



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

EHITUSTEADUSKOND

Ehitiste projekteerimise instituut

PUITSÕRESTIK VÄLISSEINA LIITEKOHTADE ÕHULEKKE LABORATOORNE ANALÜÜS

AIR LEAKAGE MEASUREMENTS OF TIMBER FRAME EXTERNAL WALL
CONNECTIONS

EEA 60 LT

Üliõpilane: Mihkel Pärnalaas

(allkiri)

Juhendaja: Prof. Targo Kalamees

(allkiri)

Tallinn, 2015.a.

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 021192 EAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees (allkiri)

Sisukord

1	Sissejuhatus	4
2	Hoonepiirete õhulekked	5
2.1	Hoonepiirete õhupidavuse tagamine	7
2.2	Tüüpilised lekkekohad	9
2.3	Kirjanduse ülevaade eelnevate tööde kohta	12
2.3.1	Välisseina välisnurk	12
2.3.2	Välisseina ja sokli liitekoht	12
2.3.3	Välisseina ja vahelae liitekoht	14
2.3.4	Välisseina ja akna liitekoht	14
2.3.5	Välisseina ja katuse liitekoht	16
3	Meetodid	17
3.1	Mõõtestandardid	17
3.2	Mõõteseade	17
3.3	Mõõtemetoodika	20
3.4	Õhulekkekohtade tuvastamine	21
3.5	Uuritavad liitekohad	22
3.5.1	Välisseina välisnurk	24
3.5.2	Välisseina ja sokli liitekoht	26
3.5.3	Välisseina ja vahelae liitekoht	28
3.5.4	Välisseina ja akna liitekoht	29
3.5.5	Välissein vannitoa kohal	32
3.5.6	Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht	34
3.5.7	Välisseina ja katuse liitekoht	36
3.5.8	Katusehari	37
4	Laboratoorsed mõõtmistulemused	38
4.1.1	Välisseina välisnurk	38
4.1.2	Välisseina ja sokli liitekoht	42
4.1.3	Välisseina ja vahelae liitekoht	45
4.1.4	Välisseina ja akna liitekoht	48
4.1.5	Välissein vannitoa kohal	51
4.1.6	Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht	54
4.1.7	Välisseina ja katuse liitekoht	57
4.1.8	Katusehari	58
4.1.9	Laboratoorsete mõõtmistulemuste kokkuvõte	59
5	Tulemuste hindamine	61
5.1.1	Välisseina välisnurk	61
5.1.2	Välisseina ja sokli liitekoht	61
5.1.3	Välisseina ja vahelae liitekoht	62
5.1.4	Välisseina ja akna liitekoht	63
5.1.5	Välissein vannitoa kohal	64
5.1.6	Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht	64
5.1.7	Välisseina ja katuse liitekoht	65
5.1.8	Katusehari	66
5.1.9	Reaalse hoone eeldatav õhuleke	66
6	Kokkuvõte	68
7	Summary	69
7.1	Introduction	69

7.2	Methods	69
7.2.1	Tested junctions	69
7.2.2	Measurement methods	70
7.3	Results	70
7.4	Discussion	71
7.5	Conclusion	72
8	Kasutatud kirjandus	74
9	Lisad	77
	Lisa 1 – Välisnurk (VSVS)	78
	Lisa 2 – Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU)	79
	Lisa 3 – Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL)	80
	Lisa 4 – Välisseina ja akna liitekoht (VSA)	81
	Lisa 5 – Välissein vannitoa kohal (VSVA)	82
	Lisa 6 – Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht (VSTS)	83
	Lisa 7 – Välisseina ja katuse liitekoht	84
	Lisa 8 – Katusehari (KEKE)	85

1 Sissejuhatus

AS Matek on tegutsenud puitkarkasshoonete turul juba üle 25 aasta. Selle aja jooksul on ettevõtte teinud läbi suured muutused toodetes, tootmiskorralduses ja arenenud kaasaegsete lahendustega monteeritavate puitkonstruktsioonidega tegelevaks ettevõtteks. Ettevõtte tänased põhiturul on Skandinaaviamaad, kus hoonete õhutihedusnõuded on muutunud aastate jooksul järjest rangemaks, mis on viinud suurenenud huvini leidmaks meetodeid, mis kindlustavad õhutihedad hoonepiirded.

Õhutihedus mängib hoonete energia analüüsi juures olulist rolli ning mõjutab otseselt maja kütte- ja jahutuskulusid. Lisaks viimastele on õhutihedusega seotud piirete niiskustehnilised probleemid (hallituse teke, niiskuse kondenseerumine), piirde pindade alajahtumine, sisekliima kvaliteet, tuuletõmbus, ventilatsioonisüsteemide toimivus, müra ja tuleohutus. Hoonepiirete ebapiisavat õhutihedust (õhulekkeid) ei saa käsitleda kui loomulikku ventilatsiooni, kuna läbi piirde ebatiheduste toimuv õhu liikumine ei ole kontrollitav, juhitav ega vajadusel filtreeritav (Kalamees, 2008).

Õhu infiltratsioon ja tema mõju sõltub hoonepiirete õhupidavusest, lekkekohtade paiknemisest, õhu rõhkude erinevusest kahel pool piiret, kasutatavate materjalide omadustest ja kliimatingimustest. Õhu rõhkude erinevust kahel pool piiret põhjustavad tuul, õhu tiheduste erinevus ja ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus (Kalamees, 2008).

Käesoleva töö eesmärgiks on laboratoorsete uuringute abil hinnata välisseina liitekohtade õhuleket ning liitekohtade lekete kaudu püüda hinnata reaalse hoone piirete õhupidavust. Uurimistöö on tehtud AS Matek tellimusel ja finantseerimisel Tallinna Tehnikaülikooli Ehitiste projekteerimise instituudis perioodil juuni 2014 - märts 2015. Uuringutest saadud informatsioon AS-i Matek tüüpiliste tarindite liitekohtade õhulekete kohta on oluliseks taustinformatsiooniks arvutuste tegemisel ja lahenduste pakkumisel. Käesoleva töö materjale on avaldatud uuringuraportis „Puitsõrestik välisseina liitekohtade õhulekke analüüs“ (Kalamees jt, 2015).

