteedi reguleerimine Eestis	26
2.5 Kompleks katse – Kukeseene 4, Pärnu.....	27
3 Tulemused	28
3.1 Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevused	28
3.2 Põlemiseks vajaliku õhuhulgad	29
3.2.1 Tulemus 1.....	29
3.2.2 Paraschivi lisaõhu arvutusmeetod.....	30
3.2.3 Spiridonovi lisaõhu arvutusmeetod.....	31
3.3 Renoveerimata korter ja eraelamud	32
3.3.1 Mäe 4, Võru	32
3.3.2 Kreutzwaldi 25a	33
3.3.3 Karja 6.....	34
3.3.4 Liiva 9	36
3.3.5 Roosi 43	38
3.3.6 Roosi 35	40
3.4 Renoveeritud korterelamud	41
3.4.1 Nisu 1, Tallinn, korter 9.....	41

3.4.2 Taara pst 4, Tartu, korter 3.....	44
3.4.3 Taara pst 6, Tartu, korter 8.....	46
3.4.4 Koidula 4, Võru, Korter 9	47
3.4.5 Veskikaare 6, Roela, Korter 3	49
3.5 Komplekstesti analüüs Kukeseene 4, Pärnu	51
4 Analüüs.....	57
4.1 Õhulekkearvud ja infiltratsioon	57
4.2 Põlemiseks vajalik lisa õhuvooluhulk	58
4.3 Rõhuerinevused mõõdetud hoonetes	59
4.4 Süsihappegaasi kontsentratsioon eluruumides	61
4.5 Peenosakeste kontsentratsioon	62
5 Lahendused.....	Tõrge! Järjehoidjat pole määratletud.
5.1 Kamina režiimiga ventilatsiooniseadmed.....	64
6 Töö edasiarendamise võimalused.....	69
7 Kokkuvõte	Tõrge! Järjehoidjat pole määratletud.
8 Summary.....	Tõrge! Järjehoidjat pole määratletud.
Kasutatud kirjanduse loetelu	74
LISA 1	76

EESSÕNA

Magistritöö koostajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna arhitektuuri ja instituudi tudeng Mark Vaino.

Lõputöö teema sõnastati Inseneriteaduskonna programmijuhi Martin Thaldfeldi, Tallinna Tehnikakõrgkooli professori ja liginullenergiahoonete uurimisrühma eksperdi Anti Hamburgi, algatusel seoses BuildEST ja Eesti Vabariigi poolses programmis nimega „Renoveerimise maraton“ osalemisega. Renoveerimata majade mõõtmised said läbi viidud Võru linna era- ja kortermajades, milleni sai ligipääsu täna BuildEst eestvedamisel. Sealsed elamud ja korterid asusid aadressidel Rooski 35, Rooski 43, Karja 6, Kreutzwaldi 25b, Katariina allée 4b, Mäe 4 ja Liiva 26. Lisaks nimetatud hoonetele olid ülevaatuse all ka mitmed teised hooned, mille kohta elanike ning elamiskõlbulike korterite puudumise tõttu polnud otstarbekohane uurimust teha – nendes korterites ja elamutes tehti oma ala spetsialistide poolt muinsusväärtuste ja tarindite soojapidavuse kohta uuringud.

Renoveeritud hoonete mõõtmised said tehtud Kredexi poolt saadud renoveerimistoetusega renoveeritud majades Tallinnas, Rakveres, Tartus ja Võrus. Tallinnas toimusid mõõtmised Põhja-Tallinnas aadressidel Nisu 1 ja Läänekaare tee 40, Rakvere lähedal olev hoone asus Roelas, Veskikaare 6 majas. Tartust said väljavalituks kaks Kredexi toel renoveeritud maja Taara pst 4 ning Taara pst 6 ja Võrus Koidula 4 majast kaks korterit. Andmete kogumisel, haldamisel ja nendega seotud konsulteerimisel olid abiks Tallinna Tehnikaülikooli doktorant Siim Lomp, PhD Anti Hamburg ja Ülar Palmiste.

Töös tuuakse välja ahiküttega era- ja kortermajade puhul esinevad rõhkude erinevused sise- ja väliskeskkonna vahel ning arvutused, kui palju õhku on vaja põlemisprotsessi jaoks kindlate ahjuvõimsuste juures. Samuti tuuakse töös esile, kust tõmbab tulekolle hea tihendustööga ja väikeste külmasildadega hoonest õhku ning mis on kõige sagedasemad külmasildade ja õhulekete kohad. Samuti võrreldakse mõõdetavates korterites peenosakeste kontsentratsiooni õhus põlemisprotsessi ajal.

1 Sissejuhatus

Käesolev lõputöö käsitleb renoveeritud ja renoveerimata ahiküttega hoonetes vajaliku lisaõhu vajalikkust ning selle tagamise võimalusi. Ahiküttega kaasnevalt uuritakse, kuidas kvaliteetselt tihendatud hoones muutub tulekolde kasutamisel peenosakeste kontsentratsioon ning kuidas need mõjuvad inimese tervisele. Ahiküte on Euroopas, ning ka põhjamaades laialt kasutuses olev soojuse allikas. Tänapäeva moodsas maailmas, kus kvaliteetselt ehk õhukindlalt tihendatud hoonete ehitamine on tavaks saanud, on antud töö väga aktuaalne. See tähendab, et otsitakse võimalust ning püsivat ja head varianti ahiküttega ning kvaliteetselt renoveeritud majades tagada piisav õhk põlemisele, tagades olukorra, kus ruumides ei teki alarõhku ega ebavajalikke külmasildasid. Töö sisus antakse põhimõttelised lahendused ventilatsiooni automaatika juhtimise võimalustest tuleasemega korterite ja elumajade puhul, tuuakse välja vajaliku lisa õhukoguse arvutused ja koondtabel ning vaadeldakse põlemisel tekkinud osakeste ja süsihappegaasi (CO₂) kontsentratsiooni ja normaalpiirkondi õhus, põlemisprotsessi ajal. Samuti soovitakse selgitada, mis põhjustavad ja mõjutavad elamutes sise- ja väliskeskkonna vahel tekkivaid rõhuerinevusi. Kõik eelnimetatud katsed on tehtud renoveeritud ja renoveerimata korterite näitel üle Eesti. Hästi tihendatud majade puhul uuritakse välja ahju põlemisel kasutatud infiltratsiooniõhu hulgad ning kaasnevad ohud piisava värskõhu pealevoolu puudumisel. Renoveeritud elamutes tehtud mõõtmiste põhjal koostati elanikele termograafia ja külmasildade aruanded ning saadi aimu tänapäeva renoveeritud korterite töö kvaliteedist. Põhjusel, et hoonete sisekliima nõuded ja puhtuse nõuete tase tõuseb pidevalt, on ahiküttega hoonetes äärmiselt tähtis, et põlemisprotsessi jaoks oleks õhuvool piisav. Piidsv õhuvool aitab vältida kahjulike peenosakeste sattumist ruumiõhku ning seega ka hoida inimese tervist. Renoveeritud hoonete mõõtmised said tehtud Kredexi renoveerimistoetuse saanud renoveeritud majades Tallinnas, Rakveres, Tartus ja Võrus. Just nendel hoonetel sai tehtud Blower Door 4.0 süsteemiga ka alarõhutestid, kus ventilaatori abiga tekitati ruumidesse alarõhk külmasildade märkimiseks. Renoveerimata majade mõõtmised said läbi viidud Võru era- ja kortermajades, millele sai ligipääsu koostöös BuildEst eestvedamisel läbi viidud projektile „Renoveerimise Maraton“.

Lisadena on esitatud korterite rõhunäitajad, õhulekete mõõdistused ning peenosakeste osakaalu tabelid.

Kirjanduse ülevaade

Ahikütte ja sellega kaasnev alarõhk on tähtsad, kuid vähe uuritud teemad, mille tähtsus tuleb välja praegusel renovatsiooniajastul, kus iga nädal alustatakse Eestis mõne hoone renoveerimist. Eeltoodud teadustöö teemat on varem vähesed artiklid uurinud, teadustööd on peamiselt teemale keskendunud kaudselt ehk puudutatud on alateemasid. Kattuvaid teemasid on lahanud nende hulgast Tiiu Jõgi oma 2019. aasta tööga „Ventilatsiooni ja köögikubude töötamine õhupidavates elamutes“ [26]. Eelnimetatud töö käsitleb köögikubude töötamisel tekkivat alarõhku, mis on ahikütte puhul üks põhilisi probleeme. Samuti on kubud otseselt seotud hoonete õhupidavusega ning seega ka ahjude tööga, nagu tuleb välja Kukesene 4 majas tehtud katsete tulemustest. Sarnaselt Tiiu Jõgiga on teemat uurinud Jürgen Kollmann oma teadusartiklis „Regelwerke für den Hafner, Umfassender Überblick sowie praktische Bedeutung am Beispiel Luftzufuhr“ [27], Austria, mis eesti keelde tõlgituna on „Ahjupaigaldaja reeglid, põhjalik ülevaade ja praktiline tähtsus õhuvahetuses“. Antud teadustöös arvutab Kollmann välja põlemiseks vajamineva õhu umbakaudse väärtuse, kus arvestatakse põletatava materjali kütteväärtust ning massi. Rohkelt leidub teadustöid pelleti katelde kohta, mis käesoleva teadustöö puhul pole vajalik.

Põlemisprotsesside suunamise ja kontrollimise automaatika teemat on lahanud varaemalt Imre Hade oma 2016. aasta töös „Ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimise automaatika“ [28], mis jääb pigem pinnapealseks ja ei paku lõputöö probleemidele palju lahendusi. Põhiliselt arutleb nimetatud kirjandus ahjus toimuvatest protsessidest ning pakutakse välja akna avamise variandi ja eraldiseisva õhutoru viimise kaminani.







Väliskirjandusest saab esile tuua „Stove performance and emission characteristics in residential wood log and pellet combustion“ [29], mis seletab lahti ahjude ja kaminade töötamise tagamaad ja nõuded ning arutleb täpsemalt põlemisel tekkinud jääkide koostisest ja ohust inimese tervisele. „Improvement of Efficiency and Emissions from Wood Log Stoves by Retrofit Solutions“ [30] seletab renoveeritavate kaminade paremaks ja efektiivsemaks muutmise võimalusi ja vajadust. Ka räägitakse töös sarnaselt eelmise tööga põlemisel tekkivatest jääkainetest, sealhulgas vingugaas, suits ja süsiniku ühendid.

Lõputöö teemaga kattub kõige rohkem 2023 aasta teadustöö „Impact of Chimney-draught Conditions on Combustion and Emission Behavior of a Wood-burning Stove“ [31], mis Eesti keelde tõlgituna tähendab „Korstna tõmbe tingimuste mõju puuküttega ahju põlemisele ja emissioonile“. Just selle töö sisus on välja toodud ahikütte efektiivsuse seos ka korstna enda parameetritega ning see arutleb puidu põletamise efektiivsusest teatud tingimustes, kus õhuvooluhulk on kindlaks määratud.

2 Metoodika








2.1 Hoonete valim

Tabel 2.1 Renoveerimata hoonete valim

Aadress	Hoone pildid	Kõetav pindala, m ²	Korruselisus	Ehitusaasta	Põhikütte allikas	Ventilatsioonisüsteem
Mäe 4-3, Võru		507	3	1960	Kaugküte	Värskeõhuklapid
Kreutzwaldi 25a, Võru		180,7	2	1808	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Karja 6, Võru		237,2	2	1903	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Liiva 9, Võru		447,3	3	1900	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Roosi 43, Võru		70,2	2	1923	Ahiküte	Sundventilatsioon (ventilaatorid)
Roosi 35, Võru		216,3	2	1965	Ahiküte	Vallox 150E seade

Tabelis 2.1 on välja toodud informatsioon kuue renoveerimata hoonete kohta, kus viidi lõputöö raames läbi mõõtmised. Valimit võimaldas BuildEst projekti „Renoveerimise maraton“ läbiviimine, mille korral sai potentsiaalselt renoveeritavate korterite sisekliimat mõõta. Valituks osutusid puitmajad, kus olid alalised elanikud ja toimus kaminaga kütmine, et saada realselt vajalikke tulemusi. Et mõista paremini valituks saanud hooned, on tabelis 2.1.1 välja toodud hoonete aadressid, pildid, kõetavad pindalad, korruselisus, ehitusaasta, konstruktsiooni tüüp, ahikütte olemasolu, põhikütteliik ning ventilatsioonitüüp. Valituks osutusid just need hooned, sest teistel hoonetel ei olnud kas alalisi elanikke või funktsioneerivat ahikütte süsteemi.

Tabel 2.2 Renoveeritud hoonete valim

Aadress	Hoone pildid	Kõetav pindala, m ²	Korruselisus	Ehitusaasta	Renoveerimisaasta	Põhikütte allikas	Ventilatsioonisüsteem
Nisu 1-9, Tallinn		596,3	2	1946	2017	Gaasikatel	Värskeõhuklapid
Taara pst 4-3, Tartu		612,9	3	1958	2021	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Taara 6-8, Tartu		823	3	1939	2022	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Koidula 4-1, Võru		466,5	2	1890	2021	Ahiküte	Loomulik ventilatsioon
Koidula 4-9, Võru		466,5	2	1890	2021	Õhksoojuspump	Sundventilatsioon (ventilaatorid)
Veskikaare 6-3, Roela		840,8	2	1972	2016	Ahiküte	Vallox 150E seade
Kukeseene 4, Pärnu		87,1	1	2020	Uus hoone	Gaasikatel	Komfovent 250 seade

Tabelis 2.2 on välja toodud informatsioon seitsme renoveeritud hoone kohta, kus viidi lõputöö raames läbi mõõtmised. Renoveeritud hoonete valim tuli Kredexi käendusel valminud hoonetest. Põhiline punkt renoveeritud kortermajade valimil oli ahju või kamina olemasolu ning kasutusvõimalus ning puitu sisaldav konstruktsioonitüüp. Erinevalt renoveerimata hoonete valimile, on renoveeritud hoonete puhul toodud välja ka renoveerimisaasta, mis aitab mõista ehituskvaliteeti








2.2 Mõõtmised ja seadmed

Tabel 2.3 Tehtud mõõtmised ja kasutatud mõõteseadmed

Hoone tüüp	Aadress	Teostatud mõõtmised	Kasutatud seadmed
Renoveerimata hooned	Mäe 4-3, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Kreutzwaldi 25a, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Karja 6, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Liiva 9, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Roosi 43, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Roosi 35, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
Renoveeritud hooned	Nisu 1-9, Tallinn	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH Alarõhu katse Termograafia aruanne	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur BlowerDoor 4.0 Flir termokaamera E320
	Taara pst 4-3, Tartu	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH Alarõhu katse Termograafia aruanne	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur BlowerDoor 4.0 Flir termokaamera E320
	Taara 6-8, Tartu	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Koidula 4-1, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Koidula 4-9, Võru	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur
	Veskikaare 6-3, Roela	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH Alarõhu katse Termograafia aruanne	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur BlowerDoor 4.0 Flir termokaamera E320
	Kukeseene 4, Pärnu	Rõhkude vahe sise-ja väliskeskonna vahel Temperatuur, CO2 ja RH Alarõhu katse	Dwyer Magnesense rõhumõõtja Evikon E6226 Sisekliimaandur BlowerDoor 4.0

Tabelis 2.3 on välja toodud nii renoveeritud kui renoveerimata korterites teostatud mõõtmised ja mõõtmisteks kasutatud seadmed.

Tabel 2.4 Kasutatud seadmed ja mõõteväärtused

Seadmete kujutised	Seadmete mõõtepiirkonnad ja täpsused
<p>HOBO Onset</p> 	<p>10V kaabli puhul mõõtmisvahemik 0-10Volti ja mõõtmistäpsus $\pm 0,4$ mV või $\pm 0,3\%$</p>
<p>Dwyer Magnesense</p> 	<p>Mõõtetäpsus: $\pm 1\%$ 0.25" (50 Pa), 0.5" (100 Pa), 2" (500 Pa), 5" (1250 Pa), 10" (2 kPa), 15" (3 kPa), 25" (5 kPa) väärtuste puhul ning $\pm 2\%$ 0.1" (25 Pa), 1" (250 Pa) puhul</p>
<p>BlowerDoor 4.0</p> 	<p>50 Pa juures 25 m³/h - 7800 m³/h, täpsusega $\pm 3\%$</p>
<p>Swemaflow 236</p> 	<p>1-65 l/s mõõtetäpsusega $\pm 3,5\%$</p>
<p>Dust-Trak DRX 8533</p> 	<p>vahemikus 0,001 kuni 150 mg/m³ maksimaalse veaga 0,1% või 0,001 mg/m³</p>
<p>Flir E320</p> 	<p>mõõtevahemik -20°C - +500°C, mõõtetäpsus: +2 °C, +2 %</p>
<p>Evikon E6226</p> 	<p>Mõõtepiirkond: temperatuur -10 kraadist kuni +50 kraadini; Suhteline niiskus alates 0% kuni 100%; Süsihappegaasi näidud alates 0ppm (parts per million ehk osakesi miljoni kohta) kuni 5000ppm. Seade saab mõõta kuni 32000 punkti; mõõtetäpsus $\pm 2,5\%$</p>

Kõik uurimisel kasutatud sedmete kujutised ja mõõtetäpsused on välja toodud tabelis 2.4. Uurimistöö käigus viidi läbi mõõtmisi nii korterites kui ka eramajades. Rõhuvahe mõõteseadmed paigutati sinna, kus asusid aknad ning kus tulekolle ei oleks liiga lähedal. Mõõtmised hõlmasid õhurõhu erinevuste kindlakstegemist, kasutades tabelis 2.4 välja toodud HOBO Onset mõõteseadet ja sellele lisatud Dwyer Magnesense rõhumõõteseadet. Andurid ja seadmed paigutati nii, et need ei asuks küttekehade lähedal ning võimaldaksid näha alarõhu tekkimist ruumis ahju kasutamisel. Rõhu ja õhu kvaliteedi seadmed paigaldati aknast eemale, näiteks külmpapile või seinale. Magnesense rõhuanduri üks ots oli ühendatud silikoontoruga, mille teine ots oli väljaspool hooneid. Selle meetodi abil oli võimalik avada ja sulgeda aknaid, mille järgi torud kuju võtsid.

Lisaks paigaldati ruumidesse tabelis 2.4 väljatoodud sisekliima andur Evikoni PluraSense CO₂, õhuniiskuse ja temperatuuri andurid, mis kogusid lugemisi iga 10 sekundi tagant (hiljem muudeti intervalli 10 minuti peale, kuna mälumaht täitus kiiresti). Renoveeritud majades tehti termopilte ja mõõdeti pinnatemperatuure selgitamiseks välja külmasildade asukohad enne ja pärast alarõhu tekitamist 50 Pa-ga (rõhu ühik Pascal), kasutades BlowerDoor Model 4 seadet ja spetsiaalset ventilaatorit. Eesmärgiks oli tuvastada, kus on suurimad potentsiaalsed külmasildade kohad.

SwemaFlow 236 seadet kasutati ahju siseneva õhu mõõtmiseks põlemisprotsessi ajal ning elamutes sissepuhke õhuvooluhulkade määramiseks.

Õhusaaste mõju tervisele on olnud oluline uurimisvaldkond, eriti seoses peenosakeste tervisemõjudega. Uuringud on näidanud nende osakeste seost südamehaiguste, kopsuhaiguste, kopsuvähi, astma ja teiste terviseriketega. Peenosakeste mõju on kompleksne ning seda on raske täpselt mõista, kuna haiguste põhjused on harva ühepoolsed. Tavaliselt on tegemist pikaajalise mõjuga, kus õhusaaste on vaid üks faktor paljudest, mis mõjutavad tervist. Mitmed uuringud on tõestanud õhusaaste mõju elanike tervisele, eriti viidates 2000ndate aastate alguse uuringutele, mille viisid läbi Pope ja Dockery [11].

Lõputöös uuritakse renoveeritud ahiküttega korterites peenosakeste osakaalu õhus. Võrreldakse erineva suurusega osakesi: PM₁, PM_{2,5}, PM₅ ja PM₁₀. PM₁₀ osakesed on need, mis läbivad 10 µm mõõduselektiivse ava 50% juhtudest (neis sisaldub suurem osa antropogeensest osakesaastest, näiteks põlemisprotsesside lendtuhk, tahm ning teekatte ja pinnase erosioonist tekkivad osakesed). PM_{2,5} aga on eriti peened osakesed, mis läbivad 2,5 µm mõõduselektiivse ava 50% juhtudest [11]. Eelnimetatud mõõtmiste tegemisel kasutati tabelis 2.2.2 väljatoodud Dust-Trak DRX 8533 peenosakeste mõõteseadet

Komplekstesti puhul mõõdeti majapidamises kasutatava puidu niiskus enne põletamist, kus koore poolel oli niiskus umbes 12% ja lõikepooles 7%, mis viitas pikalt kuivanud või kuivades tingimustes viibinud puidule. Põletatavat puitmaterjali kaaluti ning põlemisprotsessi käigus

mõõdeti ahju sissetõmmatavat õhuhulka, et kontrollida arvutuslike põlemisõhu suuruste vastavust tegelikkusele.

Õhutihe olukord tagati alumiiniumteibi paigaldamisega ahju ebatihedustele. Antud hoone puhul sai esmalt tehtud alarõhu- ja ülerõhutestid kasutades blowerdoor ventilaatorsüsteemi. Selle protsessi käigus mõõdeti versiooni, kus kubu on kaetud ja katmata. Samuti kaaluti köögikaaluga põletatava puitmaterjali mass, milleks oli 3,5 kg kuiva lepa puud. Järgmise sammuna süüdati tulikivi kaminas TU1450/1 tuli ning eelnimetatud mõõteseadmed pandi mõõtma. Põlemisprotsessi käigus vahetati pidevalt ventilatsiooniagregaadi režiime, sealhulgas kaminarežiimi, mille puhul oli ventilatsioonisüsteemi sissepuhe 60% ja väljatõmme 50%, ning boost režiimi, mille puhul sissepuhe oli 80% ja väljatõmme 60%. Samuti prooviti kaminarežiimi kubu PKM 9031 X töötamise ajal ning muudeti normaalolukorra sissepuhke vooluhulk 60% peale ja väljatõmme 100% peale. Kogu protsessi käigus mõõdeti kamina poolt sissetõmmatavat õhuhulka, et määrata ära, kas arvutuslikud põlemisõhu suurused sarnanevad tegelikkusele.

2.3 Arvutusmetoodika

2.3.1 Õhulekke arvutamine

Tõendades elamu või hoone õhupidavust, tuleb väljastada õhulekkearv q_{50} , mis näitab ära kui suur on õhulekke välispiirdes väljast tупpa. Selle sama väärtuse järgi õhupidavuse tõendamine näitab, et tehtud töö vastab projektis etteantud tingimustele.

Elamupiirete õhupidavuse tõendamiseks on kolm varianti:

- energiaarvutus;
- mõõdistamine;
- deklareerimine.

Mõõdistamisel on variante mitmeid:

- BlowerDoor alarõhutest;
- suitsutest;
- termograafia;
- keemiline märgistusgaas.

Hoone õhupidavuse määramist on võimalik teostada EVS-EN 13829:2001 standardi („Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhupidavuse määramine. Ventilatoriga survestamise meetod“) järgi, kasutades ruumis ala- või ülerõhu loomisel ventilaatorit. Selle meetodi puhul teibitakse või isoleeritakse muul moel ventilatsiooni- ja muud avad (ahjusuud) ning välisukse avasse paigaldatakse muudetava suurusega uksekate. Uksekatte sisse on sellisel juhul võimalik paigaldada ventilaator, millega hakatakse tekitama vajalikku ala- või ülerõhku ruumides. Ventilaator loeb väliskeskkonnas olevat rõhku, mille saab läbi õue viidud toru. Seadme ülesandeks on saavutada välis- ja sisekeskkonna vahel soovitud õhurõhkude erinevus ja selle erinevuse puhul loetakse vajalikku tekitatavat õhku. Euroopas kasutatakse võrdlusrõhuks reeglina 50 Pa. Selleks kasutati mõõtmisel tabelis 2.2.2 välja toodud BlowerDoor 4.0 seadet.

Enne õhupidavusmõõdistust tuleb samuti kontrollida, et kõik välispiirdes olevad avatäited on suletud asendis. Ventilatsioonisüsteem peab olema välja lülitatud, kõik sissepuhke- ja väljatõmbeplafoonid, värskeõhuklapid ja köögikubu peavad olema õhutihedalt teibitud. Samuti peavad ahjude ja kaminat avad ning ebatihedused olema teibitud või kasutatud täispuhutavat spetsiaalset palli. Ning haisulukud peavad olema veega täidetud või kinni teibitud. Kui tuulekiirus on üle 6 m/s ja hoone kõrguse ning välis- ja siseõhutemperatuuride korrutis on üle 500 m·K, siis

ei soovitata mõõtmisi teostada, kuna ebasoodsad tingimused võivad liialt palju mõjutada mõõdistuse lõpptulemust.

Enne ja pärast lekkeõhu mõõtmist tuleb mõõta sise- ja väliskeskkonnavaheline loomulik õhurõhkude erinevuse suurus. Juhul kui rõhkude erinevus sise- ja väliskeskkonna vahel või enne ja pärast lekkeõhu mõõtmist ületab ± 5 Pa tuleks katse lugeda kehtetuks.

Lekkeõhu mõõtmiseid teostatakse nii üle- kui ka alarõhu tingimustel $0 \dots \pm 60$ Pa. Arvutuslike tulemuste parema täpsuse tagamiseks aga on soovituslik näidud võtta rõhuerinevustel kuni ± 10 Pa. Terve mõõdistuse aeg tuleks hoida kindlat rõhuerinevuste intervalli ja seejuures hoiduda rõhu suurendamisest enam kui 10 Pa võrra. Mõõtetulemusi korrigeeritakse vastavalt sise- ja välistemperatuuride erinevusele ning mõõtmise ajal normaalolukorras valitsevale õhurõhkude erinevusele. Alarõhu- ja ülarõhu mõõtetulemustest arvutatakse keskmine.

Õhupidavust saab mõõdistada ka termograafia näitel nagu on tehtud ka antud lõputöö puhul. Termograafia pildid näitavad, kus on suurimad õhulekked vastavalt värvi diagrammile, mille puhul soojemad toonid, nagu punane ja kollane, näitavad soojust ning roheline ja sinine külma õhuvoolu ja tarindeid.

Piirdetarindite õhupidavuse mõõtmistulemusi saab esitada mitmel viisil:

- 1) q_{50} [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$], õhulekkearv, mis näitab lekkeõhu suurust 50 Pa rõhkude erinevuse juures, jaotatuna hoone piirdetarindite pindalale (vt valem 2.1);
- 2) n_{50} [1/h], õhuvahetuskordsus, mis näitab lekkeõhu suurust 50 Pa rõhkude erinevuse juures, jaotatuna hoone kubatuurile (vt valem 2.2);
- 3) w_{50} [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$], õhuleke põranda pindala kohta, mis näitab lekkeõhu suurust 50 Pa rõhkude erinevuse juures jaotatuna hoone põranda pindale (vt valem 2.3)

$$q_{50} = \frac{L_{50}}{A} \quad (\text{Valem 2.1})$$

kus q_{50} – õhulekkearv, $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$,

L_{50} – lekkeõhu vooluhulk 50 Pa õhurõhu erinevuse korral, m^3/h , A – piirdetarindite pindala (põrandad, välisseinad ja laed), m^2 .

$$n_{50} = \frac{L_{50}}{V} \quad (\text{Valem 2.2})$$

kus n_{50} – õhuvahetuskordsus, 1/h,

L_{50} – lekkeõhu vooluhulk 50 Pa õhurõhu erinevuse korral, m^3/h , V – hoone sisemine kubatuur, m^3 .

$$w_{50} = \frac{L_{50}}{A_F} \quad (\text{Valem 2.3})$$

kus w_{50} – õhuleke põranda pindala kohta, $m^3/h \cdot m^2$,

L_{50} – lekkeõhu vooluhulk 50 Pa õhurõhu erinevuse kor

A_F – Põranda pindala, m^2 (netopind)

Selleks kasutatakse määruses toodud väärtusi välis- ja sisekliima osast, tehnosüsteemide kasutusaega ning õhuleketele. Muu vajalik info võetakse projektist. [4]

Juhul kui hoone tarindite õhuleket ei ole tegelikult mõõdetud või muul viisil tõendatud, siis tehakse energiaarvutus tabelis 1.3 toodud õhulekkearvu baasväärtusega. Juhul kui ehitusprojektis on toodud suurem kui tabelis 1.3 toodud õhulekke baasväärtus, siis kasutatakse projekteeritud väärtust.