Uurimistöö on jagatud kolmeks osaks. Esimene osa sisaldab ülevaadet hoonepiirete õhupidavusest, piirete õhupidavuse tagamisest, tüüpilistest lekkekohtadest ning kirjanduse ülevaadet eelnevate tööde kohta. Teises osas kirjeldatakse mõõtmismetoodikat, katseseadet ning liitekohtade lahendusi. Kolmas osa sisaldab ülevaadet mõõtmistulemustest ja tulemuste hindamist.

Laboratoorsete mõõtmiste läbiviimiseks ehitati hermeetiline kamber, millesse saab paigaldada ja tihendada uuritava tarindi, liitekohta, ehitusmaterjali või hooneosa. Õhulekke mõõtekambris testiti kaheksat erinevat puitsõrestik välisseina liitumist naabertarinditega. Uuritavad tarindid ja tarindite liitekohad valiti AS-i Matek hoonetüübi kohaselt ning pidid vastama tavapärasele olukorrale ehitises. Kõikide elementide ja katsekambri tootmine ning elementide ühendamine liitekohtadeks viidi läbi AS-i Matek Pärnu tehases.

Töö autor tänab lisaks juhendajale uurimistöö tellijat ja rahastajaid ning Peeter Linnast mitmekülgse abi eest katsete läbiviimisel.

2 Hoonepiirete õhulekked

Hoonepiirete ja hoone osade õhulekked väljenduvad planeerimatus ja kontrollimatus õhu voolus läbi pragude ja ebatiheduste hoone piiretes. Hoonepiirete õhupidavus mõjutab järgmisi tegureid:

- hoonete energiatõhusus;
- niiskustehnilised probleemid, hallituse teke, niiskuse kondenseerumine;
- hallituse, õhusaaste ja radooni levik põrandaalusest ruumist siseruumidesse, õhusaaste liikumine garaazist eluruumidesse, ebasoovitavate lõhnade liikumine;
- piirde pindade alajahtumine;
- sisekliima kvaliteet, tuuletõmbus;
- ventilatsioonisüsteemide toimivus;
- müraprobleemid;
- tuleohutus.

Piirete ebapiisavat õhupidavust ei saa käsitleda kui loomulikku ventilatsiooni. Läbi piirde ebatiheduste toimuv õhu liikumine ei ole kontrollitav, juhitud ega vajadusel filtreeritav. Uuringud on tõestanud, et õhulekete teel kandub siseruumidesse niiskuskahjustuste tagajärjel piiretesse tekkinud hallituseoseid, radooni või õhusaastet garaazist.

Õhuvool läbi hoonepiirete, ehk infiltratsioon, ja tema mõju sõltub hoonepiirete õhupidavusest, lekkekohtade paiknemisest, õhu rõhkude erinevusest kahel pool piiret, kasutatavate materjalide omadustest ja kliimatingimustest. Õhu rõhkude erinevust kahel pool piiret põhjustavad tuul, õhu tiheduste erinevus ja ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus (Kalamees, 2008).

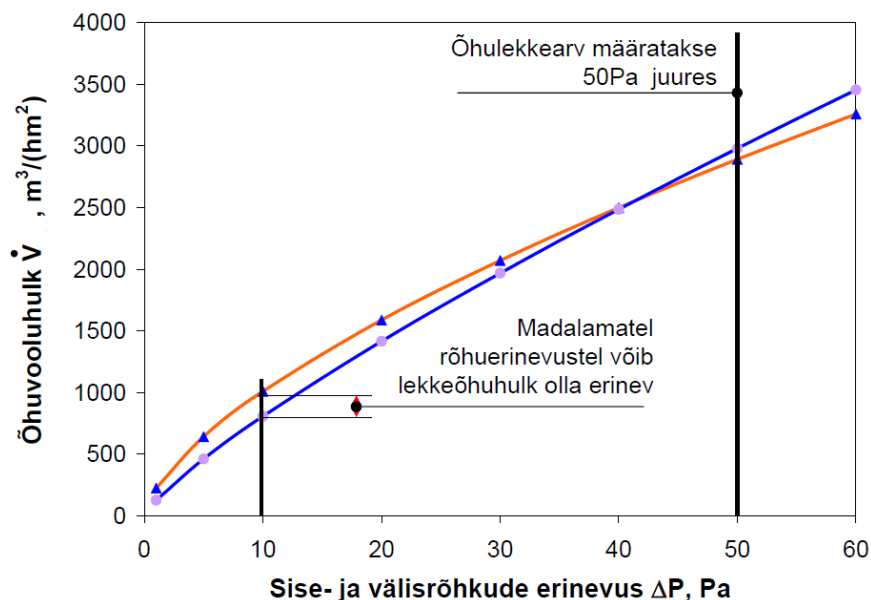
Üksikute tarindite ja tarindite liitekohtade õhuleke on oluline teave nii hoone projekteerijale, ehitajale kui ka ehitusmaterjalide ja hooneosade tootjatele. Senised uuringud Eesti elamute juures on toonud ühe peamise õhulekke kohana välja välisseina ja akna liitekohta.