Tabel 2.5 Hoone õhulekkearvu baasväärtused välispiirde ruutmeetri kohta

Kasutusotstarve	Õhulekkearvu baasväärtus q_{50} [$m^3/(h \cdot m^2)$]	
	Uus hoone, oluline rekonstrueerimine	Rekonstrueerimine, olemasolev hoone
Väikeelamu	6	9
Muu hoone	3	6

2.3.2 Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevuse arvutusmetoodika

Tuul on võimas looduslik jõud, mis võib tuua palju muutusi keskkonnale, ka muutes õhurõhku. Tuult põhjustavad õhurõhu erinevused kahe punkti vahel, mis tekitab rõhugradiendi jõu, mis põhjustab õhu liikumise kõrgrõhult madalrõhule. Mida suurem on rõhugradiendi jõud, seda tugevam on tuul. Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevus tuleneb tuule kiirusest, õhutihedusest, piirde asukohast ja rõhutegurist (vt valem 2.4)

$$\Delta P_w = (\mu \cdot \rho \cdot v^2)/2 \quad (\text{Valem 2.4})$$

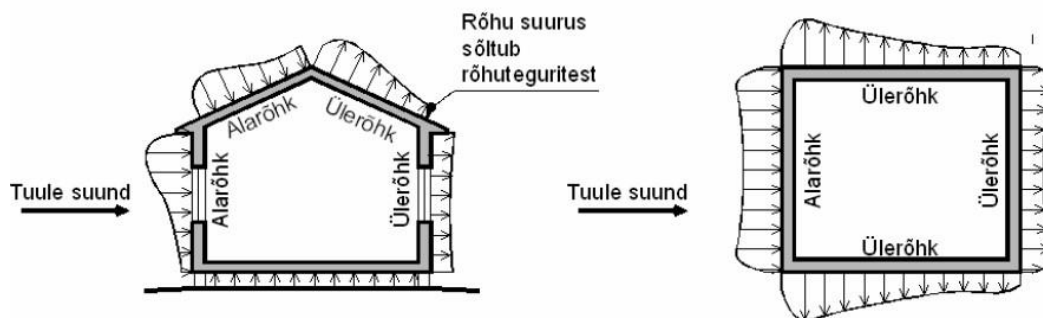
kus ΔP_w – tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevus, Pa,

μ – rõhutegur, (ilma ühikuta)

ρ – õhutihedus (välisõhk), kg/m³,

v – tuule kiirus, m/s.

Rõhutegur loetakse positiivseks, kui see on suunatud pinna poole (tuule surve), ja negatiivseks, kui see on suunatud pinnast eemale (tuule imemine) [9].



Joonis 5.2.1 Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevus hoone lõikel (vasakul) ja plaanil (paremal) [1]

Füüsika seaduste põhjal on võimalik öelda, et kõrguse tõustes langeb ka rõhk. Ehk õhk muutub hõredamaks ning sama protsess toimub ka hoone sees ning sise- ja välisrõhkude vahe on nullilähedane. Andurite kasutamisel ja õhurõhu mõõtmisel on kindlaks tehtud, et iga 10 meetri kõrguse tõusuga langeb rõhk 1mb (millibar). [23]

Kasutades valemit 2.4, kus õhutihedus on 1,225 kg/m³ ja rõhutegur on vastavalt 0,08 [26, Tabel 1].saame järgnevad tulemused. Need väärtused kehtivad 3 meetri kõrguselt, mis vastab enamiku mõõdetud majade- ja korteritevahelistele korrustele.

Praktiliselt vajaliku ja teoreetiliselt vajaliku õhuhulga suhet nimetatakse liigõhuteguriks. Liigõhuteguri väärtus võib olla muutuv vastavalt sellele, mis kütusega täpselt on tegemist ning olemasolevatest põlemise tingimustest ja võimalustest. Vastavalt nendele näitudele võib liigõhutegur olla 1,1 kuni 1,5, tahke kütuse puhul suurem ja gaasilise ning tolmkütuse puhul väiksem [14]. Puit kütuse puhul arvestada liigõhuteguriks 1,5 [16].

Liialt väikese liigõhuteguri korral võib tekkida mittetäielik põlemine ja vingugaas, mille iga protsent suitsugaasis põhjustab kadu 3-7% kütuse soojusest. Vajalikust suurema õhukoguse andmine põhjustab aga asjatut soojusekulu liigõhu kuumendamiseks, mille tagajärjel põlemistemperatuur langeb. Väljudes koos põlemissaadustega, viib liigne õhk endaga kaasa osa soojusest vähendades sellega ahju ökonoomsust [14].

2.3.3 Kamina efektiivseks tööks vajaliku õhuhulga arvutusmeetodid

2.3.3.1 A. Kulli lisaõhu Teooria

Teoreetilise põlemisõhu arvutuseks on vajalik teada tahke kütuse põlevaine ligilähedast koostist (vt tabel 2.6).

Tabel 2.6 Tahke kütuse põlevaine ligilähedane koostis % [8]

Kütus	C	H	O	N	S
Puit	48-50	6 - 6,5	38 - 43	0,5 - 2,5	0,05

1kg kütuse põlemise jaoks teoreetiliselt vajalik õhu mahuline kogus normaaltingimustel avaldub valemiga 2.7 [17]:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S_{o+pt}) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t \quad (\text{Valem 2.7})$$

kus V^0 – põlemiseks vajalik teoreetiline õhukogus, m³/kg,

C^t – süsiniku osakaal tahkes kütuses, %,

S^t – väevli osakaal tahkes kütuses, %,

H^t – vesiniku osakaal tahkes kütuses, %,

O^t – hapniku osakaal tahkes kütuses, %. Praktiliselt vajalik õhuhulk leitakse valemiga:

$$\lambda = C \rightarrow V = \lambda \cdot V_0 \quad (\text{Valem 2.8})$$

kus V – praktiliselt vajalik õhuhulk, m^3/h ,

λ – liigõhu tegur, -,

V^0 – teoreetiliselt vajalik õhuhulk, m^3/h .

Teisalt on Saksa teadlane Jürgen Kollmann eelmainitud teadusartiklis „Regelwerke für den Hafner, Umfassender Überblick sowie praktische Bedeutung am Beispiel Luftzufuhr“ leidnud, et minimaalne keskmine õhuhulk, mis on vaja 1 kilogrammi puitmaterjali põletamiseks ühes tunnis, on 4 m^3 . Samuti leiab teadlane, et peab arvestama samuti liigõhuteguriga, milleks on eeltoodud artikli järgi 3. See on 2-kordne erinevus Arvo Kulli leitud liigõhu tulemusest. See teeb 1kg puitmaterjali põletamiseks vajalikuks õhuhulgaks 12 m^3 . Lõputöös on seatud hüpotees, et Eestis põhiliselt kasutatavate küttepuude puhul, milleks on kask, lepp, saar ja mänd, on liigõhutegur väiksem.

2.3.3.2 Paraschivi lisaõhu Teooria

Puitmaterjali põlemisel kuluvat õhuhulka on uurinud ka Läti teadlased Lizica Simona Paraschiv, Alexandru Serban ja Spiru Paraschiv. Nende teadlaste töö "Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition", mis Eesti keelde tõlgituna on „Tahkekütuste (kivisüsi / biomass / tahked jäätmed) põletamiseks vajaliku põlemisõhu arvutamine ja suitsugaaside koostise analüüs“, seletab põlemisõhu arvutuse teistsuguseid põhimõtteid, arvestades hapniku ja muude osakeste osakaaluga põlemisõhus. Seda osakaalu on aga raske täpselt määratleda, eriti arvestades teadmatust, kas põlemisõhu osakeste osakaalu tuleks võtta kamina ees olevast õhust või juba kaminasuus olevast õhust.

Töös tuleb välja, et 1 kilogrammi kasepuidu ahjus põletamiseks vajaliku õhuhulga arvutamiseks võib kasutada täielikuks põlemiseks stöhhiomeetrilist õhu ja kütuse suhet. Stöhhiomeetriline suhe on täiuslik õhu ja kütuse tasakaal, mis on vajalik täielikuks ja tõhusaks põlemiseks. Puidu puhul on stöhhiomeetriline õhu ja kütuse suhe ligikaudu 5,7:1, mis tähendab, et täielikuks põlemiseks on vaja 5,7 korda suuremat õhumassi kui kütuse massi.

Õhukoguse arvutamiseks on vajalik järgnevalt arvatatud õhumass:

$$m_{\text{õHK}} \text{ (kg)} = m_{\text{KÜTUS}} \text{ (kg)} \times \delta \text{ (õhu ja kütuse suhe)} \quad (\text{Valem 2.9})$$

$$m_{\text{õHK}} = 5,7 \text{ kg (õhku)}$$

Teisendame õhumassi õhumahuks. Õhumassi mahuks teisendamiseks peab teadma õhu tihedust ning temperatuuri ja rõhku, mille juures arvutus teha. Õhu tihedus standardtingimustes (0 °C ja 1 atmosfäär rõhu juures) on ligikaudu 1,225 kg/m³.

$$V_{\text{õHK}} \text{ (m}^3\text{)} = m_{\text{õHK}} / \rho_{\text{õHK}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (\text{Valem 2.10})$$

$$V_{\text{õHK}} = 5,7 \text{ kg} / 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{õHK}} \approx 4,653 \text{ m}^3$$

Arvestades, et korraga pannakse ahju 4 kg puid ning see kogus puitu põleb hinnanguliselt üks tund, siis saame, et 4 kg kütuse jaoks on vaja 18,612 m³ õhku ja see teeb 18,612/3,6 = 5,17 l/s lisaõhku 4kg kütuse kohta. Kui arvestada, et majas kasutatava ahju nominaalne soojuseraldus on 6 kW, saab näitena tuua ühes mõõdetavas korteris (Nisu 1, Tallinn) olnud Romotopi kaminat ALEDO, mis põletab ühe tunni jooksul keskmiselt 1,64 kg puitu. Sellisel juhul on ühetunnise põlemisprotsessi tarbeks vaja 1,64 kg/h · 7m³ = 11,48 m³ õhku.

Probleemi saaks lahendatud, kui hoone välisseina paigaldada klapid - värskeõhu klapid. Teisest poolest on värskeõhuklapp aga vägagi energiakulukas, eriti juhul, kui õhuvoolu kinni ei saa keerata. Hea ja juba ka kasutuses olev lahendus on tuua kaminale toa ventilatsioonist sõltumatu kanal või paigaldada korteri- või eraelamusse ventilatsiooni agregaat, millel on võimalik eraldi välja seadistada režiim, kui kamin töötab. Sellise režiimi korral võiks näiteks sissepuhke õhuvooluhulk suurenda ja väljatõmbe õhuvooluhulk jääks normaaltasemele, või teine variant, sissepuhke õhuvooluhulk jääb normaalrežiimile ja väljatõmme töötab minimaalsel režiimil [15].

Kui õhupidavas hoones siiski tulekoldes süttib tuli, siis mõne hetke pärast valitseb siseruumides alarõhk kuna puudub põlemisprotsessi jaoks vajalik õhu juurdevool. Koldeukse avamisel tekib probleem, millega põlemis- ja suitsugaasid tungivad hoonesse sisse, see on tingitud sellest, et toas olev rõhk tahab võrdsustuda väljas oleva rõhuga [15].

Loomuliku ventilatsiooni puhul võib tekkida olukord, kus muidu töötav väljatõmbetorustik töötab peale tule süütamist sissepuhketorustikuna. Ning kui suitsulõõr asub lähestikku väljatõmbetorustikuga, siis tekib olukord, et hoonest välja juhitud suits tõmmatakse uuesti hoonesse sisse väljatõmbetorustiku kaudu. Sarnane olukord võib tekkida ka, kui kahe kamina korstnad on kõrvuti. Ühes kaminas tehakse tuld. Teises kaminas ei tehta tuld, aga selles elamus töötab kompenseerimata köögikubu, mis hakkab läbi kamina suitsulõõri elamusse sisse tõmbama kompensatsiooni õhku, mis aga on tegelikult kõrvalkorteri korstnast väljuvad suits- ja vingugaas. Selliste probleemide ära hoidmiseks ongi vajalik, et hoones valitseksid neutraalsed rõhutingimused tulekolde põlemisprotsessi ajal. Küttekolle, mis võtab põlemisõhu ümbritsevast ning sellega seotud ruumidest, saab töötada probleemivabalt, kui seadme töötamise käigus ei suurene rõhuvahe üle 4 Pa [15].

2.3.3.3 Spiridonovi lisaõhu Teooria

Washingtoni ülikooli teadusliku kirjutise „Energy and Environment II“ teksist tuleb välja kolmas variant, kuidas tänu põlemisprotsessis mõõdetud osakeste arvule saab välja arvutada õhu ja kütuse vahelise suhte eri tüüpi kütuste puhul. Kõigepealt arvestatakse põlemisvõrrandi keemilise osaga sarnaselt A. Kulli teooriale, kus seekord arvestatakse ka puidus olevat niiskuse osakaalu[23].

$$\begin{aligned} & C_6H_9O_4 + mH_2O + (1+EA)(6+9/4-4/2)O_2 + 3.773(1+EA)(6+9/4-4/2)N_2 \text{ p=} \\ & = 6CO_2 + (9/2+m)H_2O + EA(6+9/4-4/2)O_2 + 3.773(1+EA)(6+9/4-4/2)N_2 \text{ (Valem 2.11)} \end{aligned}$$

Õhu ja kütuse suhte leidmiseks ja antud valemi loomisel on arvestatud kasepuuga, mille niiskus jääb 30% juurde. Katsest tuleb välja, et õhu ja kütuse vaheline osakaal on $\tilde{O} = \tilde{O}/K$ (K).

$$V = P_{KAMIN} / \tilde{O} * K \quad \text{(Valem 2.12)}$$

Kus:

- V : Vajalik õhukogus põlemiseks
- P_{KAMIN} : kamina soojusvõimsus kW-des.
- \tilde{O} : soovitud õhu ja kütuse suhe (arvestatud välja varasemalt).
- K: põletatava puidu kütteväärtus.

Species	kmols	kg
Reactants		
Wood (dry)	1	$6 \times 12 + 1 \times 9 + 4 \times 16 = 145$
Moisture in Wood	$43.5/18 = 2.417$	30% of 145 = 43.5
Oxygen	$1.5 \times (6 + 9/4 - 4/2) = 9.375$	$9.375 \times 32 = 300$
Nitrogen	$3.773 \times 9.375 = 35.372$	$35.372 \times 28.15 = 995.7$
Total Reactants	48.164	1484.2
Products		
CO ₂	6	$6 \times 44 = 264$
H ₂ O	$9/2 + 2.417 = 6.917$	$6.917 \times 18 = 124.5$
O ₂	$0.5 \times (6 + 9/4 - 4/2) = 3.125$	$3.125 \times 32 = 100$
N ₂	35.372	995.7
Total Products	51.414	1484.2

Joonis 2.1 Puitmaterjali põlemisarvutuse keemiline tabel [23]

Kasutame Lizica Simona Paraschivi, Alexandru Serbani ja Spiru Parachivi loodud valemit, mis on mõeldud vajaliku õhuhulga arvutamiseks puitkütuse põlemisel. Antud valem arvestab põletatava ahju võimsusega kilovattides, õhu ja kütuse osakaalusid ning kasutatava puitkütuse väljastatavat energiat. (valem 2.12)

Eesti metsaühistu Timber andmetel on allpool toodud Eestis enimlevinud puuliikide kütteväärtused kWh kohta:

- Lehtpuud (kWh kuupmeetri kohta):
 - Tamm: 2200 - 2400 kWh/m³
 - Hickory: 2400–2600 kWh/m³
 - Vaher: 1700 - 2000 kWh/m³
 - Kirss: 2000–2400 kWh/m³
- Okaspuit (kWh kuupmeetri kohta):
 - Mänd: 1200 - 1600 kWh/m³
 - Kuusk: 1200 - 1400 kWh/m³

Riigiteataja andmetel on segapuidule määratud kütteväärtuseks 1300 kWh/m³ ning kasepuu puhul 1500 kWh/ m³. Neid väärtusi kasutatakse ka põlemisõhu valemis.

Õhu ja kütuse suhte leidmiseks ja antud valemi loomisel on arvestatud kasepuuga, mille niiskus jääb 30% juurde. Katsest tuleb välja, et õhu ja kütuse vaheline osakaal on $\ddot{O}hk (\ddot{O})/Kütus (K)$.

2.3.4 Infiltratsioon

Infiltratsioon viitab kontrollimatule õhuvahetusele hoone sise- ja välispinna vahel. See vahetus toimub ebatiheduste, pragude ja muude avade kaudu hoone välispiiretes, nagu aknad ja uksed. Infiltratsioonil võib olla hoonele mitmeid negatiivseid mõjusid, sealhulgas energiakulude suurenemine, halb siseõhu kvaliteet ja elanike mugavuse vähenemine.

Siiski on saadaval lahendusi infiltratsiooni kõrvaldamiseks ja hoone üldise toimimise parandamiseks. Infiltratsiooni suurus sõltub hoone välispiirete pindalast, õhupidavusest, õhulekkekohtade paiknemisest, rõhkude erinevusest kahel pool piiret, ventilatsiooni õhuvooluhulkade tasakaalust, kasutatud materjalide omadustest ning väliskeskkonna tingimustest.

On mitmeid tegureid, mis võivad hoonetesse imbumist soodustada. Nende hulka kuuluvad:

- 1) Tuul - tuul võib hoone välispiirde vahede ja avade kaudu õhku hoonesse suruda.
- 2) Temperatuurierinevused - temperatuurierinevused hoone sise- ja välistingimustes võivad tekitada rõhuerinevusi, mis võivad põhjustada õhu imbumist.
- 3) Õhu raskus - soe õhk tõuseb üles, luues negatiivse rõhu hoone allosas ja positiivse rõhu ülaosas. See rõhuerinevus võib põhjustada infiltratsiooni.
- 4) Mehaanilised süsteemid - mehaanilised süsteemid, nagu väljatõmbeventilaatorid ja HVAC-süsteemid, võivad tekitada rõhu tasakaalustamatust, mis võib põhjustada infiltratsiooni.

Hoone infiltratsiooni saab arvutada valemiga:

$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6 \times x} \quad (\text{Valem 2.13})$$

kus q_i – infiltratsiooni õhuvooluhulk, l/s,

q_{50} – õhulekkearvu baasväärtus, m³/h·m²,

3,6 – tegur, mis teisendab õhuvooluhulga m³/h ühikust l/s ühikuks, -,

x – kokkuleppeline tegur, mis ühekorruselisele hoonele on 35, kahekorruselisele hoonele 24 ning kolme- ja neljakorruselisele hoonele 20, viie- ja enamakorruselisele hoonele 15, kusjuures korruse kõrgusena on arvestatud 3 meetrit ja korruselise määramisel arvestatakse üksnes maapealsete korrustega, -,

A – hoone välispiirde sisepindala (põrand, seinad, lagi), m^2 .

Hoone aastast keskmist infiltratsiooni õhuvooluhulka on võimalik leida ka valemiga 2.14, milles on hoone korruselisusest tulenev tegur. Antud valemis sõltub infiltratsioon õhulekkearvust ja korruselisusest.

$$q_i = \frac{n_{50}}{x} \quad (\text{Valem 2.14})$$

kus

q_i – infiltratsiooni õhuvooluhulk, 1/h,

n_{50} – õhulekkearv, 1/h,

2.4 Siseõhu kvaliteedi reguleerimine Eestis

Eesti õigusaktid on seni keskendunud peamiselt eluruumide füüsilistele nõuetele, nagu müra, ventilatsioon ja ruumi mõõtmed, ning mikrokliima nõuetele, sealhulgas õhuniiskusele ja õhutemperatuurile. Kuid pole veel kehtestatud ühtset õigusakti, mis reguleeriks kõigi õhus levivate saasteainete ja osakeste piirnorme.

Õhus levivad osakesed (Particulate Matter, PM) varieeruvad suuruse ja keemilise koostise poolest. Need jagunevad erinevatesse kategooriatesse vastavalt nende suurusele (väiksemad kui 2,5 µm, väiksemad kui 10 µm). Nende keemiline koostis võib olla mitmekesine, ulatudes tahketest ainetest, nagu räni ja raskmetallid, kuni vedelate komponentideni. Osakeste kontsentratsioon nii sise- kui ka välisõhus on muutlik, erinedes teiste saasteainete püsivatest kontsentratsioonidest. Nende tekkeallikaid on mitmeid, sealhulgas teetolm, sõidukite pidurite ja rehvide kulumine, kütteprotsessid, õietolm ning erinevad tööstuslikud protsessid.

Määruse "Hoonete sisekliima ja õhutuse nõuded" (tööversioon 30.06.2015) seisukohalt ei tohi peenosakeste kontsentratsioon ruumi õhus 24 tunni jooksul mõõdetuna ületada 50 µg/m³ PM₁₀ osakestele ja 25 µg/m³ PM_{2,5} osakestele. Need piirnormid on olulised, et tagada siseruumides viibivate inimeste tervise ja heaolu kaitse õhus levivate saasteainete eest.

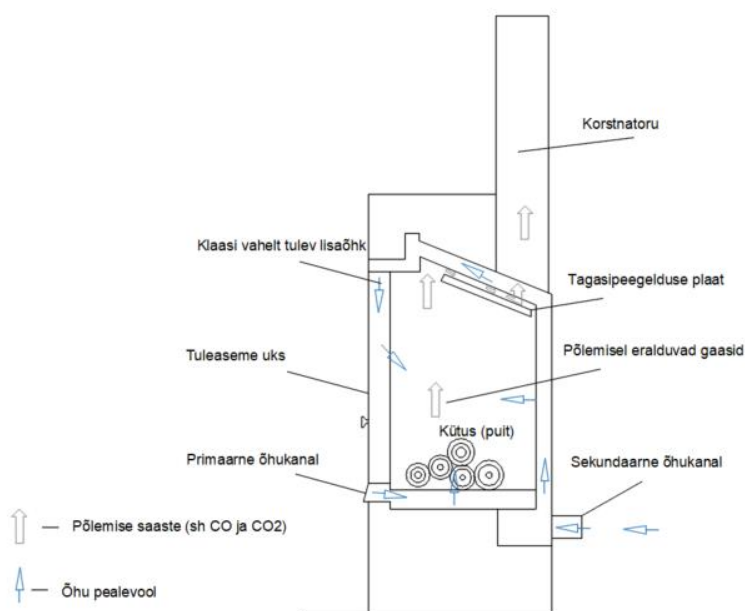
2.5 Kompleks katse – Kukeseene 4, Pärnu

Kukeseene 4 elumajas viidi läbi õhuvooluhulkade reguleerimine, et saada detailset teavet kamina õhuvajaduste kohta erinevates olukordades. Selle eesmärgi saavutamiseks rakendati mitmeid mõõtmismeetodeid, sealhulgas peenosakeste mõõtmist ja rõhumõõtmisi. Katse hõlmas ala- ja ülerõhuteste, küttekolde süütamist ning erinevate ventilatsioonirežiimide kasutamist, et uurida kamina tööpõhimõtteid.

Peenosakeste mõõtmiseks kasutati spetsiaalset Dust-trak seadet vastavalt tabelis 2.4 esitatud parameetritele. Alarõhu- ja ülerõhutestide jaoks kasutati BlowerDoor ventilaatorit ning rõhuseadmeid, näiteks Dwyer Magnesense seadmeid, kogu protsessi jälgimiseks ja dokumenteerimiseks.

Kamina põlemisel kasutatava õhuhulga hindamiseks mõõdeti SwemaFlow seadmega kaminasuust sisenevat õhuhulka. Eluruumides, kus katse toimus, määrati sissepuhe ja väljatõmme vastavalt 50% ja 55% tasemele vastavalt tavapärasele olukorrale. Käesolevates katsetes analüüsiti ka köögikubu töö potentsiaalset mõju kamina efektiivsusele ja selle õigele toimimisele

Kasutati 3,5 kg lepalhalge, mille niiskussisaldus mõõdeti enne kasutamist, leides keskmiselt koorelt 12% ja lõikeosast 7% niiskust. Kasutatava ahju, Tulikivi TU1450/1, tehnilised spetsifikatsioonid olid kättesaadavad Tulikivi ametlikul kodulehel.



Joonis 2.2 Kamina tööpõhimõtted

3 Tulemused

3.1 Tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevused

Kasutades valemit 1.5.1 arvatati välja tuule poolt tekitatud rõhkude erinevused kindlate tuulekiiruste juures.

Tabel 3.1 Tuule kiirusest põhjustatud õhurõhkude vahet sise- ja välisruumides

Tuule liikumiskiirus v (m/s)	Tuule tekitatud rõhkude erinevus ΔP_w (Pa)
5	1,2
6	1,728
7	2,352
8	3,072
9	3,888
10	4,8
11	5,808
12	6,912
13	8,112
14	9,408
15	10,8
16	12,288
17	13,872
18	15,552
19	17,328
20	19,2

Tabel 3.1 näitab tuule kiirusest põhjustatud õhurõhkude erinevust sise- ja välisruumide vahel. Arvutuste tulemusel on keskmine õhurõhu vahe ühe- kuni kahekorruseliste era- ja korterelamute puhul järgmine: 5 m/s tuule kiiruse juures on rõhuerinevus 1,2 Pa, 10 m/s tuule puhul on see 4,8 Pa ning 15 m/s tuulepuhanguga tõuseb rõhuerinevus sise- ja välisruumides juba 10,8 Pa-ni. Saadud tulemused annavad aimu rõhumõõtmisel tekkinud suurtematest rõhuvahedest

3.2 Põlemiseks vajaliku õhuhulgad

3.2.1 Tulemus 1

Saame arvutada 1 kg tahke kütuse (Puit) põlemise protsessiks vajaliku teoreetilise õhuhulga toetudes valmle 2.3.3.1 ning arvestades kütuse (Puidu) maksimaalsetel ligilähedaste osakeste koostistega:

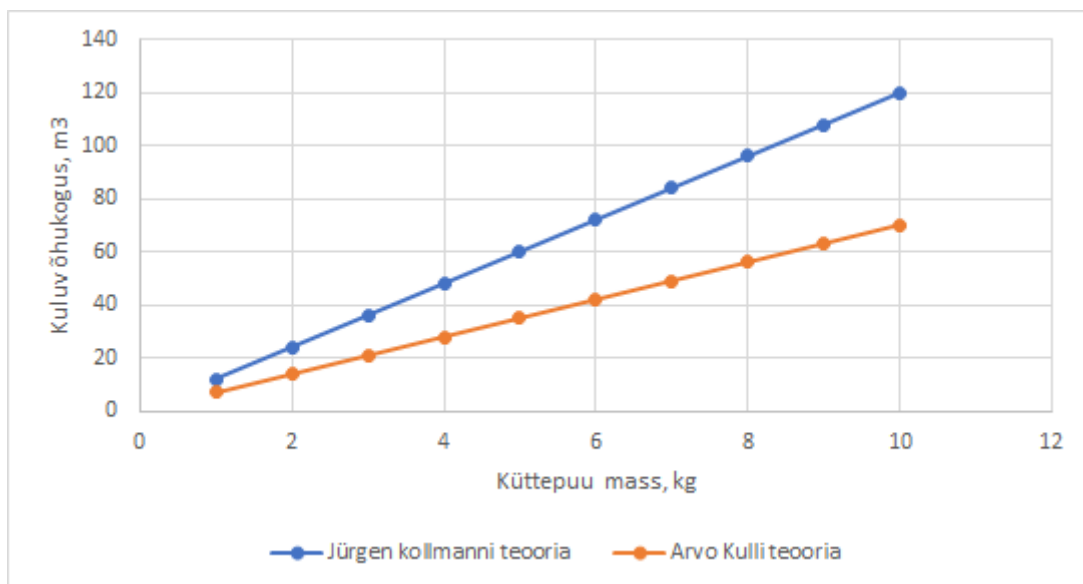
$$V^0 = 0,0889 \cdot (50 + 0,375 \cdot 0,05) + 0,265 \cdot 6,5 - 0,033 \cdot 43 = 4,71 \frac{m^3}{kg}$$

Praktiline õhuhulk, mida on vaja 1 kg puitmaterjali põletamiseks on Arvo Kulli teooria järgi seega:

$$V_{\text{Arvo Kull}} = 1,5 \cdot 4,7 \approx 7m^3$$

Praktiline õhuhulk J. Kolmanni teooria järgi on järgmine:

$$V_{\text{Arvo Kull}} = 3 \cdot 4 \approx 12m^3$$



Graafik 3.2 Põlemisele kuluva õhukoguse korrelatsioon puidu massiga

Antud valem ja tabel näitavad, et 1kg puitmaterjali (niiskusega 20%) põletamiseks vajalik õhuhulk on 7 m³ või 12 m³ [18]. Seega kui põletada kaminas ära 5 kg puitu, siis kulub selleks protsessiks ligikaudu 35 m³ kuni 60 m³ õhku, mis peab hoone ebatiheduste kaudu sisse pääsema.