Hoonepiirete õhuleket iseloomustab õhulekkearv q_{50} (ühik $m^3/(h \cdot m^2)$), mis näitab õhuvooluhulka (m^3/h), mis läbib $1 m^2$ suuruse pindalaga piiret, kui kahel pool piiret on teatud õhurõhkude erinevus (tavaliselt 50 Pa). Lisaks on hoone õhulekkeid iseloomustatud ka n_{50} abil. n_{50} mõõtühikuks on $1/h$ ja see väljendab õhuvahetuskordsust hoones, kui õhurõhkude erinevus kahel pool piiret on 50 Pa. Kui tulemus esitatakse õhulekkearvuna q_{50} , ($m^3/(h \cdot m^2)$), jagatakse 50 Pa juures mõõdetud lekkeõhuvool hoone välispiirete sisepindalaga (S_{piirde}) ja kui õhuleket väljendatakse õhuvahetuskordsusena n_{50} ($1/h$), jagatakse 50 Pa juures mõõdetud lekkeõhuvool hoone siseruumide kubatuuriga (V). Õhulekete mõõtemetod on mõlemal puhul sama: EVS-EN 13829. Kuna valmis hoone tarindite ja nende liitekohtade õhulekkeid EVS-EN 13829 meetodiga mõõta ei saa, väljendab õhulekkearv kõikide piirete keskmist õhuleket.

Hoonepiirete õhupidavus mõõdetakse 50 Pa juures, kuna tavaolukorrast suurema õhuerinevuse korral on tuulest ja temperatuuride erinevusest tingitud mõjud mõõtetulemusele piisavalt väikesed. Hoonepiirete õhupidavus mõjutab hoone energiatõhusust läbi piirde toimivate lekete kaudu. Enamus ajast liigub lekkeõhk läbi hoone piirde 50 Pa-st madalamate õhurõhkude erinevuste korral. Sõltuvalt lekete paiknemisest ja iseloomust võib sama õhulekke vooluhulgaga hoonete õhuleke normaaltingimustes olla erinev. Joonis 2.1 on toodud kahe sama õhulekkearvuga hoone õhulekete mõõtetulemused erinevate sise- ja välisõhurõhkude erinevuse korral. On näha, et hoones, mille lekkeõhu vooluhulk 50 Pa juures on suurem, võib madalamate

rõhuerinevuste korral olla lekkeõhu vooluhulk suurem. Selle põhjustab õhulekete iseloom: kas on üksikud suured õhulekked või palju väikeseid õhulekkeid (Kalamees, 2008).

Enne ja pärast lekkeõhuhulga mõõtmist mõõdetakse sise- ja väliskeskonna vaheline loomulik õhurõhkude erinevus ning sise- ja välistemperatuur. Nende alusel korrigeeritakse mõõtetulemust. (EVS EN 13829, 2001).



Joonis 2.1 Sama õhulekkearvuga hoonete erinevad õhulekkegraafikud (Kalamees 2008).

Lekkeõhu vooluhulk ja õhurõhkude erinevus on omavahelises sõltuvuses:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta P^n$$

Kus,

\dot{V} õhuvoolum, m³/h (ka l/s, m³/s);

C õhuvoolu kordaja, m³/(h·Pa)ⁿ;

Õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse suhet iseloomustav kordaja; arvatav valemist:

$$C = \frac{\dot{V}}{\Delta P^n}$$

ΔP sise- ja välisrõhkude erinevus, Pa;

Õhu staatilise rõhu erinevus kahel pool piirdetarindit või hooneosa, mis eraldab keskkondasid. Õhurõhu erinevus on positiivne (ülarõhk), kui piirdetarindi ruumipoolsel küljel on suurem rõhk kui välisõhu poolsel küljel (konvektsiooni suund siseruumist õue) ja negatiivne (alarõhk), kui piirdetarindi ruumipoolsel küljel on väiksem rõhk kui välisõhu poolsel küljel (konvektsiooni suund õuest siseruumi).

n õhuvoolu eksponent

õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse suhet iseloomustav eksponent:

$n=1$: õhu laminaarne voolamine

$n=0,5$: õhu turbulentsne voolamine

Õhuvoolu eksponent n sõltub õhuvoolu iseloomust: laminaarse õhuvoolu juures on see 1,0 ja turbulentsse õhuvoolu juures 0,5. Õhupidavamate hoonete puhul on trend rohkematele ja väiksematele lekkekohtadele ning lekkivamate hoonete korral on trend üksikumatele ja suurematele lekkekohtadele (Kalamees, 2008).

Liitekohtade õhulekete mõõtmistulemusi saab hinnata kui summeerida mõõdetud liitekohtade õhulekete ja liidete pikkuste korrutised ja kõikide piirete õhulekked. Aluseks tuleb võtta reaalse hoone liitekohtade pikkused ja piirdetarindite pindala A_E ning sisemine kubatuur V .

$$\sum \dot{V} = \sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSK E} C \cdot \Delta P^n + \sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n + \sum_{piirded} C \cdot \Delta P^n$$

Kus,

$\sum \dot{V}$	hoone piirdeid läbiv koguvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n$	välisseinaelementide omavahelist liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n$	välisseina ja vundamendi liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n$	välisseina ja vahelae liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n$	välisseina ja avatäite liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n$	välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{VSK E} C \cdot \Delta P^n$	välisseina ja katuseelemendi liitekohta läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n$	katuseharja läbiv õhuvooluhulk, m^3/h ;
$\sum_{piirded} C \cdot \Delta P^n$	hoone piirdeid läbiv kogu õhuvooluhulk, m^3/h .

$$\text{Õhulekkearv } q_{50} = \sum \dot{V} / A_E ;$$

$$\text{Õhuvahetuskordsus } n_{50} = \sum \dot{V} / V .$$

2.1 Hoonepiirete õhupidavuse tagamine

Hoonepiirete õhupidavus sõltub kasutatavast ehitusmaterjalist, ehitustehnoloogiast ja tööde (projekteerimine, ehitamine, järelevalve) teostamise kvaliteedist. Õhupidavuse tagamine nõuab tihti keerukaid, lõpuni läbimõeldud ja kompleksseid lahendusi. Piirde detailid tuleb projekteerimise käigus hoolikalt läbi mõelda, õhutõke peab olema hoolikalt paigaldatud ja liitekohad nõutavalt teostatud. Õhupidavuse uuringud näitavad, et enamuse hoonetüüpidega on võimalik saavutada head õhupidavust. Samas võib aga sama hoonetüübi ja konstruktsiooni juures õhupidavuse hajuvus olla väga suur. (Kalamees, 2008).

Nüüdisaegsel majal on tavaliselt kahe „kestaga“ konstruktsioon. Sisemine ja välimine kiht on eraldatud soojustuskihiga. Õhutihedus sõltub sisemise kihi heast tihendamisest. Niiskustehnilisest seisukohast võib välimine kiht olla vähem õhutihe kui sisemine, nii et õhk, mis pääseb hoonepiirdesse seestpoolt, saab välja. See vähendab niiskuse konvektsiooni kahjustusi (Hagentoft, 2012).

Tähtsaim materjalikiht piirde õhupidavuse tagamisel on õhutõke, mille peamine ülesanne on takistada õhu liikumist läbi piirdetarindi. Õhutõkke lahendusest sõltub hoonepiirde õhupidavus. Õhutõkke õhujuhitus peaks olema alla $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$. Õhutõke võib olla lahendatud eraldi materjalikihi või olla samas kihis näiteks aurutõkkekihiga (õhu- ja aurutõkketiheduse), soojustuskihiga (polüuretaan), tuuletõkkega (õhupidav tuuletõke) või kandetarindiga (poorbetoon, betoon). Kuna viimistlust muudetakse hoone kasutusea jooksul mitu korda, ei saa viimistluskiht õhutõkkeks olla (Kalamees, 2008).

Eelistatavim asukoht õhutõkkele on piirde sisepinnas, sisepinna lähedal enne soojustust või 20...50 mm soojustuse sees nii, et võimalikud kaablid ja piirdesisesed torustikud ei läbiks õhutõket (Kalamees, 2008).

Kergkarkassipiirde puhul on kõige otstarbekam kombineerida õhu- ja aurutõke üheks materjalikihiks. Ka tuuletõke võib olla õhutõkkeks, kuid siin on piiravaks teguriks asjaolu, et õhutihedad materjalid on üldjuhul ka suurema aurutakistusega. Eesti kliimas ei või suure aurutakistusega materjali paigaldada soojustusest väljapoole (Kalamees, 2008).

Rootsis läbiviidud uuringu (Ylmén jt, 2014) alusel saab järeldada, et kasutades plastkiilet auru- ja õhutõkkena, on võimalik tagada ja säilitada hoone õhupidavus. Tegelik hoonete testimised osutavad selle lahenduse püsivusele vähemalt 20 aastaks, laboratoorsed testid näitavad, et kasutades õigeid materjale, on ka 50 aastane kestvus võimalik. Samuti ilmnes tulemustest oht renoveerimise või laiendamise käigus hoone õhupidavuse vähenemisele.

Võrreldes sisemise auru- ja õhutõkkega, on tuuletõkke vähem liitekohti ja selles on vähem läbiviike. Norras tehtud uuringute tulemused (Myhre ja Aurlien, 2004) näitavad, et ainult tuuletõkke hoolika paigaldamisega on võimalik saavutada madalat õhuvahetuskordsust ($n_{50} < 1,5 \text{ 1/h}$). Belgias läbiviidud uuring (Langemans jt, 2010) demonstreerib tuuletõkke olulist mõju kogu õhutihedusele kui hea kutsemeisterlikkuse ja sobivate materjalidega on võimalik saavutada õhuvahetuskordsus $n_{50} < 1$. Sama uuringu laboratoorsed testid toovad esile, et tuuletõkke läbivust võib tunduvalt mõjutada vihm.

Õhupidavusmeetmete rakendamisel tuleb pöörata tähelepanu nii välispiirdetarinditele kui ka sisetarinditele. Vältima peab olukorda, kus välispiirded lekivad sisepiirde või nende liitekohtade kaudu. Tarindis kasutatav soojustus peab täitma kogu temale määratud ruumi ja liibuma tihedalt vastu sisemist (siseviimistlusplaat, õhu- ja aurutõke) ja välimist (tuuletõke) materjalikihti. Õhu- ja aurutõkke liitekohad tuleb teostada kahe jäiga materjalikihi vahel 20 cm ülekattega ja tihendatud mastiksiga või teibiga. Teibi valikul peab arvestama, et selle liimimisomadused oleksid laitmatud ka aastakümnete pärast. (Kalamees, 2008).