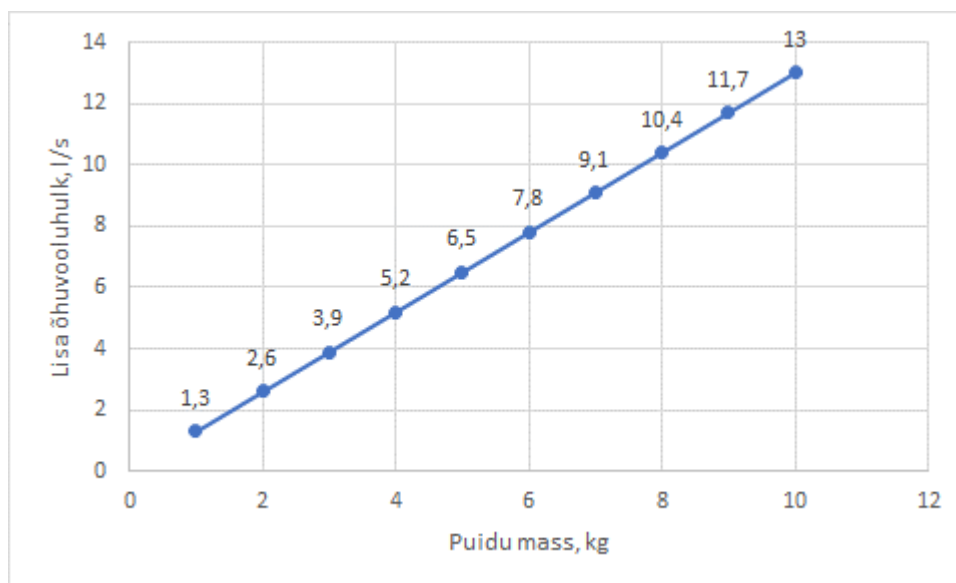
3.2.2 Paraschivi lisaõhu arvutusmeetod

Toetudes valemile 2.10 saame järgmise tulemuse:

$$V_{\text{õHK}} = 5,7 \text{ kg} / 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{õHK}} \approx 4,653 \text{ m}^3$$

Seega kuluks 1 kilogrammi kasepuidu täieliku põlemisega ahjus põletamiseks ligikaudu 4,653 kuupmeetrit õhku, mis teisendatuna on 1,3 l/s. Tuleb nentida fakti, et arvutus on lihtsustus ja ei võta arvesse puidu niiskusesisalduse, ahju efektiivsuse või muude tegurite, mis võivad tegelikku põlemist mõjutada, erinevusi. See annab teoreetilise hinnangu, mis põhineb puidu põletamise stöhhiomeetrilisel õhu ja kütuse suhet arvestades

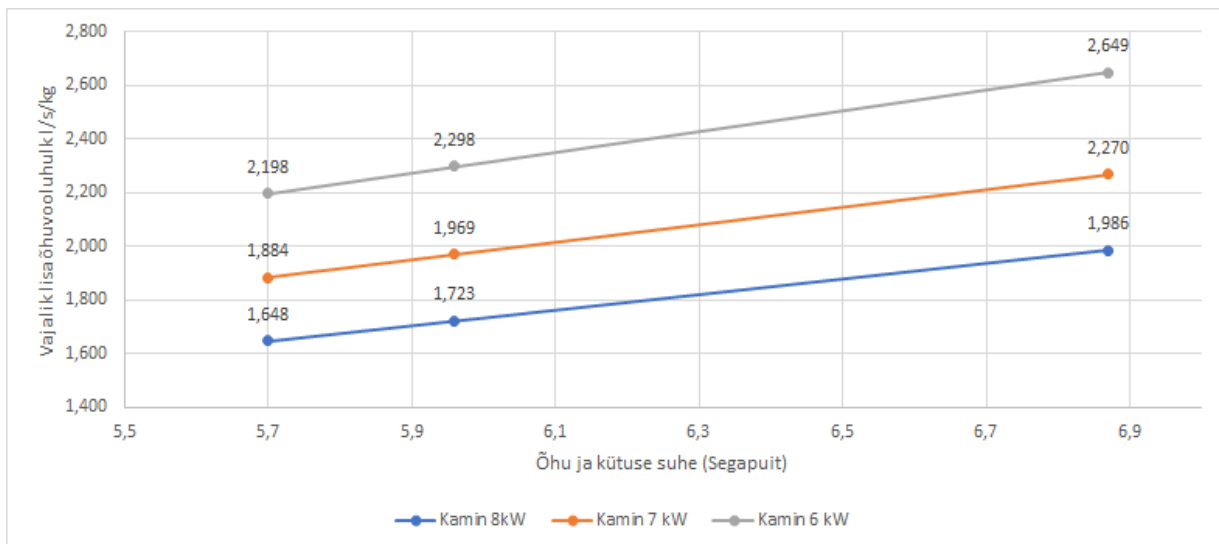


Graafik 3.3 Paraschivi vajaliku lisa põlemisõhu teooria

Graafikult 3.3 näeb ära Paraschivi teooria järgi vajalikud lisaõhu kogused. Kui põletada korraga 5 kg puitu, siis oleks eelnimetatud teooria järgi vaja 6,5 l/s lisaõhku. Kukesene 4 maja ventilatsiooniagregaadi näitel oleks see 9,5% seadme maksimaalsest õhuvooluhulgast.

3.2.3 Spiridonovi lisaõhu arvutusmeetod

Võttes arvesse valemit 2.11, siis õhu ja kütuse suhe $\ddot{O}/K = (300+995,7)/(145+43,5)=6,87$, kui puit on 30% niiskusega. Kui aga arvestada arvutustel kuiva puiduga, mille niiskustase jääb 12% juurde, siis on valem $\ddot{O}/K = (300+995,7)/1,5/145 \approx 5,96$



Graafik 3.4 Põlemiseks vajaliku lisaõhu suurendamine efektiivseks põlemisprotsessiks eri võimustega kaminatega puhul

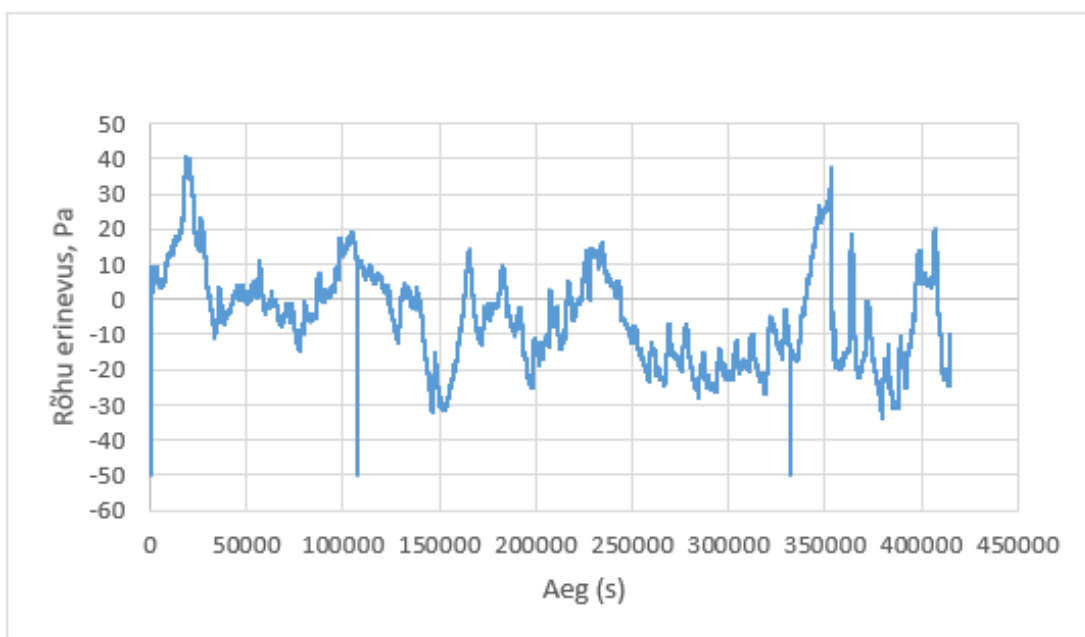
Eeltoodud valemi 2.12 järgi arvatud vooluhulgad ühe kilogrammi põletatava puitmaterjali kohta on toodud graafikus 3.4. Võttes 6 kW kamina tuleb vajalik vooluhulk keskmiselt 2,382 l/s/kg puidu kohta. 7 kW kamina puhul 2,042 l/s/kg kohta. Graafikult 3.4 on näha, et mida suurem on korteri ruumala, seda suurem on kamin ja seda rohkem õhku saab kamin kätte ruumiõhust.

Lisas 1 on välja toodud saadud tulemuste keskmisega Tabel, milleks on 2,07 l/s/kg puidu kohta.

3.3 Renoveerimata korter ja eraelamud

3.3.1 Mäe 4, Võru

Antud korteris olid fassaadil näha ventilatsiooniavade katted, mis antud maja puhul töötasid kui värskeõhu klapid. Tuleb nentida ka fakti, et korterites olid kõik ventilatsiooniavad täidetud raamatu lehtede ja õliga kaetud riidetükkidega, sest vastasel juhul olid elanike korterid liiga külmad ja kaevati ka tuuletõmbuse üle. Mõõdetud korterit kasutati igapäevase elukohana. Mehhaanilist ventilatsiooni antud kortermajal pole välja ehitatud.



Graafik M4.1 Mäe 4 rõhuerinevuste graafik (Väljavõte HOBOWare programmist)

Graafikult on keeruline täpseid keskmisi väärtusi välja lugeda, sest muutusi on palju. Suurema osa ajast muutub sise- ja väliskeskkonnavahe rõhk 10 Pa raames, kuid on näha ka suuremaid kõikumisi, kui tekib ligikaudu 30 Pa alarõhku. Elaniku poolt antud kütmise ajad langevad kokku graafikul märgitud aegadele.

Köögikubu on antud korterelamus vähese kasutusega sellega kaasneva energiakulu tõttu – esmajärgus avatakse ebameeldivate lõhnade tekkimise tagajärjel aknad nii köögis kui elutoas, mis võib seletada ka järkusid rohkuse tõususi. Teisi kõikumisi graafikul saab seletada suure tuulega. Novembri saabudes koos külmade ilmadega jäeti ahi põlema ka terveks ööks, sealjuures öösel ahju täites. Seda on näha ka graafikul M4.1

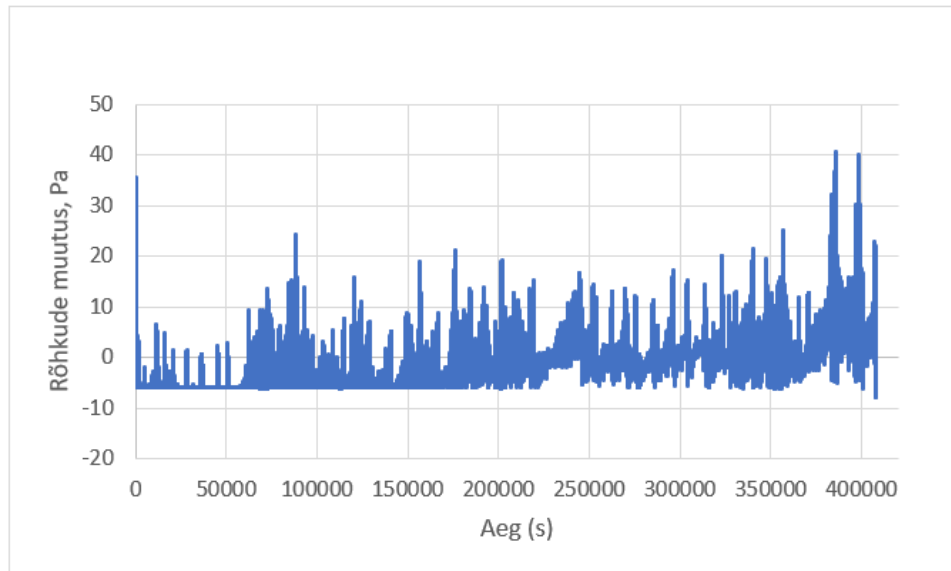
3.3.2 Kreuzwaldi 25a

See 2-korruseline poolkelpkatusega puidust korterelamu on üks võru vanimaid ehitisi, pärinedes 18 sajandi lõpust. Maja oli väga halvas seisukorras ja oli näha, et suuremaid uuendusi ei koridori ega korteri poole pealt tehtud ei oldud. Ehitisel puudus igasugune ventilatsioon, ka värskõhuklappe polnud näha. Õhutamisvarianti polnud korterites ka akende näol. Kõik akna ümbrused, raamid ja lahtikäivad osad on soojuskadude vähendamiseks tihendatud liimteibiga nii seest kui väljast.

Kütmine toimub antud korteris elutoa keskel asuva kaminaga, mille külje all asub ka puiduküttega pliit. Nagu pildilt näha, siis ka aknavahed on täidetud vatiga, et hoida vahed ja avatäited soojana.



Joonis 3.3.1 Akende soojapidavuse parandamismeetodid



Graafik 3.5.2 Rõhugraafik

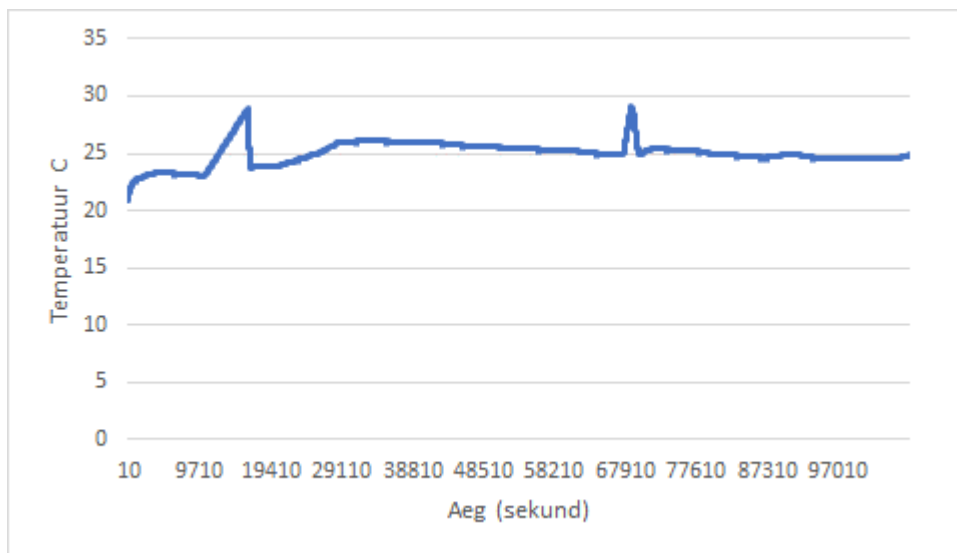
Kreutzwaldi 25 maja graafiku järgi on ööpäevas keskmiselt 2 ja 6 Pa vahelised rõhkude erinevus sees ja väljas. Kütmisprotsessi käigus läheb rõhkude erinevus ligilähedale 7-12 Pa. Graafiku ja elaniku antud informatsiooni järgi toimub kütmine iga päev ühe korra, vahel küttematerjali lisades. Tegemist oli käsitöö telliskiviahjuga, mis oli kaetud saviplaatidega.

Keskmiselt lisati ühe kütiskorra puhul 4 kuni 5 kg puitu (täpne liik teadmata). Graafikult KW25.1 on näha, et detsembri saabudes muutuvad kütmise ajal rõhuvahed suuremaks, mis tähendab, et intensiivse põlemisprotsessi tarbeks on vaja rohkem õhku. Alarõhku tekitab antud maja puhul kütmine ning ülerõhku suur tuul välistarindi juures. Kuna rõhulangused ja -tõusud on võrdlemisi sarnased ja ühtlased, siis on näha ka seda, et põlemisõhu saamisega probleeme ei teki.

3.3.3 Karja 6

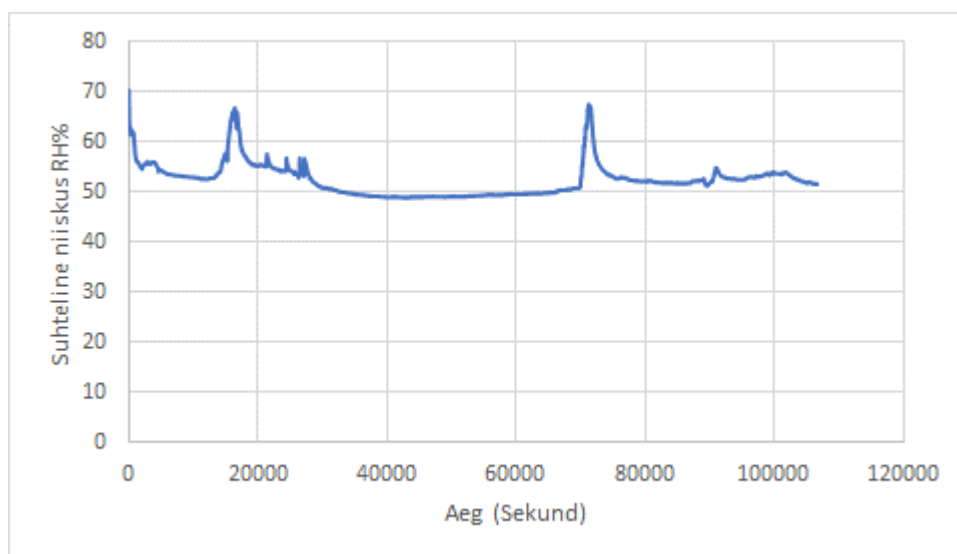
Karja 6 maja puhul on tegemist pooleldi tühjalt seisva kortermajaga, mille välisfassaad vajab juba nähtavasti palju tööd. Mõõtmiste tegemise hetkel elas hoones vaid üks pere, kes oli enda elamispinna hooneosa number 3 korda teinud ja elamiskõlblikuks ehitanud. Ventilatsioonisüsteem antud korteris puudub. Kuigi vanadesse korstnatesse, mis olid korda tehtud, olid eraldi lõõri jäänud vanad avad kinni pandud ja lõõr sisse kukkunud.

Elanikud kasutasid tubade ventileerimiseks aknaid. Antud korteris oli infiltratsioon sedavõrd suur, et kubu ja ahju koostöötamisel ei olnud probleemi ahjus tule põletamisega. Seadmed paigaldati kööki köögikapi kohale. Korterite kasutajate sõnul tekkis ahju põletamisega probleeme juhul, kui samal ajal köögis süüa teha, mis tähendab köögikubu sisselülitamist.



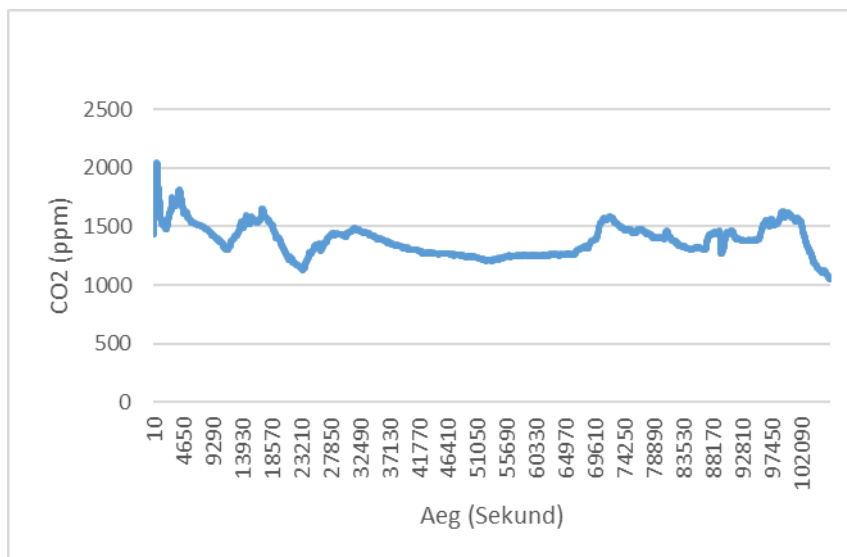
Graafik K6.1 Temperatuurigraafik

Temperatuurigraafikult K6.1 näeb ära kaks seadmele jäänud kütmisskorda, kui temperatuurid ruumis tõusevad tavalise 23°C asemel kuni 28,5°C-ni. Graafik näitab, et kütmisskordade vahe jääb 15 tunni juurde.



Graafik K6.2 Karja 6 Suhteline niiskus

Niiskus on Karja 6 elamus võrdlemisi kõrge. Arvestades, et tegemist on väikeperega ning aknaid avatakse konstantselt, on niiskus ruumides vägagi suur. Seda probleemi oli näha ka asjaolus, et mõõtmise algushetkel oli akendel kondents, mis küll polnud tekitanud puidust aknaraamidele hallitust, kuid mis suurendab hallituse tekke võimalust märgatavalt.

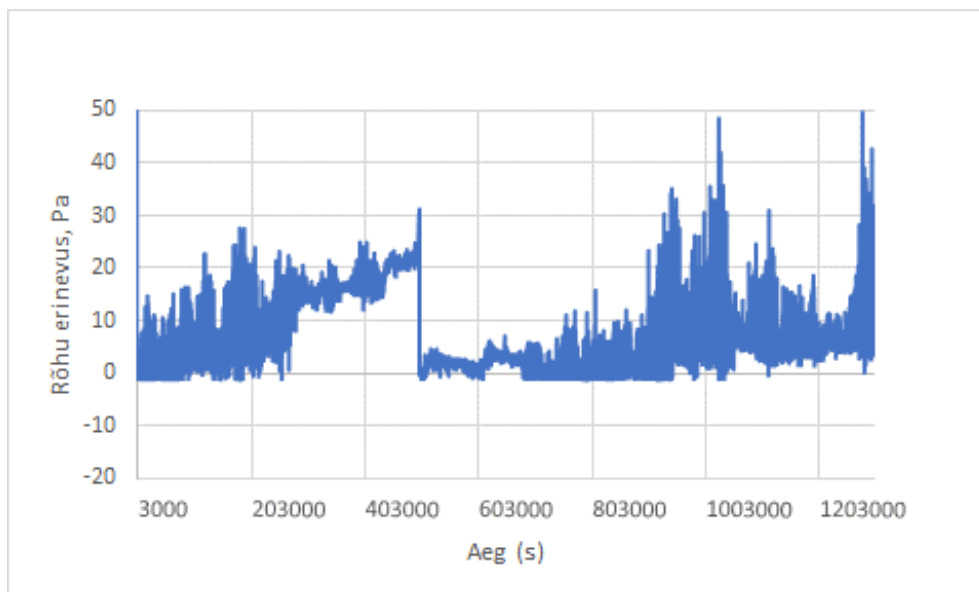


Graafik K6.3 Karja 6 CO2 konsentratsioon

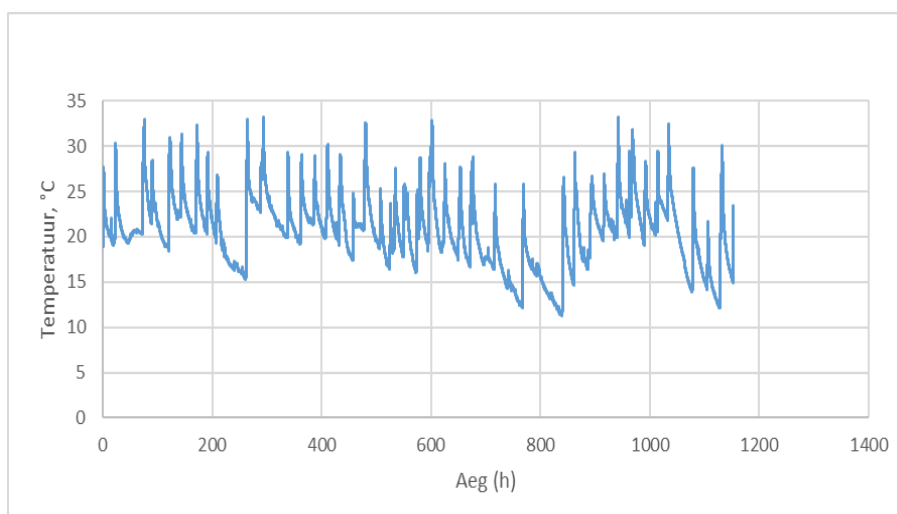
Karja 6 hoone puhul ei saanud kahjuks loetavaid rõhuandmeid seadme vea tõttu. CO2 konsentratsiooni graafikult on näha, et ventilatsioon majas puudub. Seda näitab asjaolu, et keskmiselt on ruumides 1300 ppm CO2 konsentratsioon, mis on piisavalt üle normi (500-1000ppm). Graafikult on näha, et kütmissprotsessi ajal on CO2 tasemed tõusnud. Üldiselt võib süsihappegaasi taseme tõusu selgitada suurema arvu inimeste viibimisega ruumis, kuna lisaks perele käis hoones pikemalt viibimas kaks laspehoidjat.

3.3.4 Liiva 9

Liiva 9 maja puhul on tegemist väga halvas seisus 3-korruselise kortermajaga, milles on mõõtmiste tegemise hetkel kaks üürniku – ülejäänud korterid on elamiskõlbmatud. Ka mõõdetav korter oli äärmiselt halvas seisus – ventilatsioon ja selle asendus puudusid, tuba oli umbne ja niiske ning tubade vahel olid. Antud korteris sai seadmed paigaldatud köögis asuva külmkapi ja akna lähedusse.



Graafik L9.1 Liiva tee 9 Rõhumuutuste graafik



Graafik L9.2 Liiva tee 9 Temperatuurigraafik

Antud hoone graafikul on nähtavad temperatuuri tõusude järgi ka ligilähedased kütmissajad, mida tehti iga päev, peamiselt päeva teises pooles. On näha, et rõhk tõuseb vahetult enne temperatuuri tõusmist märgatavalt. Suuremal osal päevadel on sise- ja väliskeskonna rõhuerinevused jäänud kütmise ajal 10 Pa piiridesse, kuid külmemal ajal, mis jääb graafiku L9.1 kohaselt novembrikuusse, on näha rõhkude suurenenud erinevust, mis jääb tipphetkel juba 25 Pa juurde. Arvestades, et ilmad läksid peale mõõteaega veelgi külmemaks, saab arvestada, et soojuskao ja külmasillad olid eriti suured. Liiva tee 9 hoone puhul on tegemist

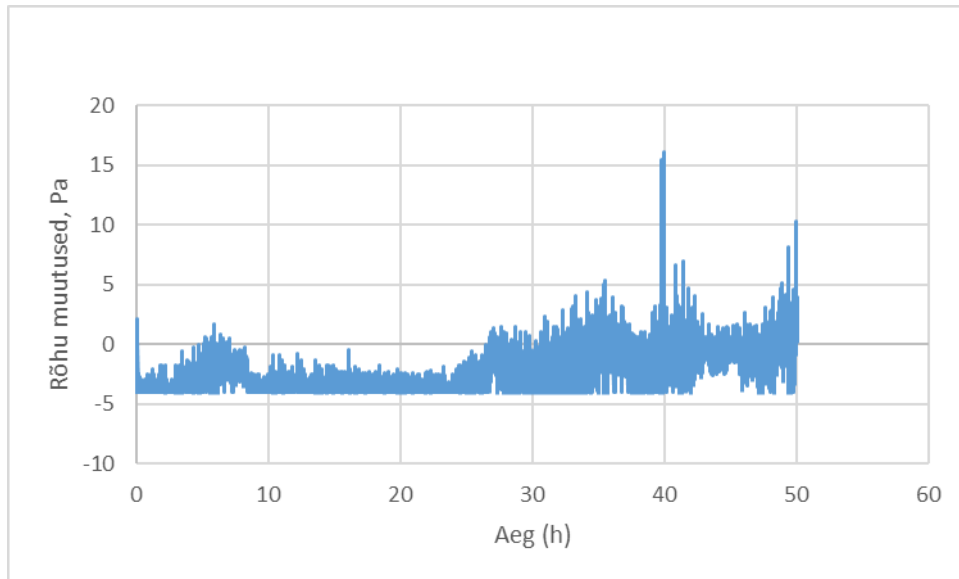
väikese moodulahjuga, kus küttepuid kulus ühes tunnis 4 kg. See teeb põlemiseks vajalikuks õhuhulgaks eeltehtud arvutuste järgi $4 \cdot 7 \text{ m}^3 = 28 \text{ m}^3$ õhku. Teisendatuna teeb see 7,8 l/s lisaõhku on vaja põlemisprotsessi efektiivseks toimumiseks. Kukesene 4 tehtud katsetus näitas aga, et 1 kg puidu põlemisel on vaja ligi 6,5 l/s lisaõhku, mis antud olukorras teeb 26 l/s ehk $93,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Kuna antud hoones õhulekkesti ei tehtud, siis saame seda võrrelda Taara 6 maja õhulekkestiga ning arvestada, et 25 Pa õhurõhkude erinevuse juures oleks õhuvajadus $1840 \text{ m}^3/\text{h} = 511,1 \text{ l/s}$. Normaalolukorras, ehk 4 Pa suuruse rõhkude erinevusega tõmmatakse läbi tarindi 145 l/s õhku. Erinevus on seega $511,1 - 145 = 366,1 \text{ l/s}$ – see on õhuhulk, mis tõmmatakse lisaks läbi tarindite.