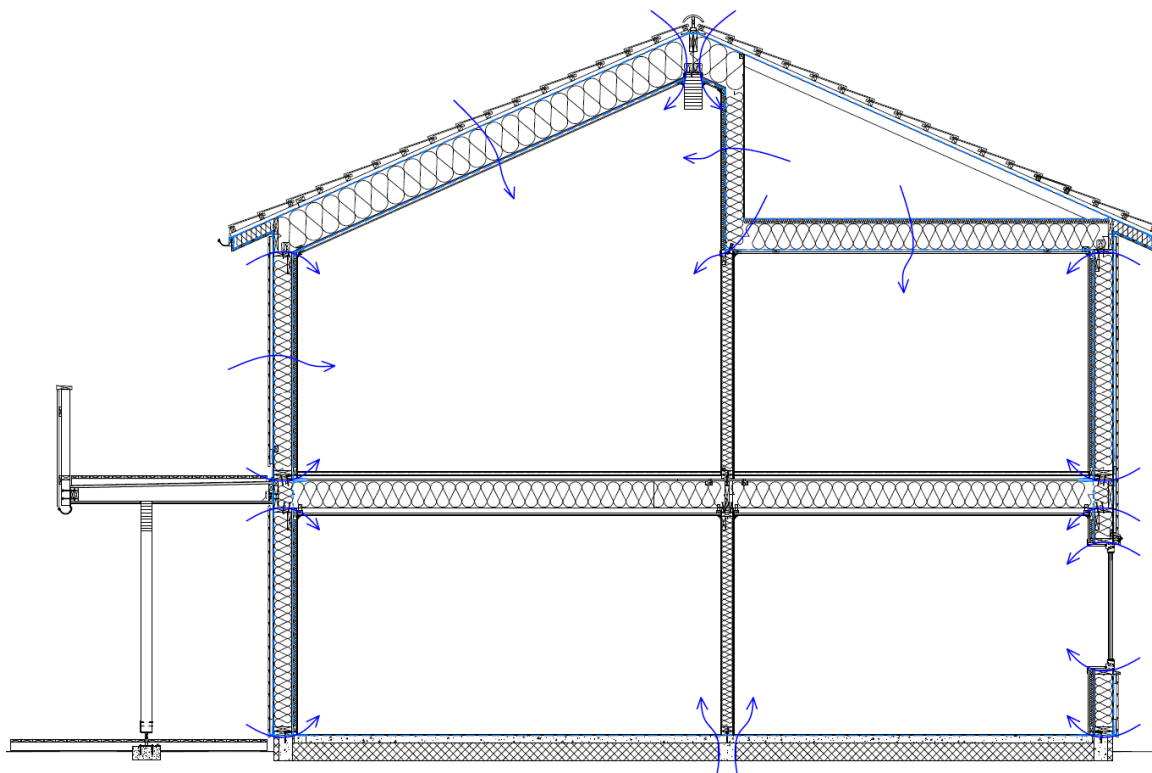
Hoonete keerukuse tõttu peab energiatõhususele, piirdetarindite soojus- ja õhupidavusele pöörata tähelepanu juba projekteerimise algstaadiumis. Võimalusel tuleb vältida riskantseid ja keerukaid lahendusi, eelistades neid teostuselt ja toimivuselt selgetele ja töökindlatele. Hea tulemus saavutatakse kui tagatakse õhupidava materjalikihi pidevus üle kogu hoone ning vältides sama hoone juures liiga paljude erinevate tarinditüüpide kasutamist. Ehitamise ja tarindikihtide paigaldamise järjekord tuleb läbi mõelda ja detailselt joonistel ja seletuskirjas kirjeldada. Õhutõkkest ja soojustusest läbiviike tuleb minimeerida, mis on potentsiaalselt lekketihedaks, kui läbiviigud on vältimatud, peab need projekteerima nii, et nende õhupidavus ei halveneks aja jooksul (Kalamees, 2008).

Parim lõpptulemus saavutatakse, kui tekkivad vead kõrvaldatakse viivitamatult ja efektiivselt. Oluline on ehitusprotsessi erinevate poolte koostöö, seda nii vertikaalsel, kui ka horisontaalsel tasandil. See tähendab, et erinevate osade projekteerijad (arhitekt, konstruktor, eriosade projekteerijad) ja ehitajad peavad lahendused omavahel kooskõlastama; projekteerijad, ehitajad, järelevalve ja tellija kooskõlastavad lahendused, et need vastaksid soovitud tule, ning et ei oleks teostatavad mitte ainult paberil vaid ka reaalselt. Töödejuhataja juhendab enne olulisi tööetappe tööde teostajaid ja selgitab ehitatavat lahendust. Projekteerija saab projekteeritud lahendusest tagasisidet (nii positiivset, kui ka negatiivset). Hilisemate arusaamatuste vältimiseks on otstarbekas soojustuse ning õhu- ja aurutõkke paigaldamine vastu võtta kaetud tööde aktiga ning enne kalleid siseviimistlustöid on otstarbekas teha õhupidavuse mõõtmine (Kalamees, 2008).

AS Matek kasutab õhupidavuse tagamiseks õhu- ja aurutõkkena 0,2mm paksust polüetüleenkilet (edaspidi PE-kile), mis üldjuhul paigaldatakse 45mm soojustuse sisse. Tuuletõkkena kasutatakse tuuletõkkeplaati ning tuuletõkkekangast seina- ning katuse aluskatet katusekonstruktsioonides. Õhutõkete liitekohad teostatakse kahe jäiga materjali vahel ning teibitakse.

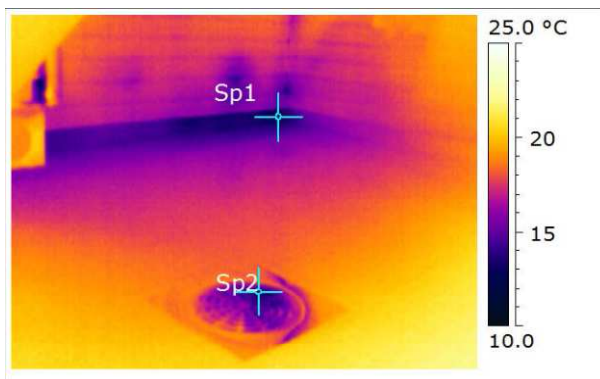
2.2 Tüüpilised lekkekohad

Uuringute põhjal on tüüpilised õhulekkekohad lae/põranda ühenduskoht välisseinaga, vaheseinte liitekohad välisseinaga, elektri ja veetorustike läbiviigid õhutõkkekihist, korstna ja ventilatsioonitorude läbistamised õhutõkkest, lekked läbi ja ümber pistikupesade ja lülitite, lekked läbi akende ja uste ning akende/uste liitekohad välispiirdega (Jokisalo jt, 2008; Kalamees, 2008).