3.3.5 Roosi 43

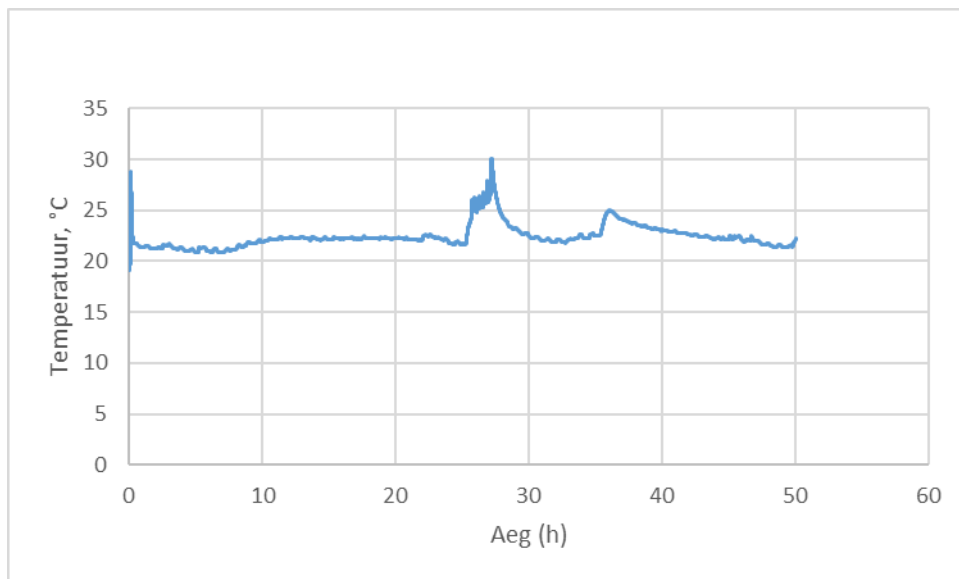
Antud hoonega on tegemist 1970ndatel ehitatud ühepere elamuga. Praegune omanik on lisanud majale sissepoole tihendatud PVC aknad, mis aitab vähendada akendest tulenevat õhuleket ja külmasildasid. Samuti on Roosi 43 majas tehtud ümber kaminasüsteem, kus on kamina konstruktsioonile ehitatud juurde lisaõhu transportimiseks 2 lõõri. Nende lõõride sees paiknes ventilatsioonitoru, mida mööda liikus õhk kamina ette. Õhu sundliikumiseks on katusele paigaldatud ka ventilaatorid, mis hakkavad tööle siis, kui kamina hakkab kuum õhk liikuma. Ventilatsioonitoru oli lõõri paigutatud eesmärgiga vältida õhu lekkimist ruumi ebatiheda korstna kaudu ja tagada katusel võimalus liigutada õhuvõtt piisavalt kaugele kamina lõõrist.



Joonis 3.3.2 kamina õhuvajaduse saavutamine



Graafik R43.1 Roosi 43 Rõhumuutuste graafik



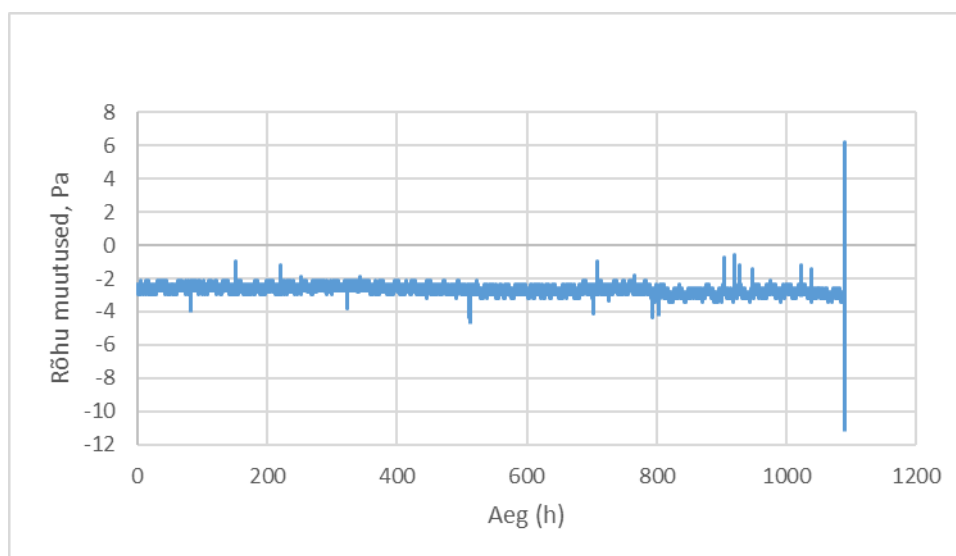
Graafik R43.2 Roosi 43 Temperatuurigraafik

Roosi 43 maja graafikul on temperatuurigraafikul näidatud temperatuurimuutused, kus on näha ka kahte kütiskorda, kui ruumis olev keskmine temperatuur tõuseb 22°C juurest ligi 30°C-ni või teise kütmise korral 25°C-ni. Rõhkude graafikult on selgelt näha lisaõhu kanalite toimimist, sest üldjuhul on hoone 4 Pa alarõhu all ning kütmisprotsessi alguses ja isegi intensiivse kütmisprotsessi käigus on näha, kui sissepuhke õhk tööle hakkab ja tekitab hoones ülerõhku 5

Pa. Samuti ei läinud rõhkude vahe üle 4 Pascali. 30-nda oktoobri varahommikul on rõhkude erinevus tõusnud hetkeks 10 Pa juurde, mis indikeerib, et väljas oli sel hetkel tugev tuul. Seda järeldame asjaolust, et samal hetkel kütmist ei toimunud. Kaminasüsteemis olevate õhutorude ventilaator suudab elaniku sõnul tekitada 30 l/s õhu pealevoolu kamina ette, mis tagab efektiivse ja murevaba töö kaminale.

3.3.6 Roosi 35

Roosi 35 maja puhul on tegemist 1965. aastal ehitud ühepereelamuga. Mõõdetud elamus oli paigaldatud ka Vallox150SE ventilatsiooniseade, mis jagas õhu ruumide vahel laiali. Nii õhuvõtt kui ka väljavise asusid hoone katusel. Elanikud ise pidasid hoonet küllaltki õhupidavaks, kuid akende vahelt oli varasemalt tulnud suures koguses külma õhku, mispärast suleti aknad jäädavalt.



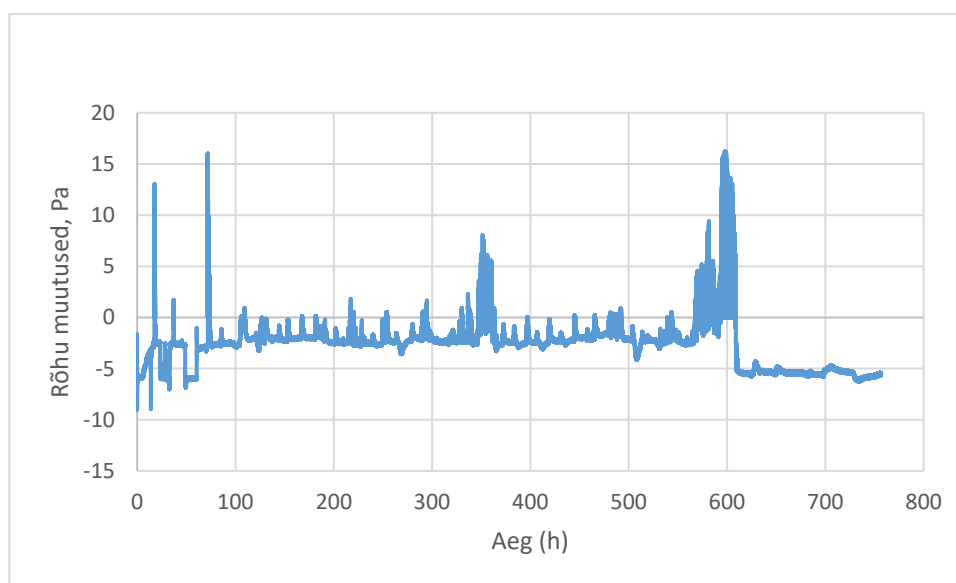
Graafik R35.1 Roosi 35 Rõhumuutuste graafik

Roosi 35 maja graafiku alusel näeme kütmissprotsessi toimumist 5.-6. korral keskpäeval ja ka 13. novembri õhtupoolikul, kui siseruumide temperatuur küündib 23 soojakraadini või teise kütmisskorra jooksul isegi 28 kraadini. Rõhugraafik näitab, et põlemisprotsessi alguses tekib 4 Pa suurune rõhulang, mis näitab, et sissepuhe kamina juures töötab. Antud ruumi kamina juures oli ka ventilatsiooniplafoon, mis oli mõeldud tagamaks kaminale piisava õhuvoo. Eelnimetatud plafoon töötab sissepuhke plafoonina ja on ühendatud uuritava eramaja tsentraalse ventilatsioonisüsteemiga.

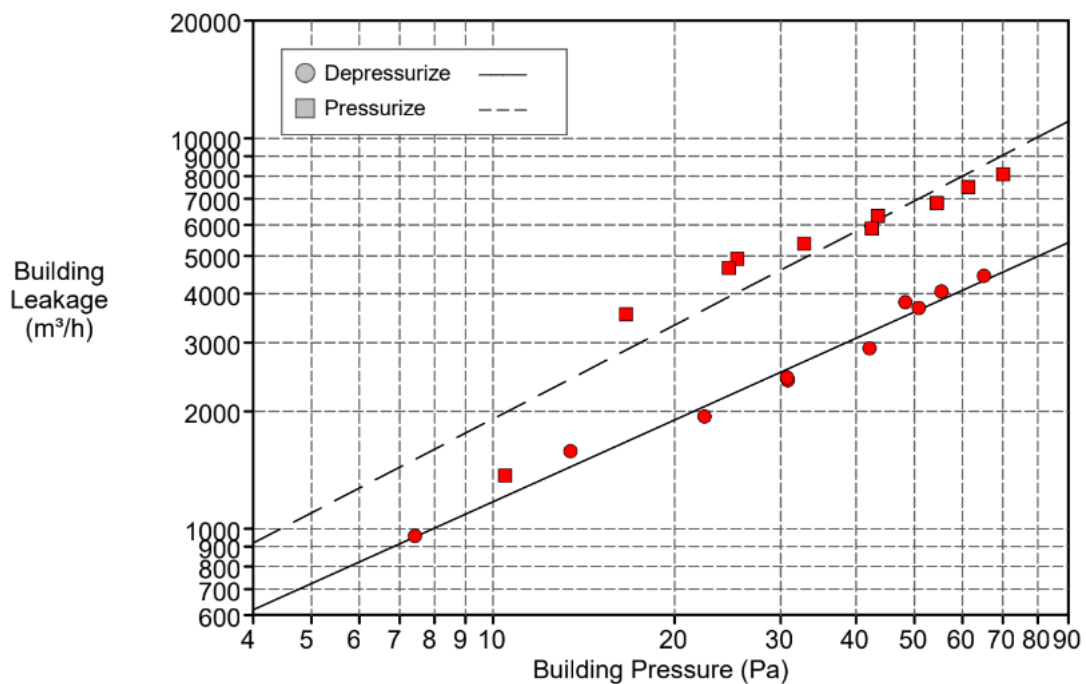
3.4 Renoveeritud korterelamud

3.4.1 Nisu 1, Tallinn, korter 9

Nisu 1 hoone puhul on tegemist Põhja-Tallinnas asuva 2021. aastal Kredexi käendusel renoveeritud fassaadi ja katusega hoonega, kus on olemas tsentraalne ventilatsioonisüsteem, kuid kus korteriühistu otsusel ei kasutata seda elektrienergia kokkuhoidmise eesmärgil.



Graafik N1.1 Nisu 1 Rõhumuutuse graafik



Joonis N1.2 (Väljavõte Tectite programmist)

Nisu 1 maja korter 9 puhul näeb rõhuerinevuste graafikult N1.1, et kütmise ajal on rõhuerinevus võrreldes tavaolukorraga 4 kuni 8 paskalit. Tavaolukorras on rõhkude erinevus 4 Pa raamides, mille põhjustab suurenenud tuul väljas. Suurema tuulega kaasneb ka suurem rõhuerinevus. Sel juhul võib erinevus olla tingitud ka asjaolust, et seadet paigaldades ei nullitud rõhkude vahe väärtust ära.

Nisu 1 elumajas oli olemas ka korterisisene gaasikatel, kuid suuremate külmade korral ja gaasihinna suure tõusu puhul on elanikud rohkem hakanud ahjuga kütmise varianti kasutama. Graafikust on näha, et majapidamises köetakse ahju mitu korda nädalas. Tabelist N1.2 on toodud Nisu 1 hoone õhulektesti tabel, mis näitab ilmekalt hoone tarindite õhuleket, kust saab välja arvutada kütmisprotsessi käigus sissetõmmatava õhu koguse.

Esmase rõhuvahe graafiku järgi on kütmise ajal tekkinud rõhuerinevus 4 ja 8 Pa vahel. Tabeli N1.2 pealt näeme vastavalt sellele, et kütmise perioodil on kamina töötamisel õhuleke ligi 1000 m³/h, mis on 277,8 l/s. Õhulekete graafikult N1.2 loeb välja, et 4 Pa juures jääb korteri õhuleke ligikaudu 620 m³/h juurde. Vaadates nendes olukordades piirete õhulekke erinevusi, saame välja arvutada põlemisel tõmmatava lisaõhu koguse:

Maksimaalne: $1000 \text{ m}^3/\text{h} - 620 \text{ m}^3/\text{h} = 380 \text{ m}^3/\text{h} = 105,6 \text{ l/s}$

Taandame saadud tulemuse ühikutesse l/s:

Maksimaalne: $1230 \text{ m}^3/\text{h} : 3,6 = 105,6 \text{ l/s}$

Arvutuse tulem näitab, et antud elamus on põlemise hetkel kamina efektiivseks toimimiseks tõmmatud ligikaudu 105,6 l/s lisaõhku tarindite ja ebatiheduste kaudu. Nisu korteri puhul oli küttekehaks väike Romtopi 6kW moodulkamin Aledo, kus põletati keskmiselt 2 kuni 4 kg puid korraga – vastavalt vajadusele. Eeldades, et kasutatud materjal on 20% niiskusega, nagu eeltehtud arvutuses võib öelda, et puude põlemiseks ühes tunnis on vaja $7\text{m}^3/\text{h} \cdot 4\text{ kg} = 28\text{ m}^3/\text{h}$. See teeb ligikaudu 7,8 l/s. Kukesene 4 saadud tulemuste järgi oleks põlemisprotsessi jaoks vaja vähemalt 6,5 l/s kilpgrammi puidu kohta, mis teeb õhukoguseks $6,5 \cdot 4\text{ kg}=26\text{ l/s}$ lisaõhku.

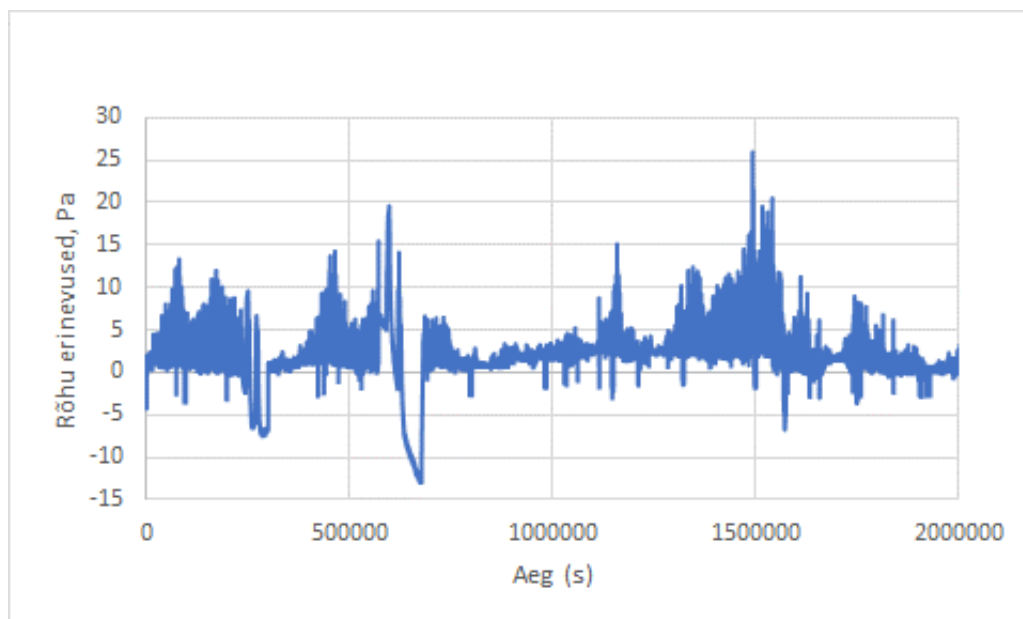
Välispiirete järgi tuleb q E50 (õhulekke välistarindite järgi 50 Pa alarõhu juures) Nisu 1 maja puhul $22\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, mis ei vasta ligilähedaltki renoveeritud maja nõuetele. See tähendab, et korteri tarindid on äärmiselt ebatihedad. Samale järeldusele aitab jõuda ka antud korteri termograafia, kus pildilt N1.3 on näha, et ka katuslae ja seinade liitekohad ning katuslae keskosad on võrdlemisi suured külmasillad. Samuti oli alarõhutesti ajal suureks külmasillaks WC-poti tagune, ventilatsioonitorud köögis ning ka kamina suitsutoru. Leidus vähe kohti, mis antud korteri puhul oleksid tihedad.



Joonis Nisu 1 Ruuminurgatermograafia

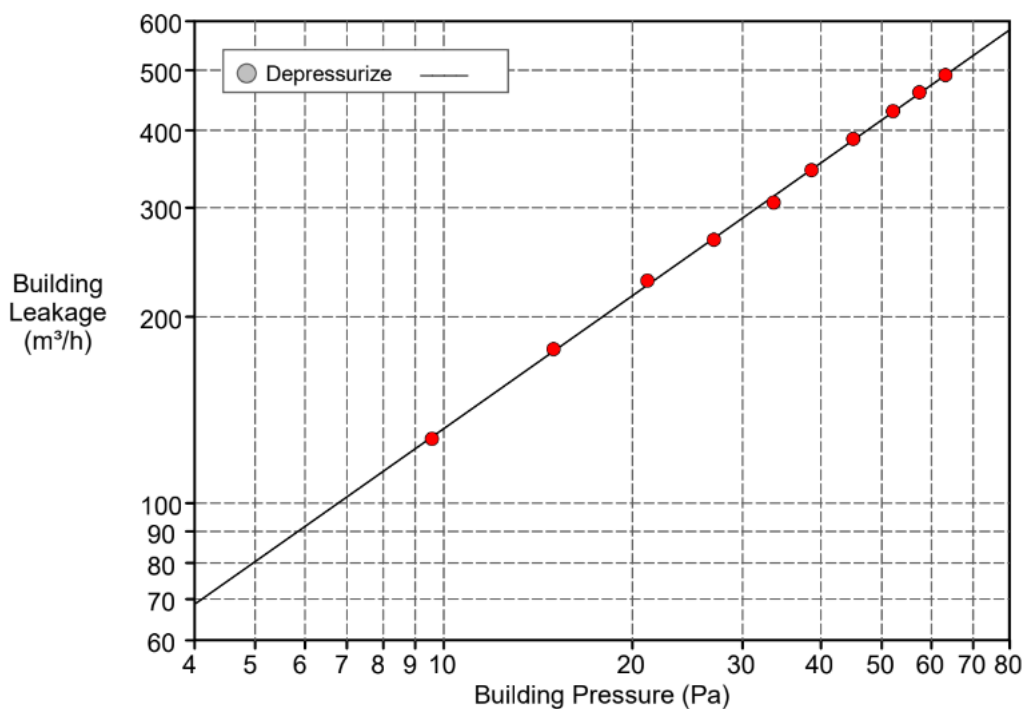
Nisu 1 kortermaja ventilatsiooniagregaati tööle ei pandud, sest ühistu esimees oli otsustanud elektrikuludelt säästma hakata. Ventilatsioonipuudumise tagajärgi oli näha akende juures, kus temperatuurindeks oli napilt alla 2. niiskusklassi normi ja akna alumistesse servadesse oli tekkinud kondents. See näitab, et isegi kui hoone või korteri õhulekke on suur, siis renoveeritud maja puhul on tarindid piisavalt õhutihedad, et ventilatsiooni on vaja.

3.4.2 Taara pst 4, Tartu, korter 3



Graafik T4.1 Taara 4 rõhu muutuste graafik

Taara 4 maja puhul eristub Magnasense seadmega saadud graafikust T4.1 hästi välja nii kütteajad kui ka n-ö tavaolukord, mille puhul rõhkude erinevus sees ja väljas jääb 5-12 Pa vahele. See erinevus võib olla tingitud tuulest või asjaolust, et seadet paigaldades ei nullitud rõhkude vahe väärtust ära. Graafikust on näha, et majapidamises köetakse ahju iga ühe kuni nelja päeva tagant – vastavalt välistemperatuurile ja hetkevajadusele. Tabelist T4.2 on toodud välja sama maja õhulekkesti tabel, mis näitab ka ilmekalt ära kindla rõhuerinevuste juures tekkiva õhulekke ja seega ka lisaõhu hulga. Suured rõhu tõusud on tekitatud tuule tagajärjel.



Joonis T4.2 õhuleketest

Graafik T4.1 järgi on korteris kütmise perioodil keskmiselt tekkinud rõhkudevahe kuni 12 Pa. Tabeli T4.2 pealt näeme vastavalt sellele, et kütmise perioodil on kamina töötamisel õhuleke ligi 145 m³/h. Samuti näeb graafikust, et umbes 4 Pa juures ei ole probleemi lisaõhu vajadusega – korteri õhuleke jääb ca 69 m³/h juurde. Vaadates nendes olukordades piirete õhulekke erinevusi, saame välja arvutada põlemiseks tarnitud lisaõhu koguse:

$$145 \text{ m}^3/\text{h} - 69 \text{ m}^3/\text{h} = 76 \text{ m}^3/\text{h}$$

Taandame saadud tulemuse ühikutesse l/s:

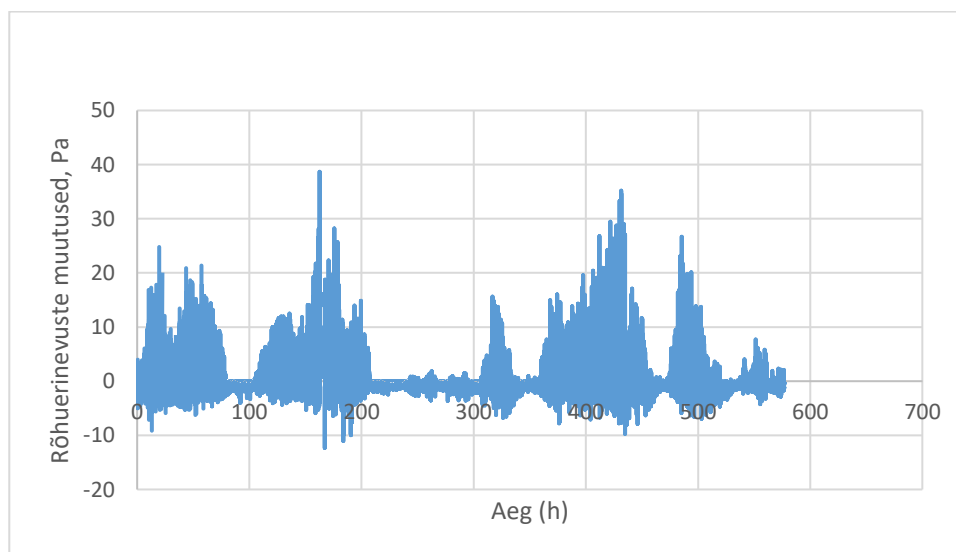
$$76 \text{ m}^3/\text{h} : 3,6 = 21,1 \text{ l/s}$$

Arvutuse tulem näitab, et antud elamus tõmmatakse ahjuga kütmise ajal tarinditest sisse 21,1 l/s lisaõhku põlemise efektiivseks toimimiseks. Antud elamu puhul oli tegemist suure kaminaga, mille juurde kuulus ka soojamüür. Vastavalt elaniku antud informatsioonile, põleb selles tulekoldes ühes tunnis ca 4-5 kg puitu. Eeldades, et kasutatud materjal on 20% niiskusega, nagu eeltehtud arvutuses, võib öelda, et puude põlemiseks ühes tunnis on vaja $1,94 \text{ l/s} \cdot 5 \text{ kg} = 9,7 \text{ l/s}$. See tähendab, et sissepuhke õhuvooluhulk peab olema ligi 10 l/s. Elanikud kurdavad küll seda, et kuigi ahju küttes probleemi pole, siis köögikubu kasutades kõige väiksema režiimi peal, milleks oli antud seadme puhul 30 l/s, kustus tuli koheselt ja pidi akna lahti tegema.

Välispiirete järgi tuleb q E50 (õhuleke välistarindite järgi 50 Pa alarõhu juures) Taara 4 maja puhul 7,6, mis ei vasta renoveeritud maja nõuetele. Kuigi termograafiast tuli välja, et aknad on väga hästi tihendatud ja temperatuurindeksid vastasid nõuetele, siis olid suuremad külmasillad antud korterelamu puhul tulekolle ise ja ka lagi. Sellele järeldusele jõuti vaadates asjaolu, et alarõhu testi käigus hakkas vannitoa laest krohvi alla pudenema, ehk ka korteritevahelised tarindid on antud juhul suured õhulekke kohad.

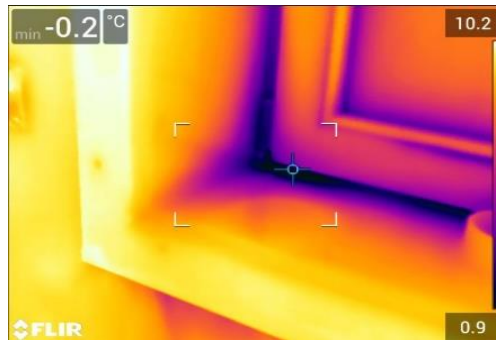
3.4.3 Taara pst 6, Tartu, korter 8

Taara 6 maja puhul on tegemist 1939. aastal ehitatud hoonega, mida köetakse pealmiselt kaminatega, kuigi osades korterites on hoones olemas ka elektriradiaatorid. Hoone karkass on ehitatud puidust ja välisfassaad kaetud lubikrohviga. Väljavalitud korteris oli lõpetamisel renoveerimine – uus põrand, seinad ja muu. Ventilatsioon oli elu- ja magamistubades lahendatud tsentraalse ventilatsiooniagregaadiga ning abiruumides ja kappides värskeõhuklapiga šahtist.



Graafik T6.1 Taara pst 6 Rõhumuutuste graafik

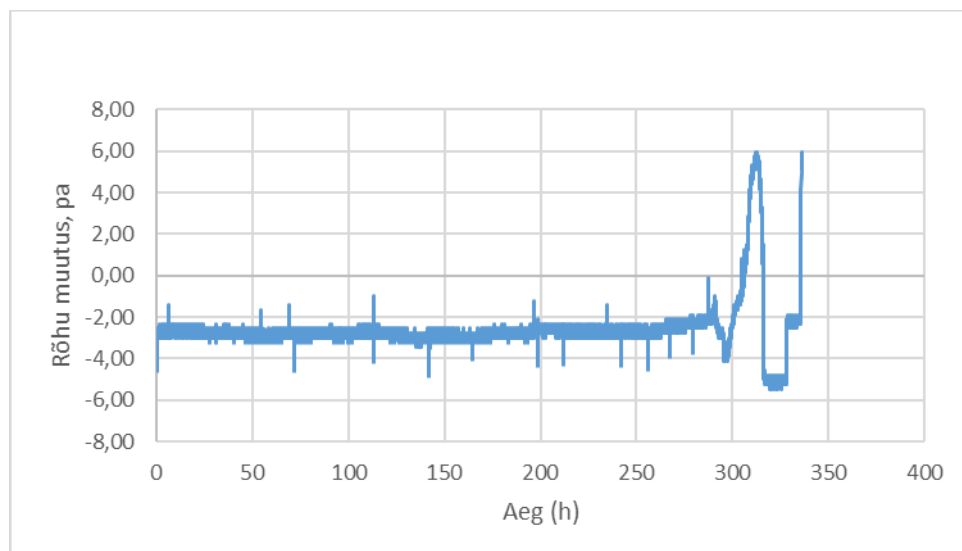
Taara pst 6 rõhugraafikult T6.1 on samuti näha visualiseeritult, millal toimus kütmine ning milline oli normaalseis, mille puhul rõhk püsis suhteliselt muutmatult. Taara pst 6 maja puhul on tavaolukord selgemini välja joonistunud kui Taara pst 4 maja puhul. Keskmiselt jääb rõhuerinevus 3-4 Pa juurde ning kütmissprotsessi käigus tõuseb rõhuerinevus 15-30 Pa lähedale. Antud hoonel selgitas juba termograafia välja korteris olevad ulatuslikud külmasillad ja kondensaadi tekkekohad.



Joonis T6.1.1 Aknanurga termograafia

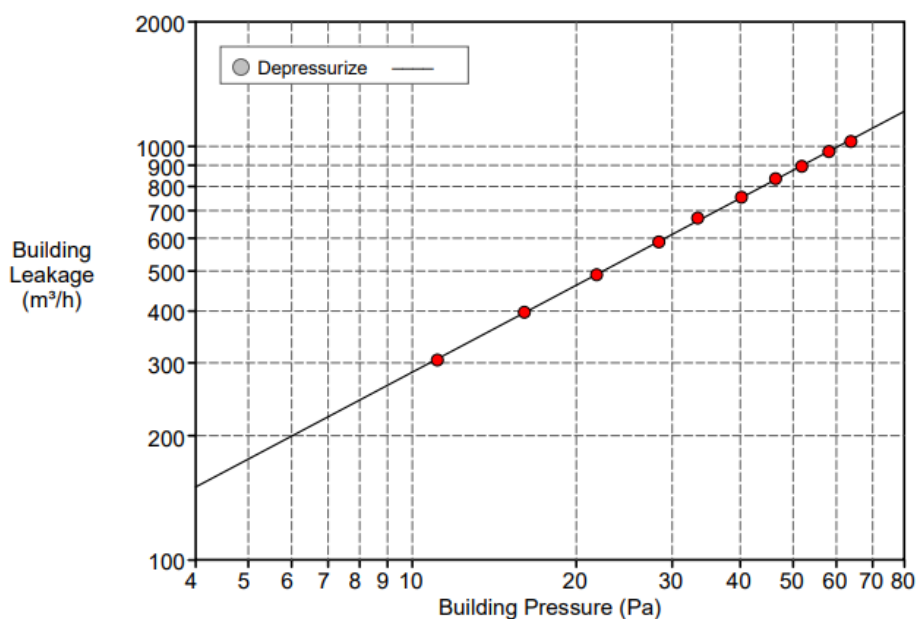
Akna nurgas on -0,2 kraadi, mis on härmatise tekkeks sobiv temperatuur. See omakorda toob kaasa tugeva aluse hallituse tekkeks. Samuti on pildilt näha, kuidas külmajooned liiguvad sügavale aknalaua nurka, seega on tegemist ekstreemse läbilaskega külmasillaga. Hoone õhuleke oli liiga suur, et saaks sealt kätte kasutatavat informatsiooni.

3.4.4 Koidula 4, Võru, Korter 9



Graafik KO4.1 Koidula 4-9 Rõhumuutuste graafik

Koidula 4 korter 9 graafikul nähtavad suuri rõhuerinevusi võis tekitada suur torm, sealhulgas kõvad tuuled. Antud korteris oli olemas ka õhksoojuspump, mida elanikud tavaelus kasutasid. Soojuspump tekitab töötades ülerõhku ja ahju kasutamisel tekib alarõhk. Elanike antud info põhiselt ei kasutata kunagi ahju koos soojuspumbaga. Temperatuurigraafikult on näha siseõhu kütmise ajad ning koostöös rõhugraafikuga on selge, millal on kasutatud soojuspumpa ja millisel juhul on kütmiseks kasutatud ahju. Rõhuerinevused antud maja puhul erinevad alates 2 Pa, mis on näit tavaolukorras, kuni 5 Pa-suuruse erinevuseni kütmise ajal. Maksimaalse rõhkudeerinevuse juures saame vastavalt õhulekke tabelile välja arvutada kütmise ajal vajamineva õhuhulga.



Joonis KO.2 Koidula Alarõhutest

Normi alarõhupiiril, milleks on 4 Pa, tõmbab ventilaator õhku ligikaudu 165 m³/h ja ahikütte kasutamise puhul, kui alarõhk oli maksimaalselt 5 Pa, mille korral on õhulekke korteris ligi 180 m³/h. Võtame arvesse, et õhulekke erinevus on 25 m³/h, mis teisendatuna l/s on 6,9 l/s.

$$25\text{m}^3/\text{h} : 3,6 = 6,9 \text{ l/s}$$

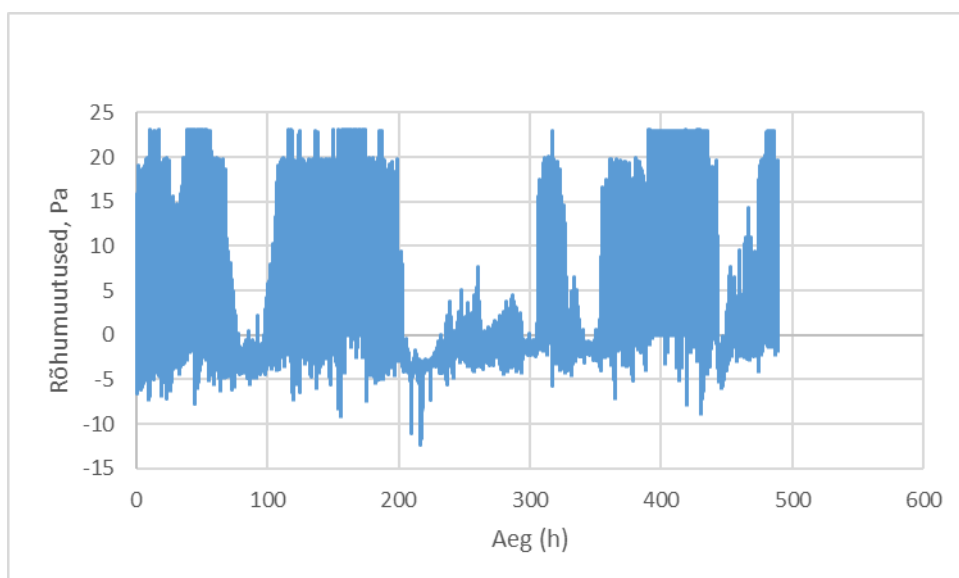
See tähendab, et kuni 6,9 l/s lisaõhku tõmmatakse läbi ebatiheduste tarinditest ruumidesse kütmise ajal.

Koidula 4 hoone oli renoveeritud ja kasutusel komfovendi tsentraalne seade poolele majale. Sellegipoolest on alarõhumõõtmisel näha, et mõõdetud korter polnud üldse õhutihe – seda näitab asjaolu, et õhulekkearv mõõdetud korteris on 12,01 m³/(h·m² välispiirded) ning õhuvahetus 14,65 1/h. Need väärtused ei iseloomusta eriti hästi renoveeritud korterit. Kõige suuremad õhulekke kohad olid kindlasti ruumis asuv kamin ja aknad.

Õhulekke testi ajal oli tunda, kuidas külm õhk akna vahelt sisse tungis ning kuigi kaminaavad ja puhastusklapid said kõik õhutihedalt teibitud, siis viskas testi ajal ukseklaasi ja kamina ukseraami vahelt eluruumidesse tuhka. See näitab puudjääke ka juba kamina enda kvaliteedis.

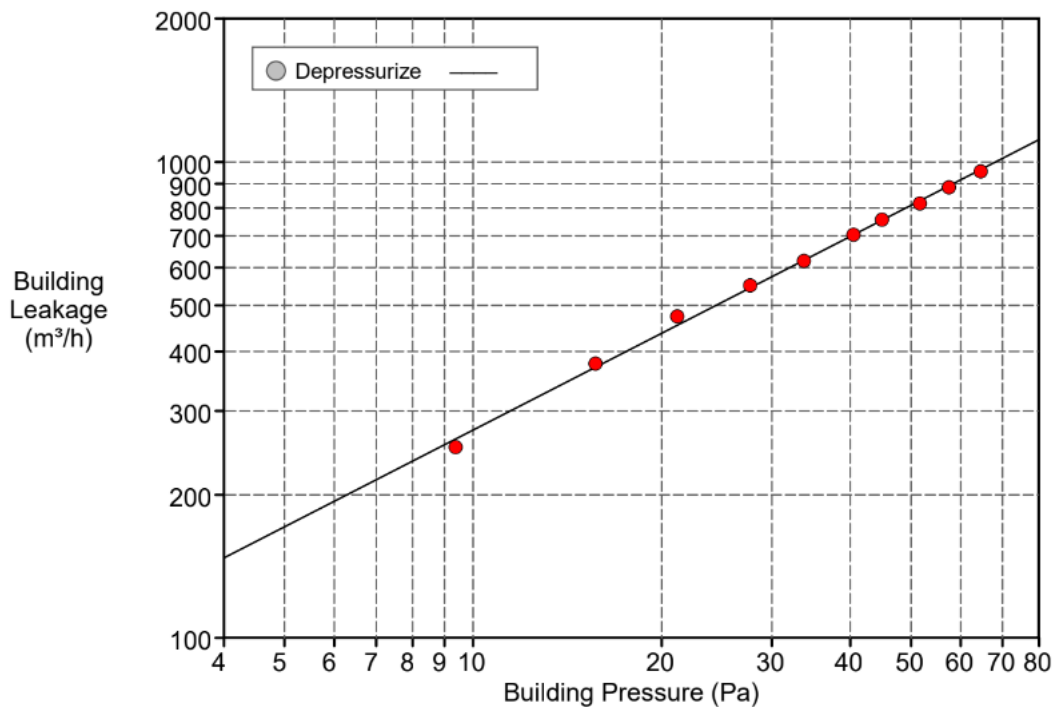
3.4.5 Veskikaare 6, Roela, Korter 3

Veskikaare maja puhul oli tegemist 1972. aastal ehitatud ning mõõtmise hetkeks renoveeritud välisfassaadiga hoonega. Uurimise all oli teise korruse nurgakorter number 3. Ruumides puudusid värskõhuklapid, kuid korterites oli vana tsentraalne ventilatsioonisüsteem, kus sarnaselt Nisu 1 hoonele oli ventilatsioonisüsteem energia säästmiseks välja lülitatud.



Graafik V6.1 Veskikaare 6 Rõhumuutuste graafik

Veskikaare 6 rõhugraafikult loeb välja, et tavaliselt on hoone 2 Pa alarõhus või jäi seade nullimata. Graafikul on tugevalt näha äärmiselt suuri rõhukõikumisi, mis ulatuvad kohati isegi kuni 40 Pa juurde, tihedamalt 23 Pa-suuruse erinevuseni. Suured kõikumised võisid olla seotud sellega, et väljas oli äärmiselt suur torm või mõjutas korterit midagi seespoolt väga tugevalt, mis on samas nii suure rõhuerinevuse tõttu pigem ebatõenäoline.



Joonis V6.2 Veskikaare 6 alarõhutest

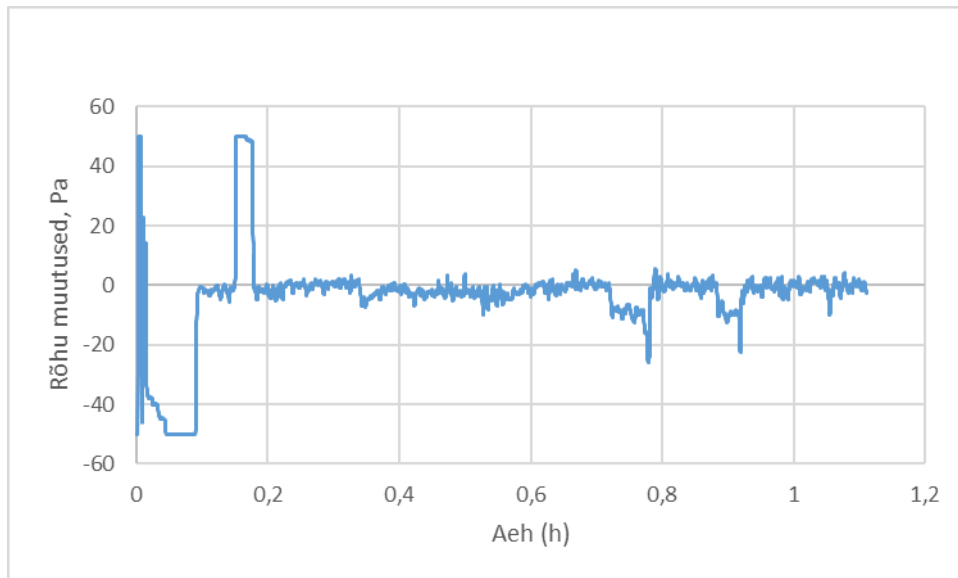
Normaal alarõhupiiril, milleks on 4 Pa, tõmbab ventilaator õhku ligikaudu 165 m³/h, ja ahikütte kasutamise puhul, kui alarõhk oli maksimaalselt 11 Pa, on õhuleke korteris ligi 290 m³/h. Võtte arvesse, et õhulekke erinevus on 125 m³/h, mis teisendatuna l/s on 34,7 l/s

$$125\text{m}^3/\text{h} : 3,6 = 34,7 \text{ l/s}$$

See tähendab, et kuni 34,7 l/s lisaõhku oleks vaja kompenseerida ventilatsiooniga, mis hetkel tõmmatakse läbi ebatiheduste tarinditest ruumidesse kütmise ajal.

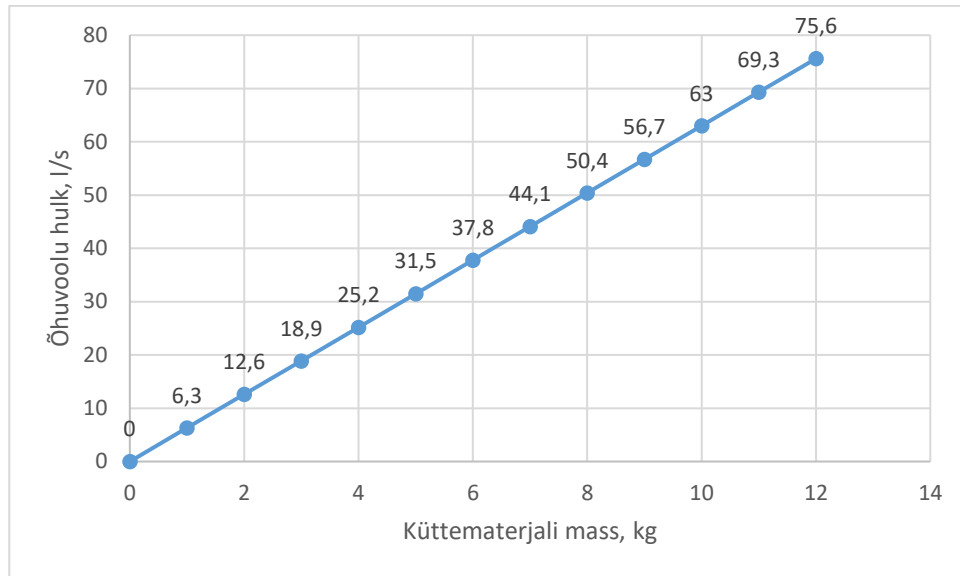
Veskikaare 6 hoone oli renoveeritud fassaadiga ja kasutusel tsentraalne ventilatsiooniseade, mis ei töötanud kasutuskulude tõttu. Sellegipoolest on alarõhumõõtmisel näha, et mõõdetud korter polnud väga õhutihe – seda näitab asjaolu, et õhulekkearv qE50 mõõdetud korteris on 9,70 m³/(h·m² välispiirded) ning õhuvahetus 10,82 1/h. Ka need väärtused ei iseloomusta hästi renoveeritud ning korralikult soojustatud ja tihendatud korterit. Kõige suuremad õhulekke kohad olid kindlasti aknad, kust oli õhulekke testi ajal käega tunda õhu liikumist akende läheduses.

3.5 Komplekstesti analüüs Kukeseene 4, Pärnu



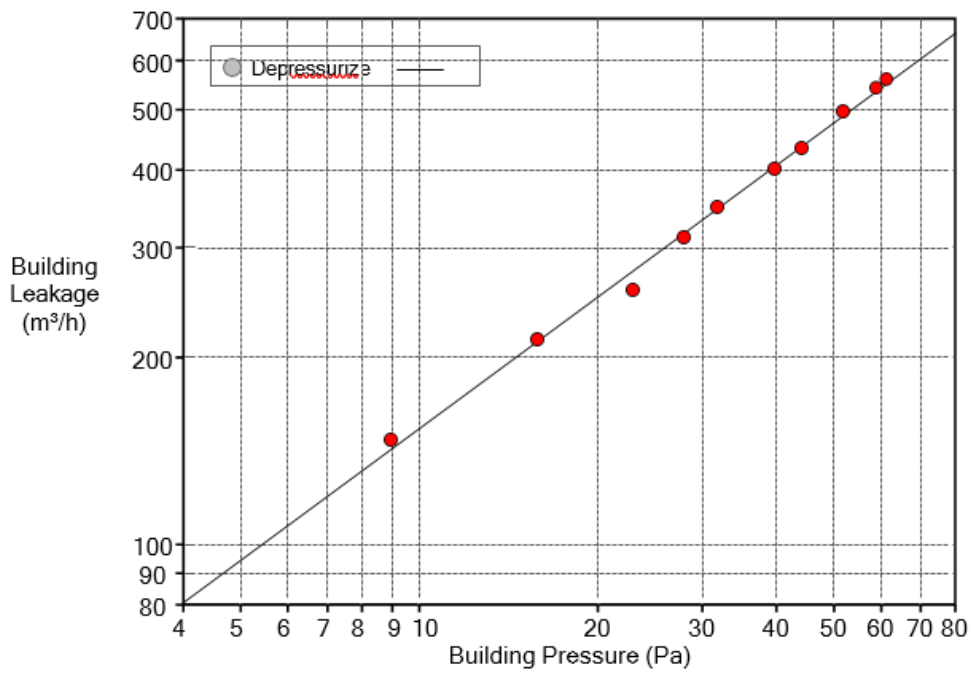
Graafik KU.1.1 Kukeseene 4 Rõhumuutuste graafik

Rõhugraafiku lihtsustatud lugemiseks on lisatud ligikaudsed ajad, kui sai vastavad muudatused sisse viidud. Graafiku KU.1.1 pealt on selgelt näha alguses tehtud alarõhutestid. Samuti enne teist tundi on graafikul näha järsku rõhutõusu, mis ajal täpselt viidi läbi ülerõhutest. Testide tulemused leitavad allpool graafikutel KU.2.1 kuni KU.3.2. Selgelt on välja loetav ka kaminasse tuletgemise hetk, mille puhul on näha 5 Pa suurust rõhulangust, alarõhu olukorda, mis põlemisprotsessi edenedes tasakaalustub. Sellegipoolest on näha, et põlemisprotsessi ajal on rõhu baastase nähtavalt madalam kui tavaolukorras. Kui tavaolukorras oli keskmine rõhuerinevus 1 Pa, siis kütmise korral on tegu 5-7 Pa muutuste ja erinevustega. Joonise pealt on näha ka muud ahju-uuringuga seotud protsessid näha. Kui kaminarežiim sisse lülitatakse, siis hakkab kaminasuu kaudu rohkem õhku läbi tõmbama.

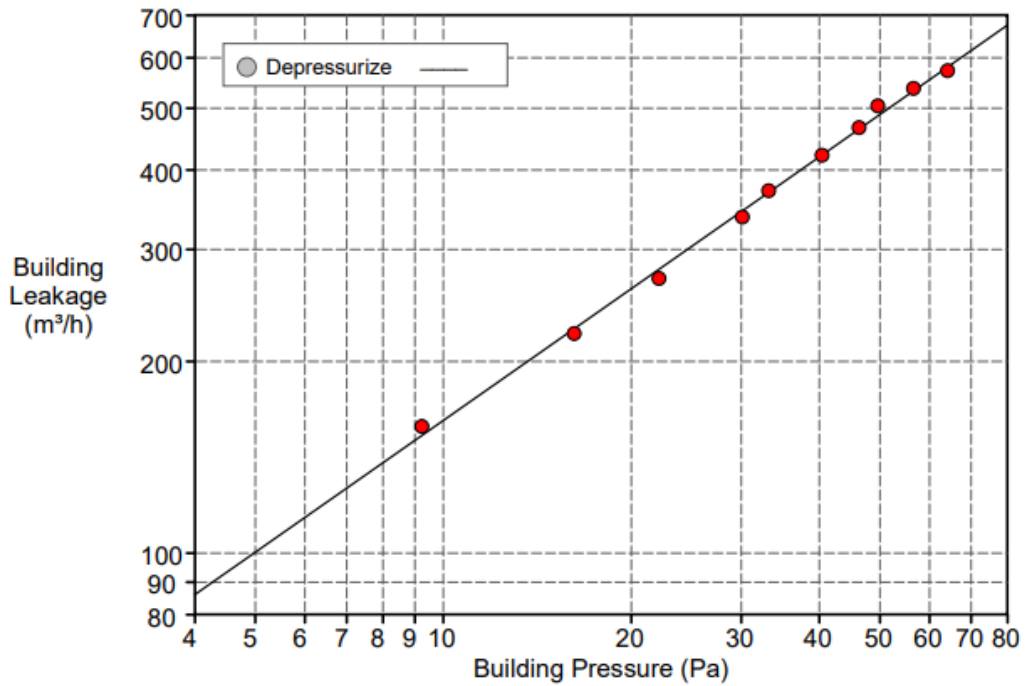


Graafik KU.2.1 Puitmaterjali põletamiseks vajalik tegelik vooluhulk

Elamus viidi läbi ka swemaflow õhuhulkade katse, et näha vajalikku õhuhulka erinevate ventilatsioonisüsteemi režiimidega. Tavaolukorras jäi õhuhulk 21-22 l/s juurde, mis teeb 1 kg puidu jaoks $22/3,6 = 6,3$ l/s/kg. Sellel juhul oli lahti ülemine siiber, mis viis suitsu otse mööda korstent üles ja hoonest välja. Seejärel tehti lahti alumine siiber, mis on mõõdetud kamina puhul töörežiim – soe õhk suunatakse läbi soojamüüri ja siis välja. Lahtise alumise siibri puhul alanes kamina poolt tõmmatav õhk 18-le l/s – seda ajal, kui töötab kaminarežiim. Kaminarežiimi näitajad olid määratud sissepuhkele 60% ja väljatõmbele 50% kogu vooluhulgast, mis arvutuslikult teeb 42 l/s sissepuhkele ja 35 l/s väljatõmbe vooluhulk. Selle režiimiga töötas kamin hästi, kuid kui lisada kaminarežiimile kubu, võimsusega 188 m³/h, mis on 52,2 l/s, siis hakkas kamin suitsu sisse ajama.

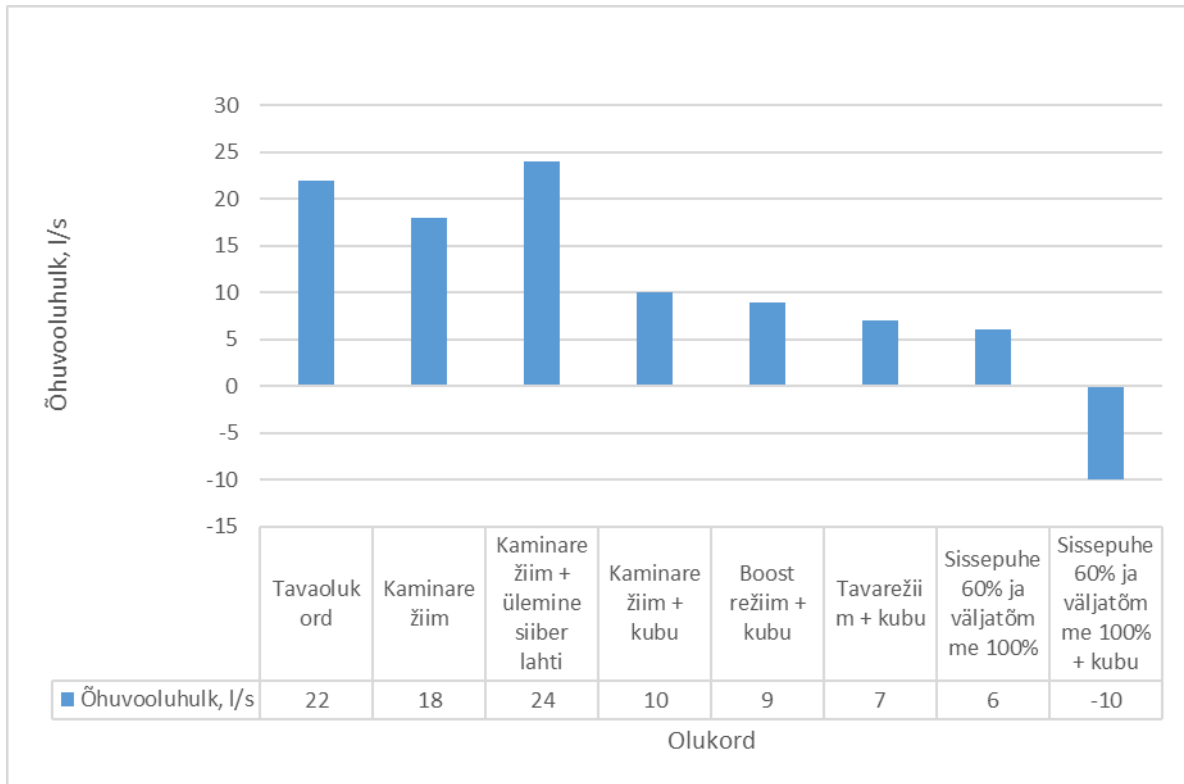


Joonis KU4.2.1 Hoone alarõhutest, kubu kaetud



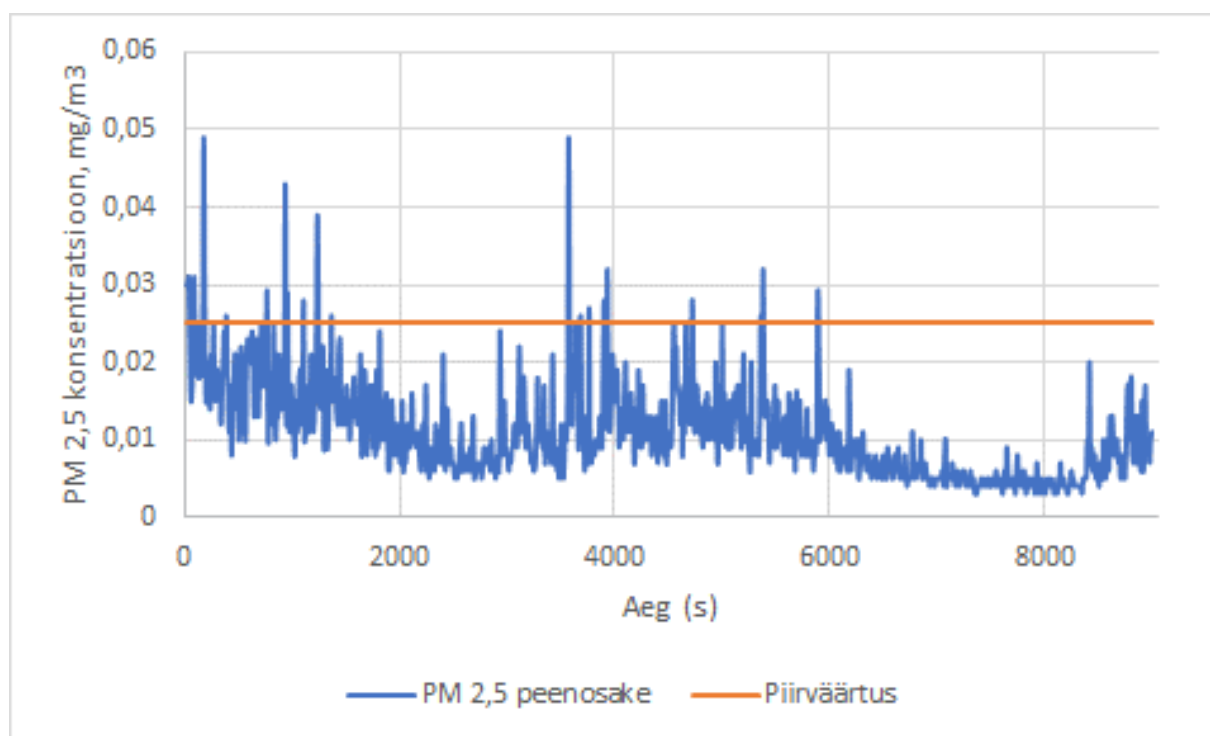
Joonis KU4.2.2 Hoone alarõhutest, kubu katmata

Õhulekke graafikutelt on näha, et kuba katmata jätmisel on õhulekke nähtavalt suurem, kui juhul, et kuba on kaetud. Kuigi PKM 9031 X seadmel oli käite peal, siis mõjutas selle mitte katmine õhuleket lausa 70m³ jagu. Hoones tehtud katsete põhjal saab öelda, et 10%, mis on 7 l/s suurem sissepuhke õhuhulka antud kubatuuriga elamu puhul, on piisav, et katta ära ahju kasutamisel tekkinud alarõhk ja õhuvajadus, mida näitab ka rõhu graafik.