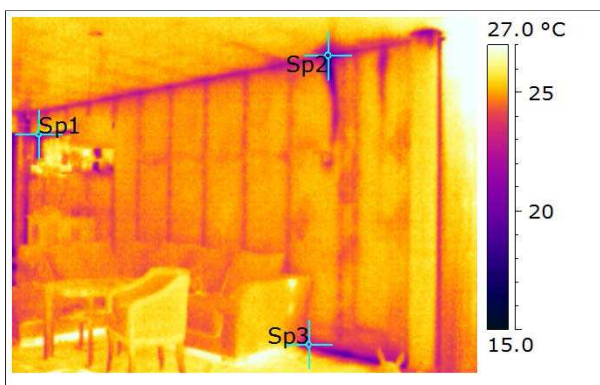


Joonis 2.2 Tüüpilised õhulekkekohad hoone lõikel, mida kasutati teoreetilise õhulekkearvu leidmisel mõõtmistulemuste alusel (vt peatükk 5.1.9)

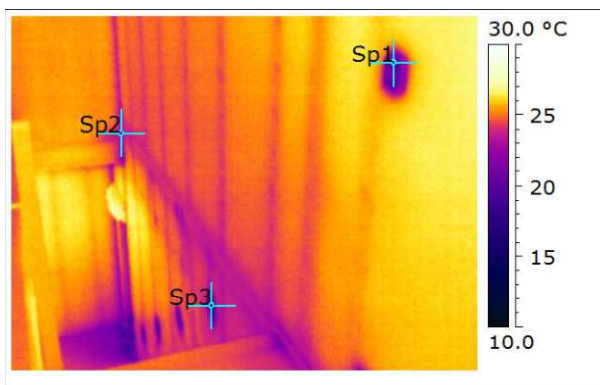
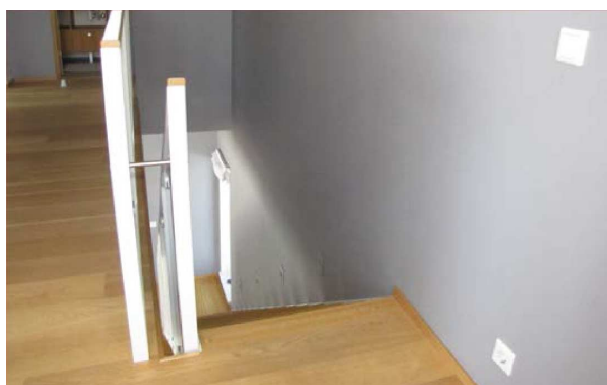
AS-i Matek poolt toodetud ja püstitatud majade tüüpilised õhulekkekohad uuringu „Puitsõrestik välisseina liitekohtade õhulekke analüüs“ järgi (Kalamees jt, 2015):



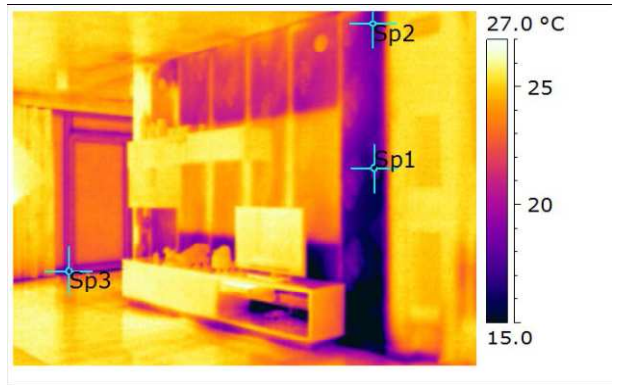
Joonis 2.3 Õhulekked põranda ja välisseina liitekohas; vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).



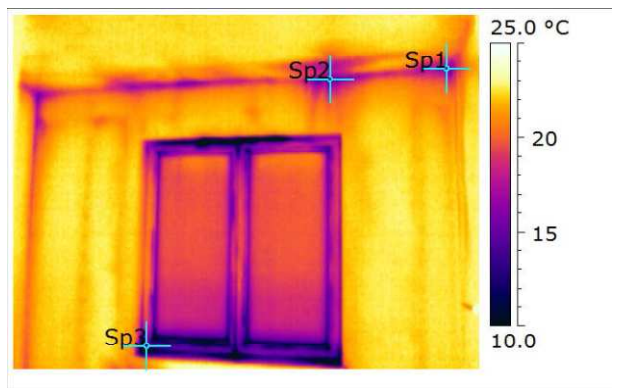
Joonis 2.4 Õhulekked katus- ning vahelae liitekohtadest välisseinaga; vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).



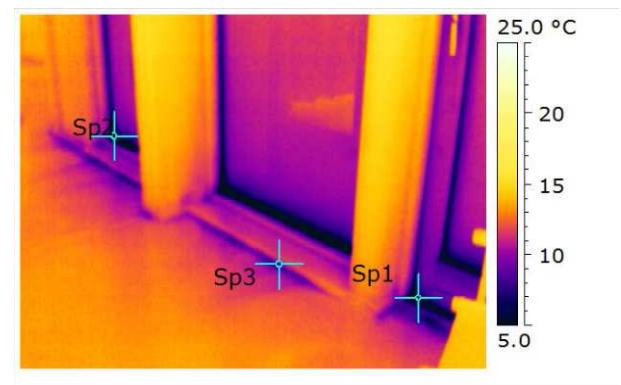
Joonis 2.5 Õhulekked läbi lülitipesa ja treppi valgustavate lambipesade; vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).



Joonis 2.6 Õhulekked läbi katuslae kandvasse siseseina ja edasi peamiselt põrandaliistu vahelt ja läbi lüliti pesa ruumi; vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).



Joonis 2.7 Külmasild aknalengi ja välisseina liitekohas, lisaks õhulekked akna ja välisseina liitekohas. Õhulekked katuslae ja välisseina liitekohas. Vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).