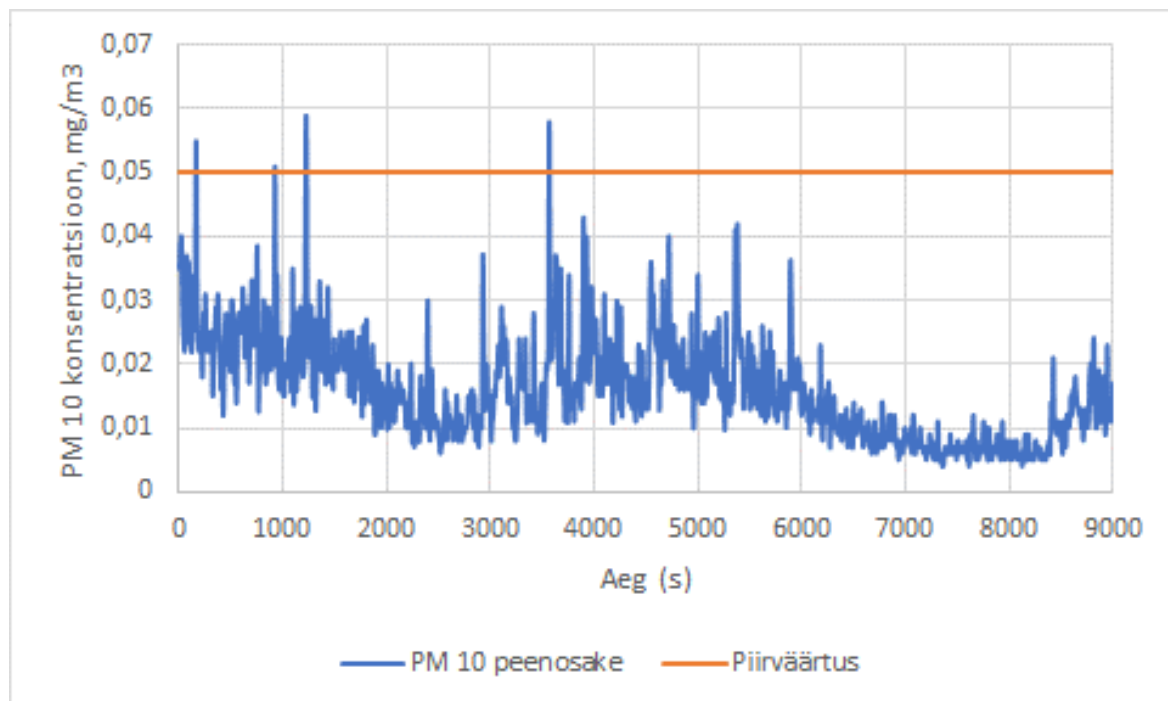
Graafik KU4.3.1 Tulekolde tõmmatavad õhuvooluhulgad eri ventilatsiooniagregaadi režiimidel

Graafik KU4.3.1 näitab, et kõige suurem õhuvool tulekoldesse toimub juhul, kui kaminarežiim oli sisse lülitatud (sissepuhe 60% ja väljatõmme 50%) ja ülemine siiber lahti. Kui sissepuhke õhuvooluhulk muudeti 60% ja väljatõmme 100% peale, ning lülitati sisse ka kuba vooluhulgaga 52 l/s, siis tekkis kohene õhu liikumissuuna vahetus. Tavarežiim ja kuba suutsid 10 minutit töötada ilma tuha sisse paiskamiseta, kuid lõpuks hakkas ka selle režiimi puhul kaminast õhku siseruumidesse paiskama. Õhulekke testilt on näha, et 22 l/s suudab läbi tarindi tulla 4 Pa rõhuerinevuse juures välis- ja sisekeskkonna vahel ning ainult kamina kasutamisel tõmbab kamin samuti 18-24 l/s õhku põlemiseks. See tähendab, et antud hoone puhul piisab, kui kaminarežiim on seadistatud 50% väljatõmbeõhule ning 58-60% sissepuhkeõhule. Kuba maksimaalse võimsusega kasutades jääb aga agregaadil õhuhulgast puudu, et katta ära nii kuba kui kamina töö ehk peab avama akna või paigaldama aknale klaasiõhuklapi.



Graafik KU.3.1 Kukeseene 4 PM_{2,5} osakeste kontsentratsioon

Kukeseene 4 maja PM_{2,5} osakeste graafikult näeb, et mitmeid kordi on osakeste tase ruumis tõusnud üle lubatud normi. Alguses alarõhutesti ajal, kui ruumis oli tunda kamina lõhna, ning hiljem ka kubu sisselülitamisel täisvõimsusega. Eestis on aga ette nähtud, et osakeste kontsentratsioon ei oleks üle lubatud 0,025 mg/m³ rohkem kui 12 tundi, vastasel juhul on see elule ohtlik.

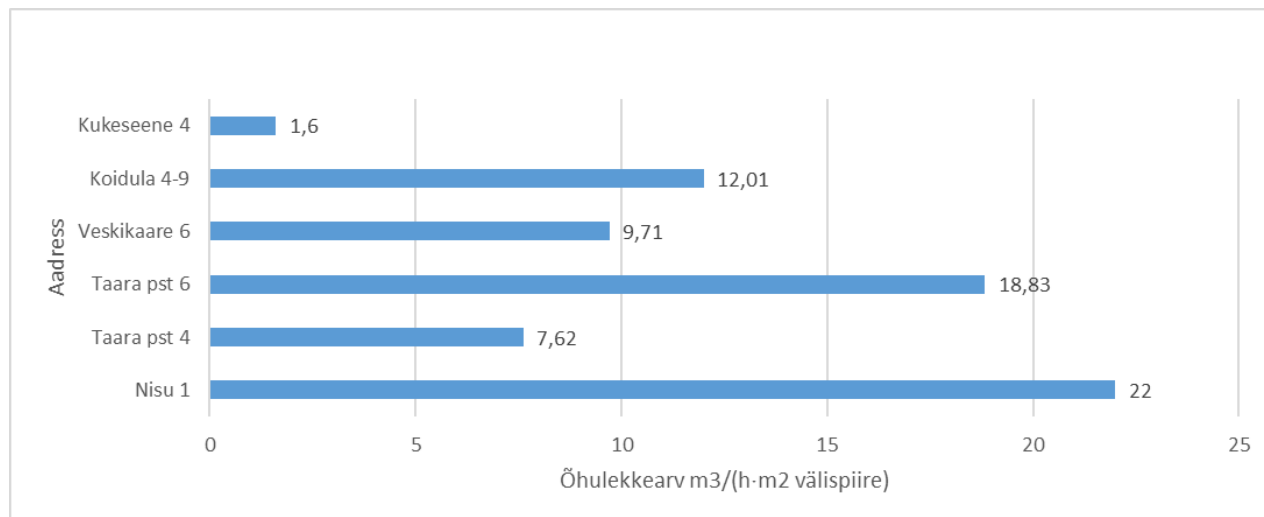


Graafik KU.3.2 Kukesene 4 PM10 osakeste kontsentratsioon

PM10 graafikul läheb kontsentratsioon väga üksikudel kordadel üle piirnormi ning sedagi alguses alarõhu katsete ajal. Graafikul suuri muutusi ei toimu. Selgelt joonistuvad välja hetked, kui pandi tööle köögi kuhu – nendel hetkedel kontsentratsioon õhus tõuseb, mis tähendab, et kaminast võis sel hetkel lenduda eluruumidesse PM10 suuruses tuhaosakesi. Ülejäänud ajal ja põlemisprotsessi käigus on PM10 tase normi piires.

4 Analüüs

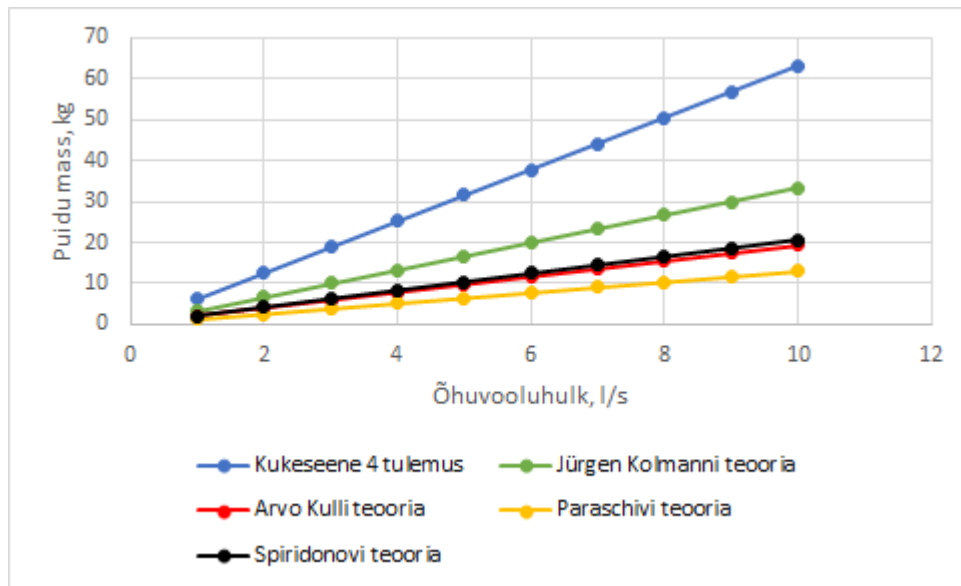
4.1 Õhulekkearvud ja infiltratsioon



Graafik 4.1 Hoonete õhulekked

Tabel 2.5 järgi on olemasoleval rekonstrueeritud hoonel õhulekkearv kuni $9 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ ja uuel hoonel kuni $3 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$. Graafik 4.1 näitab, et Kukeseene 4 maja puhul on õhulekkearv $1,6 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$, mis vastab tabelis 2.5 toodud väärtuse vahemikule ning on normide piires. Taara pst 4 hoonel on samuti õhulekkearv $7,62$, mis rekonstrueeritud hoone kohta on sobilik. Koidula 4 maja puhul ületab õhulekke arv q50 normi peaaegu $3 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ võrra, mis näitab, et kortermaja renoveerimis ja rekonstrueerimistööd on tehtud halvema kvaliteediga. Siinjuhul polnud piisavalt pööratud tähelepanu akna ümbrustele, mida saab öelda ka Veskikaare 6, Taara pst 6 ja Nisu 1 majade kohta. Eriti just Taara 6 ja Nisu 1 hoonetes olid õhulekkearvud kordades suuremad lubatust, mis näitab, et ehituse kvaliteet on mitte arvestuslik ja nendes korterites ja majades ei teki probleemi lisaõhu saamisega infiltratsioonist. Lisa 2 kuni Lisa 6 on välja toodud mõõdetud hoonete õhulekke mõõtmised ja sealt saadud väärtused.

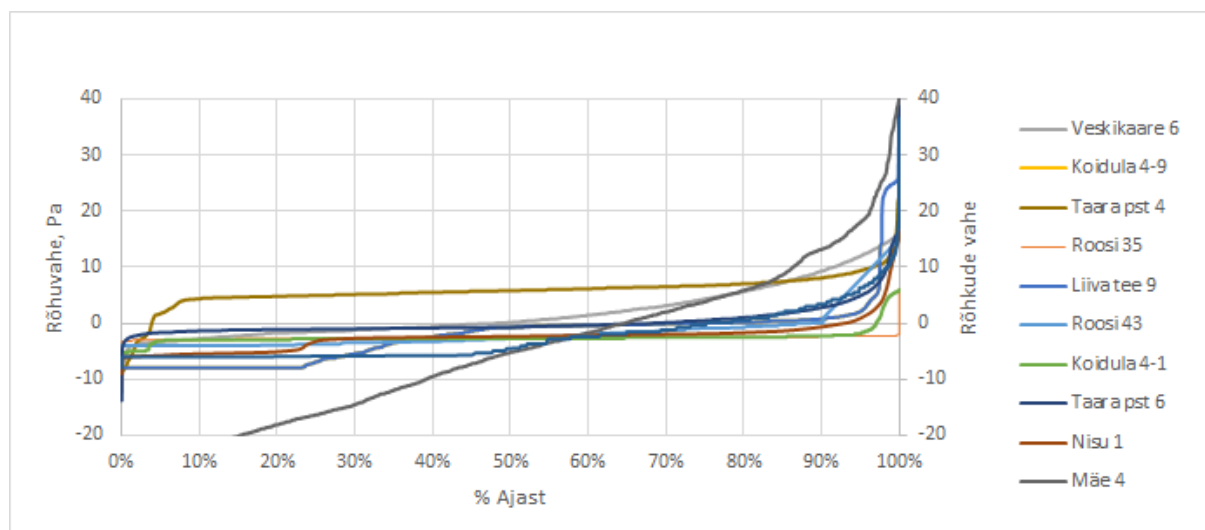
4.2 Põlemiseks vajalik lisa õhuvooluhulk



Graafik 4.2 Põlemiseks vajaliku lisaõhu arvutusmeetodite võrdlus

Graafikul 4.2 on välja toodud koondtabel kõikidest lisaõhu arvutusmeetodite tulemustest ning Kukeseene 4 majas mõõdetud reaalsest tulemusest. Kukeseene 4 puhul sai 1kg puitmaterjali põlemiseks vajaliku lisaõhu hulgakaks mõõdetud 6,3 l/s/kg, J. Kolmanni teooria järgi sai tulemuse 3,33 l/s/kg, Arvo Kulli teooria järgi 1,94 l/s/kg, Meetod 2 järgi 1,3 l/s/kg ja Meetod 3 järgi 2,07 l/s/kg. Kõige lähema vastuse reaalistele õhuhulkadele sai J. Kolmanni teooriaga, arvestades, et 1kg puitu põleb 1 tund. Kukeseene 4 ventilatsiooniseadme kaminarežiim oli aga fikseeritud 7 l/s suurema sissepuhke õhuvooluhulgaga ning kamin töötas hästi ja tõmme oli tugev. Kontekstis tähendab see, et kui 3,5 kg puitmaterjali põletamisel 7 l/s töötas efektiivselt, siis sellest tingitud arvutusega oleks 2 l/s/kg puidu kohta lisaõhku piisav. See tähendab, et kvaliteetselt tihendatud ja soojustatud maja puhul, mille õhulekkearv on väike, piisab, kui kamina võimsus (kW) korrutada 2-ga. Pannes korrelatsiooni korterite ruutmeetrid ja vastavad kaminad, siis peab kamina režiimi puhul sissepuhkeõhk olema 10% korteri või elamu pindalast. Kui tegemist on 90 m² korteriga, siis kaminarežiimil peaks olema sissepuhke õhuvooluhulk 9 l/s suurem, et tagada kamina efektiivne töö.

4.3 Rõhuerinevused mõõdetud hoonetes



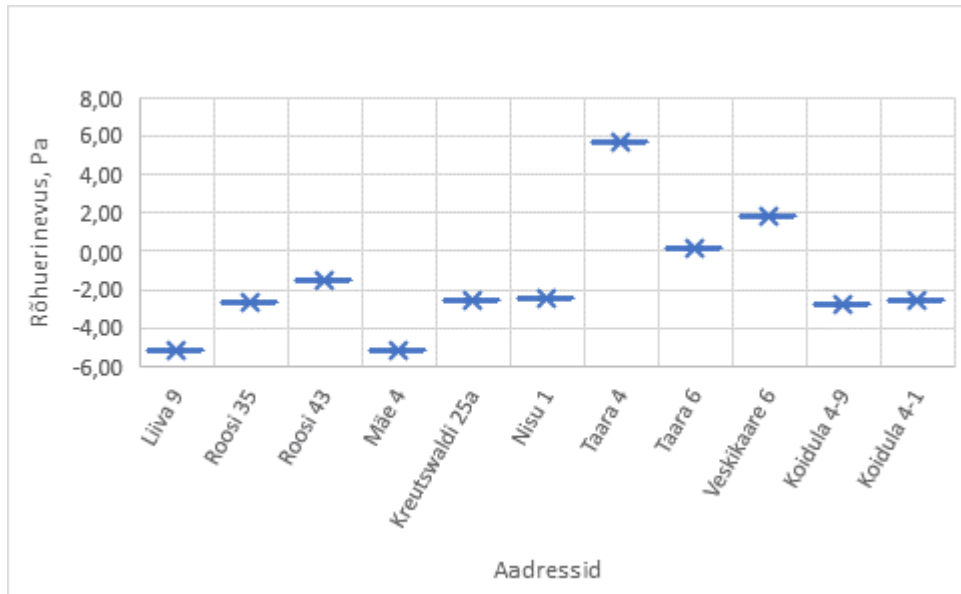
Graafik 4.3 Rõhuerinevuste ajaline osakaal mõõdetud hoonetes

Tegemist on kokkuvõtva tabeliga uuritud hoonete – nii renoveeritud kui renoveerimata hoonete rõhuerinevuste ajalisest osakaalust. Nagu ka graafikult saab välja lugeda, siis suurem osa ajast, ligi 50-70% olid korterite rõhkude erinevused väliskekskonnast kergelt alarõhus. Üksikud hooned on ka kerges ülerõhus, mis aitab hoonest eemale hoida ebameeldivaid lõhnu ja lendlevaid ühendeid ja osakesi. Suurimad alarõhu olukorrad olid tekkinud kaminaga kütmisel ja köögikubu kasutamisest ning suurimad ülerõhu olukorrad on põhiliselt tekkinud suurtest tuultest tingituna. Pooled hooned jäävad 90% ulatuses 4 Pa sisse, mis tähendab, et nendes korterites ja elamutes ei ole probleemi kamina lisaõhu saamisega. Seda järeldust toetavad ka õhulekke väärtused tehtud hoonetes, mis on välja toodud graafikul 4.1.

Taara 4 maja puhul on 97% ajast mõõdetud korter ülerõhus, mis tähendab, et põlemisprotsessiks oli vajalik õhukogus olemas

Mõõdetud elamute puhul ei saa luua ühist korrelatsiooni renoveeritud ja renoveerimata korterite õhutiheduse kohta. Saab nentida vaid asjaolu, et renoveeritud korterite rõhuerinevused lähenesid rohkem 0 Pascalile. Põhilise alarõhu ruumides tekitab küttekolde või köögikubu kasutamine, mis nähtavasti tänu kütteperioodile ning tihedama koduskokkamisele on suurema osa mõõtmisel olnud korterites just alarõhk. Tulemused näitavad, et mitmed renoveeritud korterid on renoveeritud halva kvaliteediga, ehk majades ja korterites on ekstreemselt suured külmasillad nii akende, tarindite kui ka küttekollete endi juurest. Tekkinud külmasildasid süvendab veelgi kamina kasutamine põhilise kütteallikana.

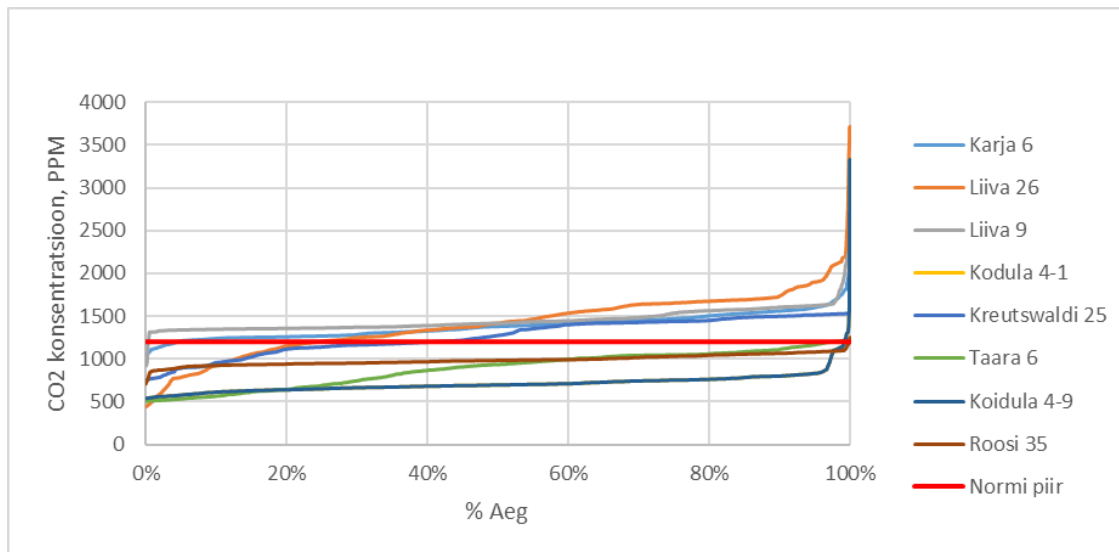
Tulemused näitavad, et kõikidel mõõdetud hoonetel on vaja paremat või efektiivsemat ventilatsioonisüsteemi, et vältida toas alarõhku ning sellega kaasnevaid külmasildasid.



Graafik 4.3.2 Rõhuerinevuste keskväärtused

Graafikul 4.3.2 tuuakse välja mõõdetud korter-ja eramajade keskmised rõhuväärtused. Eelnimetatud graafik toetab graafikut 4.3.1, et üheteistkümnest hoonest kaheksal on pidev alarõhk ning kolmel hoonel kas nullilähedane või positiivne keskmine rõhk. Suuremosa hooned jääb +/-4 Pa rõhuerinevuste sisse.

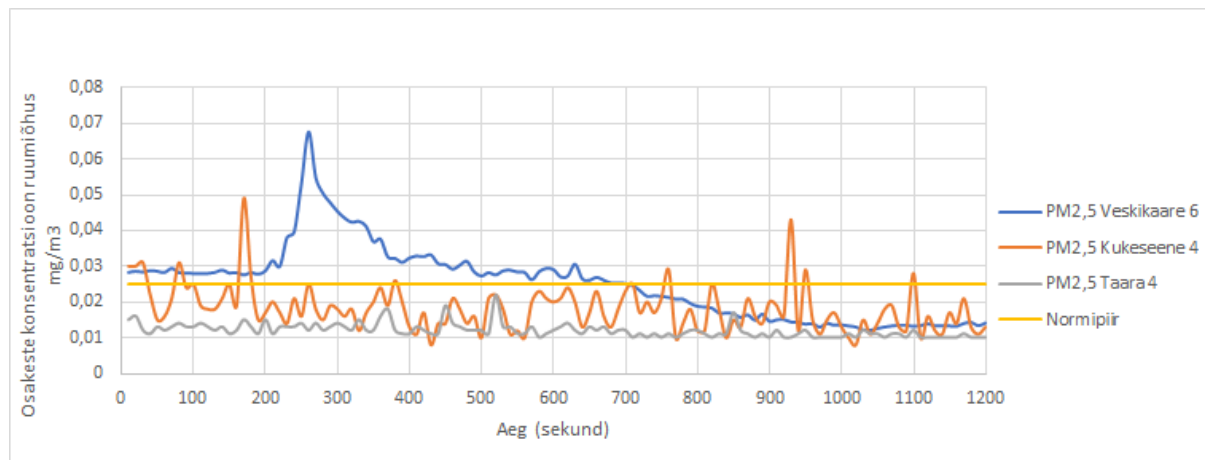
4.4 Süsihappegaasi kontsentratsioon eluruumides



Graafik 4.4 Süsihappegaasi taseme osakaal ajas

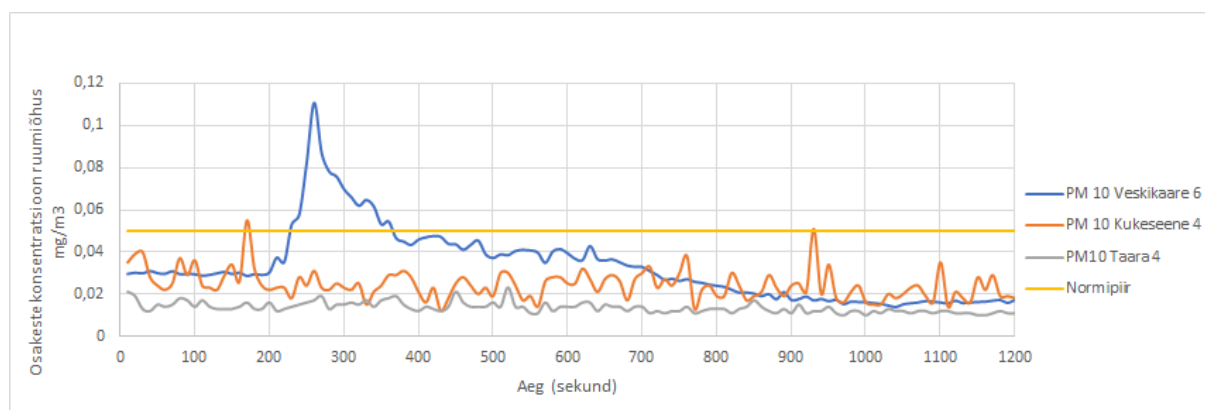
CO₂ taseme koondgraafikult näeb selgelt ära, et renoveerimata hoonetel puudub ventilatsioon. Seda näitab ära asjaolu, et üle 65% ajast on ruumides lubatust suurem CO₂ kontsentratsioon ehk üle 1200 ppm. Kohati on pooltes korterites veel üle 40% ajast 1500 ppm ja rohkem, mis mõjub juba ka tervisele – nii kõrge süsihappegaasi kontsentratsioon õhus muudab uimaseks, väsinuks ja toob pikas perspektiivis kaasa ka muid terviserikkeid. Kõige suuremad CO₂ tasemed, mis ulatuvad 2000 ppm ja rohkemgi, on renoveerimata korterite puhul tingitud kütmise tagajärjel ahjust siseruumidesse levinud vingugaasist ja suitsust. Suurt kontsentratsiooni tagab ka asjaolu, et ainult kahel hoonel oli töötav ventilatsioon. Sellest tingituna ei toimu ruumides õhuvahetust, mis on probleemiks eriti talvel, kui peab ahju kütma ning kui kõikides elamutes olid aknad kinni teibitud. Graafikult tuleb esile ka asjaolu, et renoveerimata korteritel olid värskeõhuklapid kinni pandud ning õhk siseruumides ei ringelnud. Ligi 96% ajast on renoveeritud korterite ja elamute puhul süsihappegaasi tasemed normide piires, mis näitab, et nendes elamutes on töötav ventilatsioon või lasevad tarindid lihtsalt õhku läbi nagu Taara 6 hoones. Samaselt renoveeritud korteritele on ka Roosi 35 majas süsihappegaasi tasemed normide piires, sest eelnimetatud majas oli töötav ventilatsioonisüsteem, mis tagas eluruumides piisava õhuvahetuse. Kokkuvõtvalt annab graafik ülevaate renoveerimata hoonete probleemist, milleks on ventilatsiooni puudumine. Igal renoveerimata korteril peale Roosi 35 maja on graafiku 4.4 järgi vaja uuendada kiiremas korras ventilatsioonisüsteemi, et tagada inimlik elukeskkond. Eriti tähtis, et ventileeritud saaks korterid nagu Liiva 9 ja Karja 6, kus alla 1000ppm CO₂ ei jõuagi.