Joonis 2.8 Külmasild akna klaaspaketi servas ning ukse ja ukselehti liitekohas. Õhulekked akna klaaspaketi servast ning ukselehti ja põranda liitekohast. Vasakul foto, paremal termopilt -50Pa juures (Kalamees jt, 2015).

2.3 Kirjanduse ülevaade eelnevate tööde kohta

2.3.1 Välisseina välisnurk

Rootsis tehtud uuringute (Sandberg jt, 2007) uuringus on esitatud seinte liitekoha õhulekked erinevate vuugilaiuste ja tihendusmaterjalide järgi. Andmed pärinevad Höglundi ja Janssoni 1984. aasta tulemustest, täpsemat infot kasutatud konstruktsioonide ja materjalide kohta ei olnud võimalik leida. Höglundi ja Janssoni tulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Seinte liitekoha õhulekete mõõtmistulemused (Höglundi ja Janssoni (1984) järgi, Sandberg jt, 2007).

Tihendusviis	\dot{V} , l/(min·m)	
	10Pa	50Pa
Seinte vuuk 3mm, kummitihend	0,50	1,17
Seinte vuuk 5mm, kummitihend	0,67	1,33
Seinad külgepidi koos, vuugita	0,67	1,33
Seinte ühendus osalise ülekattega	0,67	2,33
Seinte vuuk 7mm, kummitihend	1,00	2,67
Seinte vuuk 9mm, kummitihend	1,17	2,83
Seinte vuuk tihendatud üle nurga volditud ribaga	1,33	3,33

Alev jt (Alev jt, 2014) uurisid palkidest testhoone nelja erineva nurgatapi õhulekkeid ja kolme erineva sisemise soojustusmaterjali niiskustehnilist toimivust. Iga nurgatüübiga teostati 11 mõõtmist. Nurgatappide tüübid ja mõõtmiste keskmised tulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Palkmaja välisnurkade õhulekete mõõtmistulemused (Alev jt, 2014).

Nurgatapi tüüp	\dot{V}_{50} , m ³ /(h·m)	\dot{V}_{50} , l/(min·m)
Skandinaavia sadultapp	6,7	112
Kalasabatapp	6,8	113
Nurk postiga	10,4	173
Järsknurk	17,3	288

2.3.2 Välisseina ja sokli liitekoht

Norras uuriti (Relander, Heiskel jt, 2011) laboratoorselt vundamendi tasapinnalisuse, tihendusviisi ja koormuse mõju puitsõrestikseina ja vundamendi liitele. Eksperimendi käigus kasutatud vundamendielementide tasapinnalisusklassid on esitatud tabelis (vt Tabel 2.3). Vundamendile mõjuvad koormused oli valitud vastavalt hoone korruselisusele vundamendi kohal: ühekorruseline 5,4kN/m ja kahekorruseline 8,0kN/m. Liite tihendamiseks kasutatud materjalid ja mõõtmistulemused on kokku võetud Tabel 2.4.

Tabel 2.3 Tasapinnalisusklasside lubatud tolerantsid (NS3420-1:2009).

Mõõdetud pikkus (m)	PA	PC	PE
2,0	±2 mm	±5 mm	±12 mm
1,0	±1 mm	±3 mm	±8 mm
0,25	-	±2 mm	±5 mm

Tabel 2.4 Välisseina ja vundamendi liitekoha õhulekete mõõtmistulemused (Relander, Heiskel jt, 2011).

Tihendusviis	Koormus, kN/m	\dot{V}_{50} , l/(min·m)		
		PA	PC	PE
Tühi vuuk	5,4	63,2	134	426
	8,0	56,8	90,2	377
Tõrvapapp	5,4	36,0	28,0	143
	8,0	23,2	26,7	104
Villasukk	5,4	1,7	3,3	5,3
	8,0	4,2	1,0	2,8
Sidepuumembraan	5,4	5,8	8,0	56,7
	8,0	5,3	7,5	32,7
Villasukk + tõrvapapp	5,4	11,7	11,0	24,8
	8,0	9,2	15,5	22,0
Villasukk + Sidepuumembraan	5,4	3,5	1,7	1,0
	8,0	3,5	1,0	0,5

Rootsis uuriti (Sandberg jt, 2004 ja 2007) laboratoorselt vundamendi tasapinnalisuse, tihendusviisi ja erinevate kinnitusvahendite ja nende vahekauguste mõju sidepuu ja vundamendi liitele. Sidepuule mõjuvate koormuste kohta andmed puuduvad. Liite tihendamiseks kasutatud materjalid, betoonpindade tasapinnalisused, kinnitusvahendid ja nende sammud ning mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 2.5). Vooluhulgad 10 ja 50Pa rõhuerinevuste juures on esitatud üle- ja alarõhu keskmistena.

Tabel 2.5 Välisseina ja vundamendi liitekoha õhulekete mõõtmistulemused (Sandberg jt, 2004 ja 2007).

Tihendusviis	Betonpind	Kinnitusvahend		\dot{V} , l/(min·m)	
		Kinnitusvahend	Samm, mm	10Pa	50Pa
Kummiribadega polüetüleenkile	tasane	Sidepuukruvi	600	2,5	6,8
Ekstruuderpolüstüreen, 5mm	tasane	Kiilankur	1000	3,1	4,3
Ekstruuderpolüstüreen, 5mm	tasane	Puidukruvi	1000	3,9	11,3
Ekstruuderpolüstüreen, 5mm	tasane	Sidepuukruvi	600	14,3	50,5
Kummiribadega polüetüleenkile	ebatasane	Sidepuukruvi	600	26,2	68,6
Ekstruuderpolüstüreen, 5mm	ebatasane	Sidepuukruvi	600	82,5	187
Tõrvapapp, 2,5mm	tasane	Sidepuukruvi	600	101	264
Tõrvapapp, 2,5mm	ebatasane	Sidepuukruvi	600	185	451

Erinevad mõõtmistulemused näitavad, et pinna tasapinnalisus on õhutihedusele oluline. Mida tasasem ja ühtlasem on pind, seda õhutihedam on liitekoht.