4.5 Peenosakeste kontsentratsioon



Graafik 4.5.1 PM 2,5 peenosakeste kontsentratsiooni võrdlus mõõdetud majade puhul

Üks enam levinuid ja inimkeha mõjutavaid peenosakesi on PM 2,5, mis on ka ahikütteil eralduvate osakeste suurus. Kokku sai mõõdetud kolme korteri ja elumaja osakeste kontsentratsiooni DustTrak seadmega ja seda kamina tööprotsessi käigus. Graafikult näeb ära, et 2,5 mikromeetrise läbimõõduga osakeste kontsentratsiooni normipiir eluaseme õhus on 0,025 mg/m³, mida antud mõõtmiste korral on Kukeseene 4 aadressil ületatud paaril korral seoses kamina ja alarõhu katsetega ning suurel määral ületatud Veskikaare kortermajas. Nähtav sinine joon jääb veidi alla 0,03 mg/m³, mille põhjustas toas töötav ventilaator. Info kohaselt oli ventilaator kasutuses ainult juhul, kui kaminas tuld ei põlenud. Suur peenosakeste kontsentratsiooni tõus Veskikaare 6 hoone puhul 4. minuti jooksul toimus kamina panemisel, kui oli tunda ja näha, et kaminast tuleb siseruumi tuhka. Pea 2,5 korda suurema peenosakeste kontsentratsiooni tagas ventilatsiooni puudulikkus. Ülejäänud korterites kontsentratsioon üle lubatud piiri pikaajaseks ei olnud.



Graafik 4.5.2 PM 10 peenosakeste kontsentratsiooni võrdlus mõõdetud majade puhul

PM 10 peenosakesed on samuti põlemisprotsessil eralduv ühendite suurus. Graafikult näeb ära, et 10 mikromeetrise läbimõõduga osakeste kontsentratsiooni normipiir eluaseme õhus on 0,05 mg/m³, mida antud mõõtmiste korral on Kukesene 4 aadressil ületatud paaril korral väga vähest aega. Sinine joon, mis märgib Veskikaare 6 maja korterit, on läinud kuni 0,11 mg/m³ jääb veidi alla 0,03 mg/m³, mille põhjustas toas töötav ventilaator. Ka sel juhul ületab Veskikaare 6 majas kütmisprotsessi käigus PM 10 peenosakeste kontsentratsioon normi pea kahekordselt. Eeltoodud graafikud 4.5.1 ja 4.5.2 toovad jällegi esile probleemi, et ka renoveeritud majades ventilatsioon pole korralikult tehtud või on puudulik.

5 Lahendused

4.6 Kamina režiimiga ventilatsiooniseadmed

Uurimistöö keskendus korterites ja elumajades kasutatavatele ventilatsiooniseadmetele, mis võimaldavad spetsiaalset kaminarežiimi. Selle režiimi eesmärk on suurendada sissepuhke õhuvoolu mahtu ja tekitada ruumis ülerõhku, eriti kaminat kasutades. Vallox seadme 150SE andmed kinnitavad selle võimet reguleerida sissepuhke õhuhulka kamina töötamise ajal, võimaldades kuni 75% ulatuses seadme maksimaalsest õhuvoolest.

Fan speeds	Extract air flow (dm ³ /s)	The total input power of the fans W
1	40	35
2	60	50
3	70	70
4	80	90
5	95	125
6	110	180
7	125	260
8	145	340

Joonis 5.1 Vallox ventilatsiooniseadme 150SE näitajad

Seadme 150SE korral on maksimaalne sissepuhke õhuhulk 145 l/s. Kui elamul või korteril on vajadus 80 l/s järele, saab Valloxi seadet kasutada kamina töötamise ajal tekkiva sissepuhke õhuhulga reguleerimiseks. Eeldades, et seade töötab igapäevaselt 55% oma võimsusest, saab juhtpuldil kamina kasutamise ajal suurendada sissepuhke õhuhulka kuni 75%, mis hetkel tähendaks lisaks 30 l/s õhku. Need seadmed on programmeeritud hoidma ülerõhku maksimaalselt 300 minutit, sest vastasel juhul võib ülerõhk mõjutada tarindit. See tähendab, et nende seadmetega on võimalik vältida alarõhu teket kaminaga kütmise ajal.

Kaminarežiimiga seadmeid pakuvad ka teised tootjad, nagu Wanwas, Flexit, Titon, Komfovent ja mitmed teised. Näiteks katsetati Pärnu maakonnas asuvas elumajas Komfovendi seadet Domekt R250 F C6.1 juhtimispuuldiga. Antud seadmel ja puldil on kasutajasõbralik seadistus vastavalt vajadusele ja olukorrale. Valikus oli külaliste, toiduvalmistamise, kaminarežiimi ja „boost“ režiimid, mis kõik muudavad elu mugavamaks vastavalt etteantud olukordadele. Eesti suurim Komfovendi seadmete tarnija BVT Partners pakub võimalust aktiveerida kaminarežiimi nii telefoni kaudu kui ka küttekolde lülitist, mis on ühendatud kontrolliga. Komfovendi seadmetele saab lisada CO₂- või temperatuurianduri, mille puhul hakkaks kaminarežiim tööle,

kui need näitajad ületavad kindlaksmääratud kontsentratsiooni piiri. Õhuvooluhulkade suurused peavad eelnevalt olema määratud või valitavad kohapeal.

Clioxi ja Flexiti seadmetel on kaminarežiim, kus kuigi lisa õhuhulka otseselt pole määratud, saab telefonirakenduse abil mugavalt muuta sisse- ja väljapuhke õhukoguseid protsentuaalselt. Clioxi esindajatega arutades leiti viise õhuvooluhulkade tasakaalustamiseks suurte õhukoguste puhul. Siiski jõuti järeldusele, et üle 1000 l/s õhuhulkade puhul pole seadmetel endil võimalik süsteemi tasakaalus hoida. Pakuti tulevikulahendust tehisintellekti näol, mis suudaks paremini süsteemi toimuvat ette näha, analüüsida ja vajadusel õiged otsused vastu võtta, et süsteem jääks tasakaalu.

Zehnderi seadmetel puudub Eestis pakutavatel toodetel kaminarežiim või ahjurežiim, peamiselt huvipuuduse tõttu. Siiski on Zehnderi seadmetel olemas andurivalmidus ja võimalus paigaldada kamina või korstna juurde temperatuuri- või vingugaasiandur. Tarnijad rõhutavad, et üle 1000 l/s õhuhulkade seadmetel on praktiliselt võimatu sellist režiimi kasutada, kuna see lükkaks kogu süsteemi tasakaalust välja.

Tsentraalseid ventilatsiooniseadmeid, mis varustaksid värske õhuga suuri kortermaju või büroohooneid ning võimaldaksid kasutada kaminarežiimi, pole laialdaselt saadaval. Üheks selliseks võimaluseks oleks VAV (Variable air Volume ehk muutuva õhuhulgaga) süsteem. See süsteem võimaldaks korterites luua erinevaid sisekliima tingimusi, näiteks jahutada ruume suurendades õhuvooluhulka. Seda saaks kasutada ka kaminkütte puhul, et nupuvajutusega suurendada kindlas korteris õhuvooluhulka. Juhul kui kaminasse tuli süütada Clioxi ja Flexiti seadmetel, on igaühel kaminarežiimi võimalus, kus pole küll otseselt määratud lisa sissepuhkeõhu õhuhulka, kuid mille puhul saab telefoniäpi kaudu mugavalt muuta sissepuhke ja väljatõmbe õhukoguseid protsentuaalselt. Clioxi esindajatega arutati ka suurte õhukoguste puhul õhuhulkade tasakaalustamise viise. Lõpuks jõuti järeldusele, et õhuvooluhulkade puhul, mis on suuremad kui 1000 l/s, pole seadmetel ise võimalik süsteemi tasakaalus hoida, kui pakuti välja võimalik tulevikulahendus tehisintellekti näol, mis oskaks paremini süsteemis toimuvat ette näha, analüüsida ja kõigele eelnevale kohaselt võtta vastu õiged otsused, et süsteem tasakaalus hoida.

Flexitil on viimastel aastatel tulnud kasutusele 4-nupuline pult, millel on valikuvariandid "kodus", "kodust väljas", "boost" ning "kaminarežiim". See tähendab, et reaalne puldivajadus kaob ära, sest kõike ülejäänut saab kontrollida ja muuta telefonist. Kaminarežiimil on tehase poolt määratud protsendilised väärtused, milleks sissepuhkel on 90% ja väljatõmbel 50%.

Tänapäevase kiire tehnoloogiaarenguga on turule tulnud ka uued tegijad ja tooted, mida varasemalt kasutatud pigem suurtes büroooonetes ja keskustes – selleks on infrapuna andurid. Kodusesse sobilikke seadmeid toodab näitena FirePro, kelle tootevalikus on mitmed infrapuna tuleandurid, mida saab kasutada ka kaminade puhul. Kuulsaim neist FlameSpec-IR3, mis on uusim ja kiireim infrapuna seade. Vaid loetud hetkega saab seadeldis aru, et kaminas on süttinud tuli ning saab koheselt anda info ventilatsiooniseadmele, mis vahetult ruumis

õhuvooluhulka tõstab. Eelnimetatud süsteemiga kaasneb aga ka suur viga. Infrapuna seade asub kaminast väljaspool ning vajab vaadet kaminale, mis tähendab, et kui inimene teeb kaminasse tuld ning on anduril ees, siis ei pruugi andur seda näha.

Antud töös on LISA 2 välja toodud skemaatiliselt eelnimetatud reguleerimissüsteemid ning kuidas need töötavad.

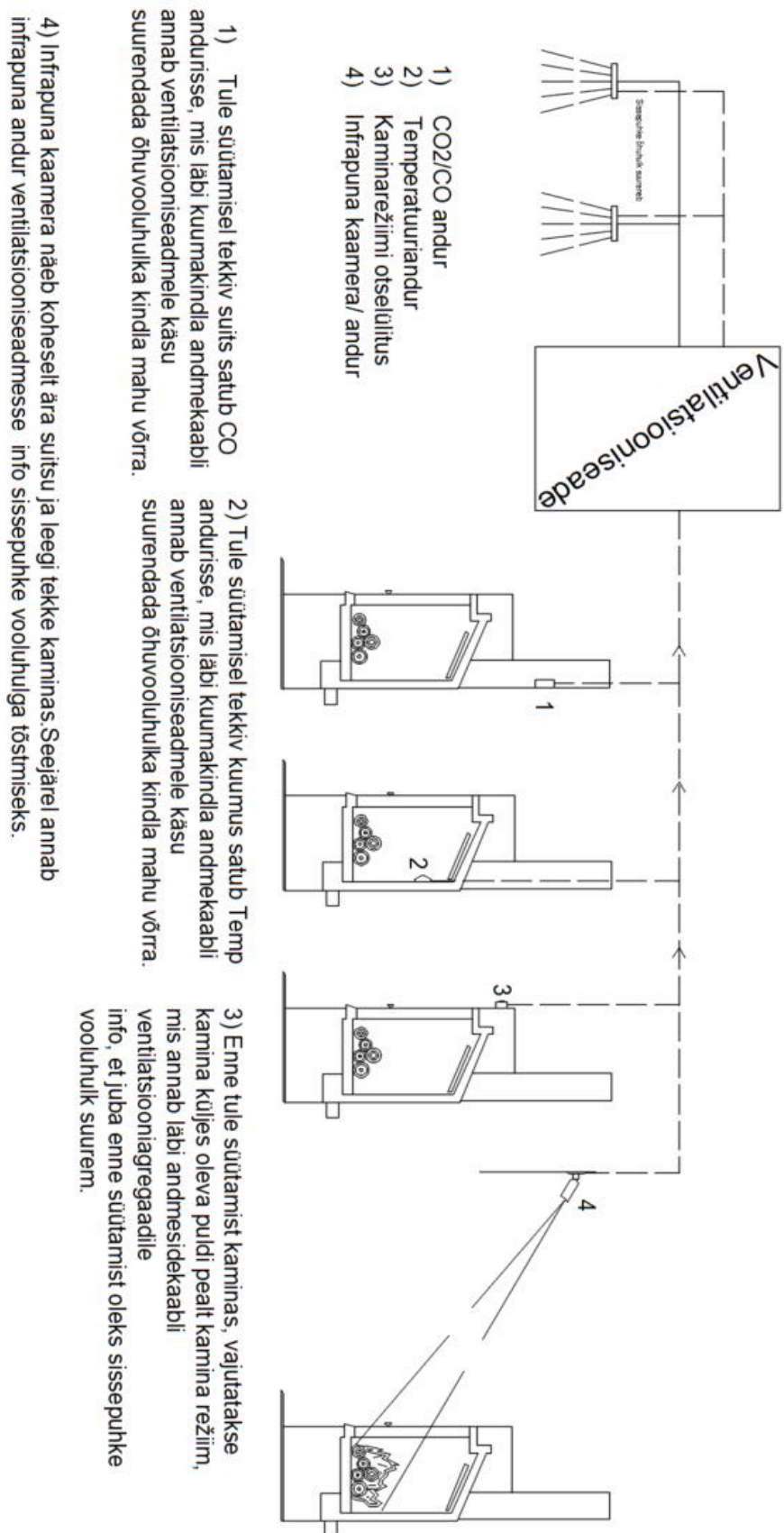
Teised tootjad, nagu Wanwas, Flexit, Titon ja Komfovent, pakuvad samuti kaminarežiimiga seadmeid, mille kasutamisel saab suurendada õhuvooluhulka. Näiteks Komfoventi seadmetel on võimalik aktiveerida kaminarežiim telefoni või küttekolde lülitiga ning neile on lihtne lisada CO₂- või temperatuuriandur, mis aktiveeriks kaminarežiimi vastavalt vajadusele.

Mõnedel seadmetel, nagu Cliox ja Flexit, on piirangud õhuvooluhulkade tasakaalustamisel, eriti üle 1000 l/s õhuvoolude korral, kus süsteem ei suuda end ise tasakaalus hoida. Sellele pakuti tulevikus lahendust tehisintellekti abil, mis suudaks süsteemi paremini analüüsida ja hoida tasakaalus.

Zehnderi seadmetel Eestis kaminarežiimi pole, kuid on olemas võimalus paigaldada andureid küttekolde juurde. Tsentraalseid ventilatsiooniseadmeid, mis võimaldaksid kaminarežiimi, pole laialdaselt saadaval, kuid VAV (muutuva õhuhulgaga) süsteem võimaldaks erinevate ruumide õhuhulgakasutust juhtida vastavalt vajadusele, sh kaminarežiimi aktiveerides.

Uute tehnoloogiate arenguga on turule tulnud infrapunaandurid, näiteks FirePro FlameSpec-IR3, mis tuvastavad kiiresti tule süttimise ja annavad seadmele käsu õhuvoolu suurendamiseks. Kuid sellisel süsteemil on puudus, kuna andur asub kaminast väljaspool ning ei pruugi tule süttimist kaminas alati tuvastada.

Uurimuses on esitatud skemaatiliselt erinevaid reguleerimisvõimalusi ja-süsteeme, mis on välja toodud joonisel 5.2.



Joonis 5.2 Ventilatsiooni juhtimissüsteemid

Tabel 4.1 Vajaliku lisaõhu protsentuaalsed väärtused erinevate õhuhulkadega ventilatsiooniseadmete puhul

Seadme max õhuvooluhulk	Tavaolukord		Kaminarežiim		Arvutatud väärtuste põhjal				Mõõdetud väärtuste põhjal			
	SP 50%	VT 55%	SP 60%	VT 50%	SP l/s	VT 50%	Puidu mass, kg	SP %	SP l/s	VT 50%	Puidu mass, kg	SP %
50	25	27,5	30	25	31,21	25	3	63	43,9	25	3	88
60	30	33	36	30	36,21	30	3	61	48,9	30	3	82
75	37,5	41,25	45	37,5	43,71	37,5	3	59	56,4	37,5	3	76
90	45	49,5	54	45	53,28	45	4	59	70,2	45	4	78
100	50	55	60	50	58,28	50	4	59	75,2	50	4	75
110	55	60,5	66	55	63,28	55	4	58	80,2	55	4	73
125	62,5	68,75	75	62,5	72,85	62,5	5	58	94	62,5	5	75
140	70	77	84	70	80,35	70	5	58	101,5	70	5	73
150	75	82,5	90	75	85,35	75	5	57	106,5	75	5	71

Tabelist 4.1 näeb ka protsentuaalselt erinevate ventilatsiooniseadmete puhul ära õhuvooluhulgad nii arvutatud, kui mõõdetud meetodite puhul. Tavaolukord ja kaminarežiim on pandud tehase seatud väärtustega, mille korral kaminarežiimis on sissepuhe 60% ja väljatõmme 50%. Arvutatud ja mõõdetud väärtustega on arvestatud, et väljatõmme on 50% ning sissepuhke protsent arvutati vastavalt tulemustes leitud väärtustele. Puidu mass on arvestatud kuni 75 l/s seadmetele 3kg, kuni 110 l/s 4 kg ja sealt edasi 5kg. Need arvud on valitud vastavalt korterite pindaladele, mida selliste vooluhulkadega seadmed suudavad ära katta. Mõõdetud tulemuste põhjal peaks sissepuhe olema 25-35% suurem väljatõmbest ahju efektiivseks toimimiseks. Seevastu arvutatud meetodite puhul jääb vahe 7-13% juurde.

5 Töö edasiarendamise võimalused

Töö käiku saab edasi arendada uurides ventilatsiooniseadme täpse protsentuaalse sissepuhke ja väljatõmbe osakaalu, mille puhul on rõhu muutused nullilähedased. Samuti oleks suure õhulekkega korterites võinud mõõta ahju siseneva õhuhulga suurust, et tekitada täpsem korrelatsioon õhelekkede, ruumi kubatuuri ja põlemiseks vajaliku õhu suhtes. Hetkel sai õhuvooluhulkasid ahju mõõdetud vaid Kukesene 4 maja puhul. Õhuvooluhulk, mida kamina tööks vaja läheb, on ka spetsiaalse kamina õhuvõtust – selle kujust ja suurusel. Kindlasti peab tulevikus võrdlema erinevat tüüpi ja suurustega kaminaid ja nende õhuvooluhulkasid sama massi puitmaterjali põletamisel. Samuti peaks võrdlusesse tooma rohkem väikese õhulekkearvuga kortereid ja elamuid, mille põhjal saab parema ülevaate väga hästi tihendatud tarinditega hoonetest. Põhjusel, et lõputöö käigus sai mõõdetud ainult ühe väikese õhulekkega ja kindla võimsusega kaminaga, siis oleks kindlasti vaja suurendada õhukindlate hoonete valimit, et proovida läbi erinevad ventilatsiooniseadmed ja kaminad, mis on hetkel mõõdetud tulikivi kaminast väiksema või suurema võimsusega.

Samuti oleks vajalik töötada ja katsetada läbi erinevad ventilatsiooni juhtimise meetodid, et näha nendega seonduvaid probleeme ja pimenurki ning selgitada välja, milline lahendus realselt töötab ja on kõige efektiivsem. Sellega seonduvalt oleks võimalik veel välja selgitada kõige efektiivsem ja mugavam asukoht ahjus andurite jaoks, lüliti asukoht tulekolda seinal ning infrapunakaamera asukoht, et süsteem töötaks võimalikult hästi.

7 Kokkuvõte

Tänapäeva kiirelt areneval ehitusmaastikul muutub energiatõhusus ja majade õhupidavus iga päevaga aina tähtsamaks tugipunktiks ehituses. Sarnaselt muutub aina aktuaalsemaks vanade puitmajade renoveerimine, millel on kas muinsus-, kultuuriline- või isiklik väärtus ning mis tihtipeale jäetakse ka vana küttekoldega, näiteks ahjuga. Kui aga maja fassaadi soojustatakse ning aknaümbrused tihendatakse, siis muutub ahiküttega hoonetel põlemisõhu kättesaamine aina keerulisemaks. Seetõttu peab renoveeritavatesse majadesse ehitama mehhaanilise sissepuhke ja väljatõmbega ventilatsioonisüsteemi. Seetõttu peab ahiküttele lahendustele mõtlema enneaegselt, enne renoveerimistöid, et oleks võimalik ehitada välja võimalikult efektiivne süsteem vajaliku lisaõhu tarnimiseks kamina või muu tulekoldeni. Lõputöös pakuti välja mitu varianti saavutamaks vajaliku õhukoguse efektiivse põlemisprotsessi läbiviimiseks. Variant on vedada ahjule katusele või maa alt ventilatsioonitorustik mehhaanilise klapi abil, mis on sõltumatu siseruumides kasutatavast süsteemist. Teine variant oleks ühendada ahju või ahju torustiku sees andur või infrapunaandur ventilatsiooniagregaadi süsteemiga, mis kuuma õhu liikudes muudaks automaatselt sissepuhke vooluhulka suuremaks ja väljatõmbe vooluhulka väiksemaks. Veel oleks variant kamina või tulekolde kõrvale mehhaanilise klapi nupp, mida ahju ja/või köögikubu kasutamisel sisse lülitada ning mis tagab piisava õhupealevoolu vajalike seadmete õhu kompenseerimiseks.

Ehitus või renoveerimislaenu andjal oleks soovitatav laenu andmisel teha laenusajale infoleht, millel oleks kirjas, et köögikubu ja kamina koostoimimisel on suur võimalus, et kaminas tuli ei sütti efektiivselt ning sellisel juhul on ventilatsiooniagregaadi sissepuhke õhuhulkasid vaja suurendada vastavalt tabelile. Juhul, kui ventilatsiooni seadmed või tsentraalne süsteem on aga rikkis või seisab kasutatuna elektriarvete pärast, peaks elanik avama akna või paigaldama tuppa võrskeõhuklapi. Samas näitasid katsete tulemused, et paari viimase aasta jooksul renoveeritud majadel on õhulekkarvud äärmiselt suured – 7,6 kuni 22 m³/(h·m² välistarind), mis ei vastanud üksi renoveeritud hoone õhulekke nõudele. Katsete järgi ei olnud suuremas osas hoonetes probleemi ka lisaõhu saamisega välispiiretest. Kui aga tegemist on õhukindla ja hästi tihendatud majaga, siis saab vastavalt teadustöös arvestatud hoonele ja õhulekkele vajalikud lisaõhu vooluhulgad sissepuhkele ja väljatõmbele Lisa 1 tabelist.

Tehtud töö kinnitab argumenti, et renoveeritud hoone puhul on korteritevahelised tarindid, aknad ja ka küttekolded ise väga suurteks külmasildadeks.

Kokkuvõtvalt saab öelda seda, et isegi kui hoone tarindid on õhupidavad ja hästi tihendatud, siis kaminade ja ahjude puhul võib infiltratsiooniõhk ning põlemiseks vajaminev lisaõhk hakata liikuma hoopis kolde enda ja selle ebatiheduste kaudu.

Katsetuse järelalusena tuli 1kg puitmaterjali põletamiseks vajalikuks õhuhulgaks keskmiselt 6,3 l/s õhku tulikivikamina TU1450/1 järgi. Arvutusmeetodite järgi vastavalt A. Kulli teoriale 1,94 l/s/kg, vastavalt J. Kolmanni teoriale 3,3 l/s/kg kohta, toetudes Paraschivi teoriale 1,3 l/s/kg puidu kohta ning lõpuks Spiridonovi teoria tulemusena 2,07 l/s/kg puidu kohta.

Ventilatsiooni juhtimise lahendustena on võimalik kasutada korteri-ja majapõhistel seadmetel temperatuuri ja süsihappegaasi andureid, kamina või küttekolde küljes olevat nuppu või näiteks infrapuna anduriga, mis suudab ära tuvastada tule süttimise.

8 Summary

In today's rapidly developing construction landscape, energy efficiency and the airtightness of buildings are becoming more and more important points of reference in construction every day. Similarly, the renovation of old wooden houses, which have either heritage, cultural or personal value, and which are often left with an old heating hearth, such as an oven, is becoming more and more relevant. However, if the facade of the house is insulated and the window surrounds are sealed, it becomes more and more difficult to get combustion air in buildings with stove heating. Therefore, a ventilation system with mechanical intake and exhaust must be built in the houses being renovated. Therefore, stove heating solutions must be thought of ahead of time, before the renovation works, so that it is possible to build the most efficient system possible to supply the necessary additional air to the fireplace or other hearth. In the final thesis, several options were proposed to achieve the necessary amount of air to carry out the effective combustion process. An option is to run a ventilation pipe from the roof or underground to the furnace with a mechanical valve that is independent of the indoor system. Another option would be to connect a sensor or infrared sensor inside the furnace or furnace piping to the ventilation unit system, which would automatically increase the intake flow rate and decrease the exhaust flow rate as the hot air moves. Another option would be a mechanical valve button next to the fireplace or hearth, which can be turned on when using the oven and/or kitchen hood, and which ensures sufficient air flow to compensate for the air in the necessary equipment.

It would be advisable for the construction or renovation lender to provide the borrower with an information sheet when granting the loan, which would state that there is a high chance that the kitchen hood and the fireplace work together, that the fireplace will not work efficiently and that either a window must be opened or a special electric fresh air valve must be used, which would not be very energy efficient, but would ensure required intake air volume. At the same time, the results of the tests showed that the air leakage numbers of the houses renovated in the last few years are extremely high - from 7.6 to 22 m³/(h·m² external facade), which did not meet the air leakage requirement of any renovated building. According to the tests, in the majority of buildings there was no problem with getting additional air from the outer wall. However, if it is an airtight and well-sealed house, then according to the building and the air leakage calculated in the

research paper, the necessary additional air flows for intake and exhaust can be obtained from the table in Appendix 3.

The work done confirms the argument that in the case of a renovated building, the structures between apartments, windows and also the heating hearths themselves are very large cold bridges.

In summary, it can be said that even if the building's structures are airtight and well sealed, in the case of fireplaces and stoves, infiltration air and the additional air needed for combustion can instead start moving through the hearth itself and its leaks.

As a conclusion of the experiment, the amount of air needed to burn 1 kg of wood material was an average of 6.3 l/s of air according to the flint fireplace TU1450/1. According to calculation methods according to A. Kull's theory 1.94 l/s/kg, according to J. Kolmann's theory 3.3 l/s/kg based on Paraschiv's theory 1.3 l/s/kg of wood and finally as a result of Spiridonov's theory 2.07 l/s/kg of wood.

As ventilation control solutions, it is possible to use temperature and carbon dioxide sensors on apartment- and house-based devices, a button on the fireplace or hearth, or, for example, an infrared sensor that can detect the ignition of a fire.

Kasutatud kirjanduse loetelu

1. A. Cable; L. Georges. Applied Thermal Engineering, 2019
2. Kalamees, T. Elamupiirete õhupidavus. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2008
3. Binamu A. Integrating building design properties "air tightness" and ventilation heat recovery for minimum heating energy consumption in cold climates. Dissertation. Tampere University of Technology, 2002.
4. Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika. (Vastu võetud 05.06.2015, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 21.01.2019). - Elektrooniline Riigi Teataja
<https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021> (02.03.2019)
5. „Hoone sisekliimale esitatavad nõuded“ (eelnõu 2018) Lisa 1. Hoone projekteerimisel rakendatavad sisekliima parameetrid.
6. P. Larry Using wood as a fuel source
<https://www.fireplace.co.uk/blog/using-wood-as-a-fuel-source/95>
7. R.L. Carvalho „Wood stove combustion air retrofits: A low cost way to increase energy savings in dwellings
8. Ots, A. Soojustehnika aluskursus. Termodünaamika. Põlemine. Soojusülekanne. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
9. P. Rickaby "Ventilation for Airtightness", 1999
10. Sherman; M. Howard. Air infiltration in buildings; University of California, Berkeley ProQuest , 1980.
11. W.E. Wilson; J.C. Chow „Monitoring of particulate matter“, 2002
12. Binamu A. Integrating building design properties "air tightness" and ventilation heat recovery 2013
13. Janssens, A., Hens, H. Interstitial condensation due to air leakage: a sensitivity analysis. Journal of Thermal Envelope and Building Science 2003;27(1):15-29
14. Veski, A. Ahjud, pliivid, kaminad. Tallinn: Tormikiri OÜ, 2005.

15. Huberg, H. Puudega köetavad kütteseadmed uutes ja renoveeritavates majades ,2015
- 16.Kask, Ü. Põlemine. Küttekolded. Hoonete soojusvajadus. Küttesüsteemide kavandamine. (18.04.2017). Tartu.
17. Kull, A., Mikk, I., Ots, A.. Soojustehnika. Tallinn: Valgus, 1974.
18. Huberg, H. Ahjuküttest 2018. (24.11.2018). Tallinn.
- 19.Kalamees, T. Õhupidamise hindamine/mõõtmine-kas peaks olema kohustuslik?
- 20.Fernandes E., Jantunen M., Carrer P., et al. EnVIE: Co-ordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects. 2009. Kättesaadav: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/126459681EN6.pdf>
- 21.Paraschiv S., Serban A. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition
- 22.Curkeet, Rick Wood Combustion Basics, 2011
- 23.Spiridonov V.,Curic M. Atmospheric Pressure and Wind, 2020
- 24.Babin T., Ramanathan S. Numerical investigation of backflow in natural draft chimneys, 2021
- 25.Tamura, G. T. Pressure Differences Caused by Wind on Two Tall Buildings, 1968
- 26.Jõgi, Tiiu Ventilatsiooni ja köögikubude töötamine õhupidavates elamutes, 2019
- 27.Kolmann, Jürgen Regelwerke für den hafner, Umfassender Überblick sowie praktische Bedeutung am Beispiel Luftzufuhr, 2013
- 28.Hade, Imre Ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimise automaatika, 2013
- 29.Boman, C., Pettersson, E. Stove performance and emission characteristics in residential wood log and pellet combustion, 2011
- 30.Matthess, M. Improvement of Efficiency and Emissions from Wood Log Stoves by Retrofit Solutions"
- 31.„Impact of Chimney-draught
- 32.Endriss, F. Conditions on Combustion and Emission Behavior of a Wood-burning Stove, 2023

LISA 1

Lisõhu valiku tabel				
Korteri pindala, m ²	Vajalik kamina võimsus, W	Vajalik kamina võimsus, kW	Vajalik puude kogus 1h puudu põletamiseks, kg (puudu niiskus 20%)	Vajalik lisa sp õhukogus, l/s
25	2500	2,5	3,125	6,47
30	3000	3	3,75	7,76
35	3500	3,5	4,375	9,06
40	4000	4	5	10,35
45	4500	4,5	5,625	11,64
50	5000	5	6,25	12,94
55	5500	5,5	6,875	14,23
60	6000	6	7,5	15,53
65	6500	6,5	8,125	16,82
70	7000	7	8,75	18,11
75	7500	7,5	9,375	19,41
80	8000	8	10	20,70
85	8500	8,5	10,625	21,99
90	9000	9	11,25	23,29
95	9500	9,5	11,875	24,58
100	10000	10	12,5	25,88

Lisa 2

BUILDING LEAKAGE TEST **Taara 4**

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Taara4_alarohk

Technician: Siim Lomp

Project Number:

Customer:

Building Address:

Test Results at 50 Pascals:

q₅₀ : m³/h (Airflow) 132 (+/- 1.8 %) n₁₀ : 1/h (Air Change Rate) 0.87

q_{F50} : m³/(h·m² Floor Area) 2.59 q_{E10} : m³/(h·m² Envelope Area) 3.08

Leakage Areas:

ELA₅₀ : m² 0.0090 (+/- 1.8 %)

ELA_{F50} : m²/m² 0.0001767

ELA_{E50} : m²/m² 0.0002101

Building Leakage Curve: Air Flow Coefficient (C_{env}) = 24.9 m³/(h·Paⁿ) (+/- 4.9 %)

Air Leakage Coefficient (C_L) = 25.5 m³/(h·Paⁿ) (+/- 4.9 %)

Exponent (n) = 0.713 (+/- 0.014)

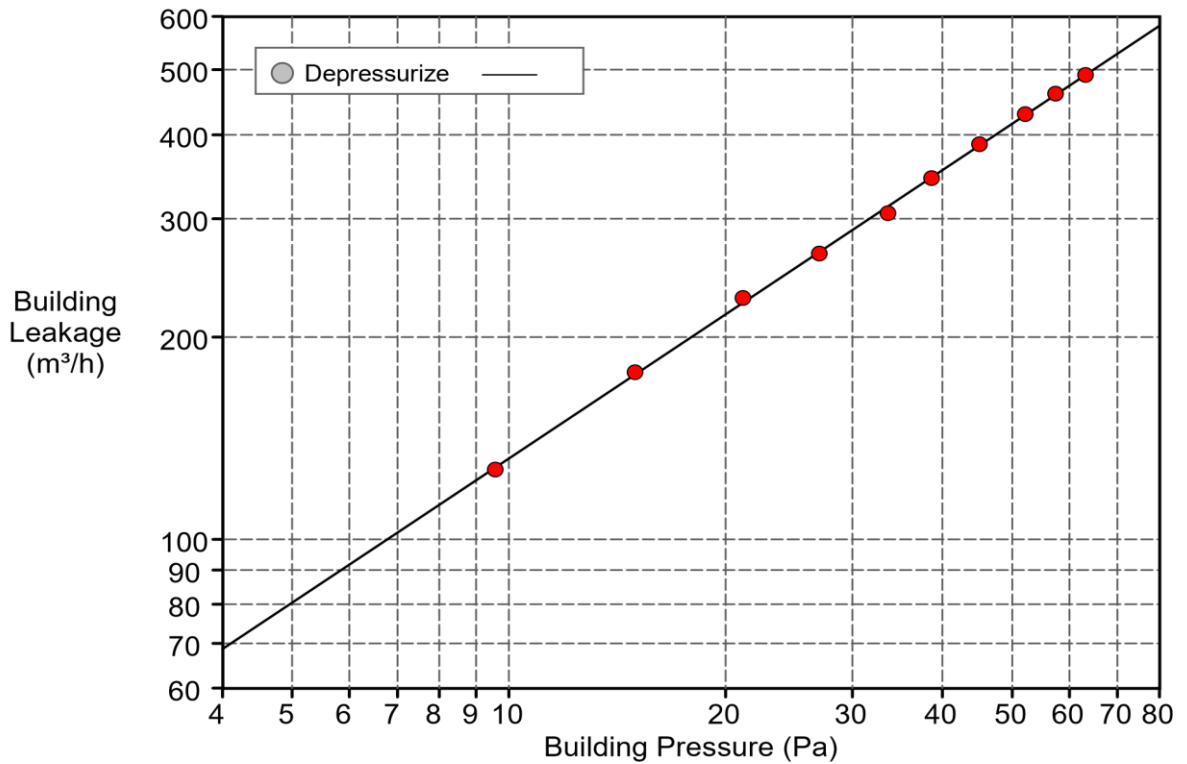
Coefficient of Determination (r²) = 0.99943

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method: Method 2 - Test of Building Envelope

Purpose of Test:



Date of Test: 23.01.2023 Test File: Taara4_alarohk

Building Information

Internal Volume, V (m ³) (according to ISO)	151.17
Net Floor Area, A_F (m ²) (according to ISO)	50.9
Envelope Area, A_E (m ²) (according to ISO)	42.8
Height (m)	2.98
Uncertainty of Dimensions (%)	
Year of Construction	
Type of Heating	
Type of Air Conditioning	
Type of Ventilation	None
Building Wind Exposure	Partly Exposed Building
Wind Class	Moderate Breeze

Equipment Information

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Taara4_alarohk

Depressurization Test:

Environmental Data

Indoor Temperature (°C)	Outdoor Temperature (°C)	Barometric Pressure (Pa)
21.1	-6.0	101325.0

Baseline Pressure Data

Pre-Test			Post-Test		
$\Delta p_{0,1-}$	$\Delta p_{0,1+}$	$\Delta p_{0,1}$	$\Delta p_{0,2-}$	$\Delta p_{0,2+}$	$\Delta p_{0,2}$
-7.8	0.0	-7.8	-8.7	0.0	-8.7

Data Points - Automated Test (TTE 5.0.8.4)

Error Configuration	Baseline		Nominal Flow Pressure (Pa)	Adjusted Flow (m³/h)	Adjusted Building			
	Nominal Building Pressure (Pa)	adjusted Fan Pressure (Pa)			Adjusted Flow (m³/h)	q_{env} (m³/h)	q_L (m³/h)	Fan %
	-7.8	n/a	n/a					
0.0 Ring B	-71.5	-63.2	42.5	526	478	491		
	-65.7	-57.4	37.3	493	449	461		
0.4 Ring B	-60.4	-52.1	32.4	460	418	429		
0.3 Ring B	-53.3	-45.0	26.3	415	377	387	0.4 Ring B	
	-46.9	-38.6	20.9	369	336	345	-0.2 Ring B	
	-41.8	-33.6	242.3	327	298	306	-	
2.3 Ring C	-35.2	-27.0	185.1	285	259	266	-0.5 Ring C	
	-29.4	-21.1	137.9	245	223	229	1.7 Ring C	
	-23.2	-15.0	84.1	190	173	177	0.8 Ring C	
	-17.8	-	9.6	44.1	136	124	127	-0.6 Ring C
	-8.7	n/a	n/a					

Deviations from Standard ISO 9972 - Test Parameters

- At least one of the measured baseline pressure values is outside of acceptable limits.
- The minimum pressure is not within +/- 3Pa of the greater of 10 Pa or (5 * zero-flow pressure Δp_{01}).

Lisa 3

BUILDING LEAKAGE TEST Taara 6

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Taara6_alarohk

Technician: Siim Lomp

Project Number:

Customer:

Building Address:

Test Results at 10 Pascals:

q₅₀ : m³/h (Airflow) 962 (+/- 12.9 %) n 10 : 1/h (Air Change Rate)

4.72

q_{F50} : m³/(h·m² Floor Area) 11.83

q_{E50} : m³/(h·m² Envelope Area) 7.69

Leakage Areas:

ELA₅₀ : m² 0.0656 (+/- 12.9 %)

ELA_{F50} : m²/m² 0.0008064

ELA_{E50} : m²/m² 0.0005238

Building Leakage Curve: Air Flow Coefficient (C_{env}) = 185.0 m³/(h·Paⁿ) (+/- 35.0 %)

Air Leakage Coefficient (C_L) = 189.8 m³/(h·Paⁿ) (+/- 35.0 %)

Exponent (n) = 0.705 (+/- 0.099)

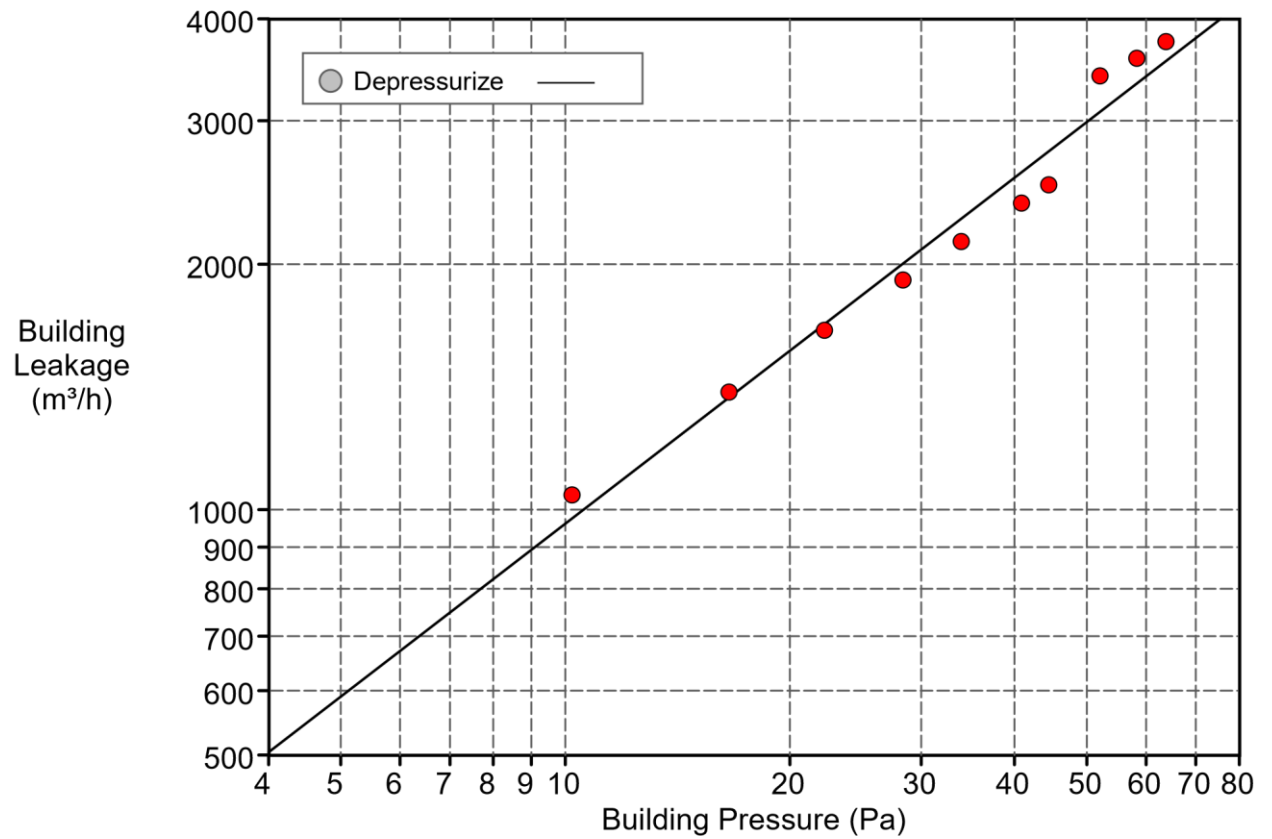
Coefficient of Determination (r²) = 0.97099

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method: Method 2 - Test of Building Envelope

Purpose of Test:



Date of Test: 23.01.2023 Test File: Taara6_alarohk

Building Information	
Internal Volume, V (m ³) (according to ISO)	203.65
Net Floor Area, A_F (m ²) (according to ISO)	81.3
Envelope Area, A_E (m ²) (according to ISO)	125.15
Height (m)	
Uncertainty of Dimensions (%)	
Year of Construction	
Type of Heating	
Type of Air Conditioning	
Type of Ventilation	None
Building Wind Exposure	Partly Exposed Building
Wind Class	Moderate Breeze

Equipment Information

Date of Test: 23.01.2023 Test File: TAARA 6 Alaröhk

Depressurization Test:

Environmental Data

Indoor Temperature (°C)	Outdoor Temperature (°C)	Barometric Pressure (Pa)
12.0	-4.5	101325.0

Baseline Pressure Data

Pre-Test			Post-Test		
$\Delta p_{0,1-}$	$\Delta p_{0,1+}$	$\Delta p_{0,1}$	$\Delta p_{0,2-}$	$\Delta p_{0,2+}$	$\Delta p_{0,2}$
-2.9	0.0	-2.9	-2.7	0.0	-2.7

Data Points - Automated Test (TTE 5.0.8.4)

	Baseline		Nominal Flow Pressure (Pa)	Adjusted Flow Pressure (Pa)	Adjusted Flow q_r (m ³ /h)	Adjusted Building			
	Nominal Building Pressure (Pa)	adjusted Fan Pressure (Pa)				q_{env} (m ³ /h)	q_L (m ³ /h)	Fan %	
ErrorConfiguration									
	-2.9	n/a	n/a						
	-66.6	-63.8	31.0	3935	3657	3752			
5.6 Open	-61.1	-58.3	28.1	3756	3490	3581	7.4	Open	-54.8 -52.0
		25.4	3572	3319	3406	10.7	Open		
	-47.3	-44.4	96.7	2627	2441	2504			-
9.0 Ring A	-43.7	-40.9	87.0	2494	2317	2378			-
8.4 Ring A									
	-36.7	-33.9	69.9	2238	2080	2134			-
6.2 Ring A	-31.2	-28.4	56.1	2008	1865	1914			-
4.5 Ring A	-25.1	-22.3	42.1	1741	1618	1660	-1.8	Ring A	-19.4 -16.6
		29.6	1462	1359	1394	1.5	Ring A		
	-13.0	-10.2	185.5	1094	1017	1043			
6.9 Ring B	-2.7	n/a	n/a						

Lisa 4

BUILDING LEAKAGE TEST Lydia Koidula 4

Date of Test: 17.02.2023 Test File: Ly_Koidula_4_krt9

Technician: Mark Vaino

Project Number:

Customer:

Building Address:

Test Results at 50 Pascals:

q₅₀ : m³/h (Airflow) 876 (+/- 0.7 %) n₅₀ : 1/h (Air Change Rate) 14.65

q_{F50} : m³/(h·m² Floor Area) 36.65 q_{E50} : m³/(h·m² Envelope Area)

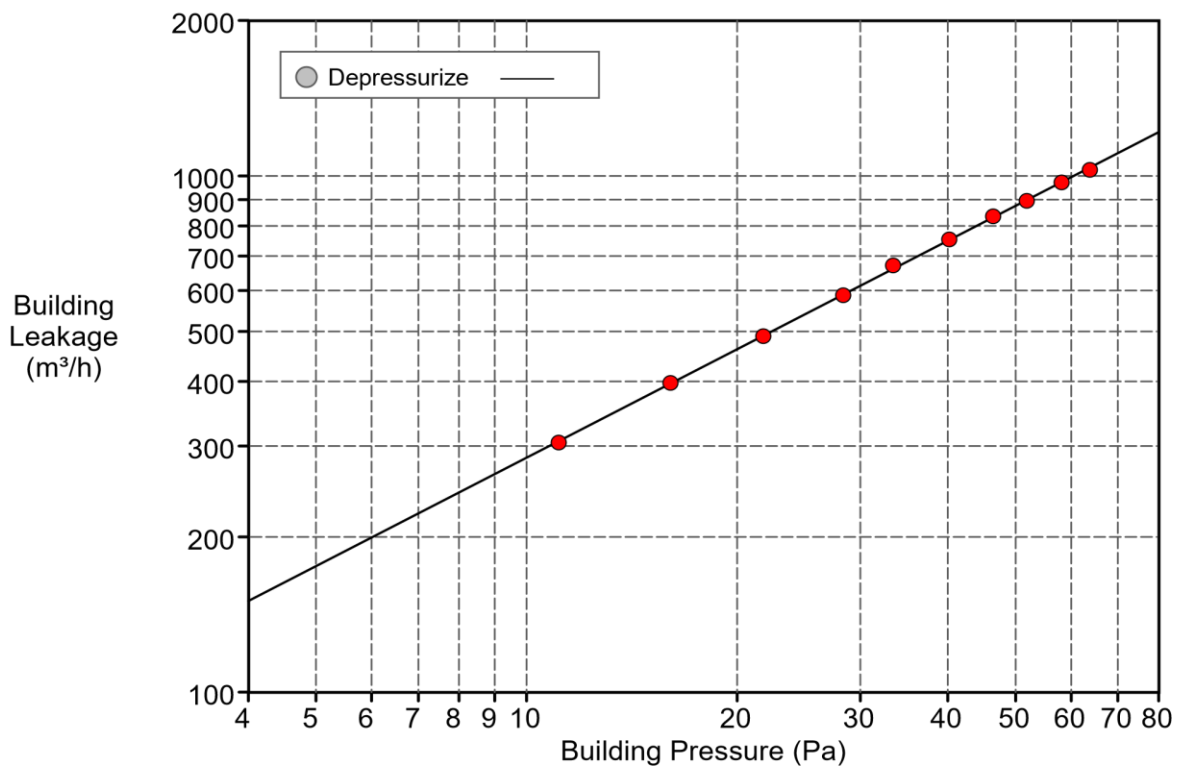
38.35

Leakage Areas:

ELA₅₀ : m² 0.0267 (+/- 0.7 %)

ELA_{F50} : m²/m² 0.0011170

Purpose of Test:



ELA E50 : m²/m²

0.0011688

Building Leakage Curve: Air Flow Coefficient (C_{env}) = 55.9 m³/(h·Paⁿ) (+/- 3.4 %)

Air Leakage Coefficient (C_L) = 57.1 m³/(h·Paⁿ) (+/- 3.4 %)

Exponent (n) = 0.698 (+/- 0.010)

Coefficient of Determination (r²) = 0.99971

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method: Method 2 - Test of Building Envelope

Date of Test: 17.02.2023 Test File: Ly_Koidula_4_krt9

Building Information

Internal Volume, V (m ³) (according to ISO)	59.8
Net Floor Area, A _F (m ²) (according to ISO)	23.9
Envelope Area, A _E (m ²) (according to ISO)	22.84
Height (m)	2.51
Uncertainty of Dimensions (%)	
Year of Construction	
Type of Heating	
Type of Air Conditioning	
Type of Ventilation	None
Building Wind Exposure	Highly Protected Building
Wind Class	Light Breeze

Equipment Information

Date of Test: 17.02.2023 Test File: Ly_Koidula_4_krt9

Depressurization Test:

Environmental Data

Indoor Temperature (°C)	Outdoor Temperature (°C)	Barometric Pressure (Pa)
21.0	1.0	101325.0

Baseline Pressure Data

Pre-Test			Post-Test		
$\Delta p_{0,1-}$	$\Delta p_{0,1+}$	$\Delta p_{0,1}$	$\Delta p_{0,2-}$	$\Delta p_{0,2+}$	$\Delta p_{0,2}$
-1.3	0.0	-1.3	-1.5	0.0	-1.5

Data Points - Automated Test (TTE 5.0.8.4)

Nominal Building Pressure (Pa)	Baseline adjusted Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow q_r (m³/h)	Adjusted Flow q_{env} (m³/h)	Adjusted Flow q_L (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-1.3	n/a	n/a					
-65.2	-63.8	180.6	1080	1008	1029	1.0	Ring B
-59.6	-58.2	161.4	1021	953	973	0.1	Ring B
-53.2	-51.8	136.6	940	878	895	0.3	Ring B
-47.8	-46.4	118.8	877	819	835	0.5	Ring B
-41.6	-40.2	96.5	791	738	753	0.2	Ring B
-34.8	-33.4	76.5	704	658	671	1.5	Ring B
-29.8	-28.4	58.6	617	576	588	0.3	Ring B
-23.2	-21.8	40.5	514	480	489	0.2	Ring B
-17.5	-16.1	26.6	417	389	397	0.3	Ring B
-12.5	-11.1	231.3	320	298	305	0.6	Ring C
-1.5	n/a	n/a					

Lisa 5

BUILDING LEAKAGE TEST Veskikaare 6

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Veskikaare6_alarohk

Technician: Siim Lomp

Project Number:

Customer:

Building Address:

Test Results at 10 Pascals:

q₅₀ : m³/h (Airflow) 274 (+/- 3.7 %) n₁₀ : 1/h (Air Change Rate) 2.53

q_{F50} : m³/(h·m² Floor Area) 6.39 q_{E10} : m³/(h·m² Envelope Area) 6.90

Leakage Areas:

ELA₅₀ : m² 0.0187 (+/- 3.7 %)

ELA_{F50} : m²/m² 0.0004358

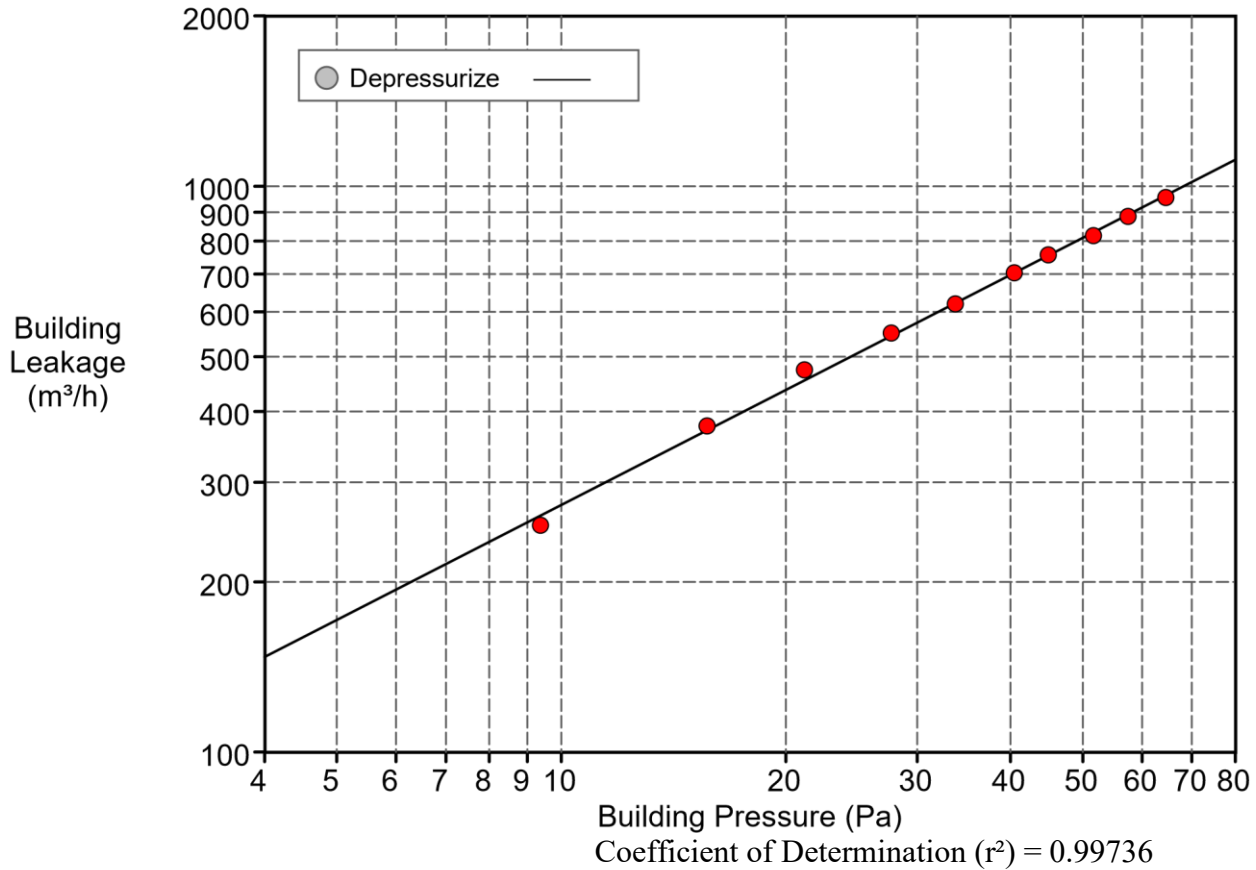
ELA_{E50} : m²/m² 0.0004704

Building Leakage Curve: Air Flow Coefficient (C_{env}) = 56.1 m³/(h·Paⁿ) (+/- 9.9 %)

 Air Leakage Coefficient (C_L) = 57.8 m³/(h·Paⁿ) (+/- 9.9 %)

 Exponent (n) = 0.676 (+/- 0.028)

Purpose of Test:



Test Standard: ISO 9972
 Test Mode: Depressurization
 Type of Test Method: Method 2 - Test of Building Envelope
 Date of Test: 23.01.2023 Test File: Veskikaare6_alarohk

Building Information	
Internal Volume, V (m^3) (according to ISO)	108.29
Net Floor Area, A_F (m^2) (according to ISO)	42.8
Envelope Area, A_E (m^2) (according to ISO)	39.65
Height (m)	2.53
Uncertainty of Dimensions (%)	
Year of Construction	
Type of Heating	
Type of Air Conditioning	
Type of Ventilation	None
Building Wind Exposure	Highly Protected Building
Wind Class	Gentle Breeze

Equipment Information

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Veskikaare6_alarohk

Depressurization Test:

Environmental Data

Indoor Temperature (°C)	Outdoor Temperature (°C)	Barometric Pressure (Pa)
20.3	-5.4	101325.0

Baseline Pressure Data

Pre-Test			Post-Test		
$\Delta p_{0,1-}$	$\Delta p_{0,1+}$	$\Delta p_{0,1}$	$\Delta p_{0,2-}$	$\Delta p_{0,2+}$	$\Delta p_{0,2}$
-1.5	0.0	-1.5	-2.2	0.0	-2.2

Data Points - Automated Test (TTE 5.0.8.4)

Nominal Building Pressure (Pa)	Baseline adjusted Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow q_r (m ³ /h)	Adjusted Flow q_{env} (m ³ /h)	Adjusted Flow q_L (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-							
1.5	n/a	n/a					
-	-64.6	160.1	1017	928	956	-	Ring B
66.4						0.9	
-	-57.5	136.9	941	859	884	-	Ring B
59.4						0.8	
-	-51.6	117.1	871	795	819	-	Ring B
53.5						1.3	
-	-44.9	100.0	805	735	757		Ring B
46.8						0.2	
-	-40.5	86.4	748	683	703	-	Ring B
42.3						0.0	
-	-33.7	67.0	660	602	620	-	Ring B
35.6						0.3	
-	-27.7	52.7	585	534	550		Ring B
29.5						1.1	
-	-21.2	39.0	504	460	474		Ring B
23.0						4.4	
-	-15.7	24.6	401	366	377		Ring B
17.6						1.8	
-	-9.4	164.1	268	245	252	-	Ring C
11.3						3.9	
-	n/a	n/a					
2.2							

Deviations from Standard ISO 9972 - Test Parameters

None

Date of Test: 23.01.2023 Test File: Veskikaare6_alarohk