2.3.3 Välisseina ja vahelae liitekoht

Relander (Relander, Bauwens jt, 2011) uuris vahelae mõju platvorm meetodil püstitatud puitkarkassmaja õhulekkele. Selleks viidi läbi laboratoorsed mõõtmised välisseina ja vahelae liitekohast, mille tihendamiseks kasutati auru- ja tuuletõkkeid mitmel erineval viisil. Tulemused (vt Tabel 2.6) näitavad, et aurutõkke saab teha peaaegu sama tihedaks kui tuuletõkkekihi, aga see on väga töömahukas.

Tabel 2.6 Välisseina ja vahelae liitekohta tihendusmeetodid ja õhulekked Relander, Bauwens jt, 2011).

Tihendusviis	$\dot{V}_{50}, l/(min \cdot m)$		
	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine
Tihendusmaterjalita	243	272	257
50mm klaasvill 0,2mm kiles vahelaetalade vahel	52,2	53,8	53,0
100mm klaasvill 0,2mm kiles vahelaetalade vahel	32,0	34,7	33
Seinte PE-kile teibitud vahelaetalade ja vahelaeplaadi külge	3,3	3,5	3,4
Seinte PE-kile vahelaetalade ulatuses katkestatud	9,2	10,5	9,8
Kipsplaat	0,67	0,50	0,58
Vertikaalselt paigaldatud tuuletõkkekangas	1,0	3,0	2,0
Horisontaalselt paigaldatud tuuletõkkekangas	10,8	0,50	5,7
Kipsplaat + hor. tuuletõke	0,33	0,67	0,50

2.3.4 Välisseina ja akna liitekoht

Norras viidi läbi laboratoorne uuring (Relander, Thue jt, 2008), mille käigus testiti uurisid laboratoorselt erinevate tihendusviiside mõju akna ja puitkarkasseina liitekohale. Mõõtmisteks kasutati 1,2x1,2m suurust akent 15mm laiuse katkematu vuugiga. Mõõtmistulemused näitavad, et teip, tuuletõkkekanga ribad ja tihendusvorst aitavad enim kaasa akna ja seina liite õhupidavusele. Võrdlus tehti ka tavapäraselt ja 50mm sissepoole paigaldatud aurutõkke vahel. Liite tihendamiseks kasutatud materjalid ja mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 2.7).

Tabel 2.7 Puitkarkasseina ja akna tihendusmeetodid ja õhulekked (Relander, Thue jt, 2008).

Tihendusviis	$\dot{V}_{50}, l/(min \cdot m)$
Teip	0
Tuuletõkkekanga ribad	5,2
Teip, üks auk	15,5
Tihendusvorst, katkendlik	16,2
Tihendusvorst, katkematu	20,7
PE-kile, naelte samm 150	21,3
Mineraalvill 150mm lai	24,8
PE-kile, naelte samm 300	28,7

Tihendusviis	\dot{V}_{50} , l/(min·m)
Teip, kaks auku	29,0
Mineraalvill 100mm lai	34,8
PE-kile sissepoole tõmmatud, naelte samm 300, nurgad tihendatud	37,8
Teip, kolm auku	40,8
PE-kile, naelte samm 600	44,2
Isepaisuv tihend	65,5
Mineraalvill 50mm	67,2
PE-kile sissepoole tõmmatud, naelte samm 600, nurgad tihendatud	111
PE-kile sissepoole tõmmatud, naelte samm 600	116
Isepaisuv tihend, 4 auku	129
Vales mõõdus isepaisuv tihend	181

Belgias uuriti (Van Den Bossche jt, 2012) tellisseina ja akna liitekoha erinevate tihendusviiside mõju liite õhulekkele. Tulemused näitavad, et valitud tihenduslahenduste õhulekked on väga erineval tasemel (vt Tabel 2.8)

Tabel 2.8 Tellisseina ja akna tihendusmeetodid ja õhulekked (Van Den Bossche jt, 2012).

Tihendusviis	\dot{V}_{50} , l/(min·m)		
	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine
Tühi vuuk	547	479	513
Keskmise tihedusega mineraalvill	188	200	194
Suure tihedusega mineraalvill	53,2	43,3	48,3
Osaline tihendamine polüuretaanvahuga väljastpoolt	20,5	15,0	17,8
Osaline tihendamine polüuretaanvahuga seestpoolt	27,8	31,0	29,4
Täielik tihendamine polüuretaanvahuga	29,8	15,7	22,8
Täielik tihendamine polüuretaanvahuga, aknalengi ja aknapale vuuk tihendatud	0,0	-0,17	-0,08
Vuuk täidetud XPS-ga, aknapale krohvitud, aknapale ja krohvi vahel väike pragu	43,8	52,7	48,3
Vuuk täidetud XPS-ga, aknapale krohvitud, aknapale ja krohvi vahe tihendatud	1,33	1,17	1,25
Aknalengi sisepind ja müüritis ühendatud kilega, aknaleng ja müüritis ühendatud paksu krohvikihiga	2,00	2,33	2,17

2.3.5 Välisseina ja katuse liitekoht

Sandberg (Sandberg jt, 2004 ja 2007) uuris laboratoorselt krohvitud välisseina ja katuse aurutõkkeks kasutatud PE-kile liite õhupidavust. Testid tehti 2 moodi: esimesel juhul kasutati seinat ja PE-kile ühendamiseks puitliistu, teisel juhul puitliistu ja hermeetikut. Mõõtmistulemused näitavad, et hermeetiku kasutamine vähendas oluliselt liitekohta õhulekkeid. Mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 2.9).

Tabel 2.9 Katuse ja välisseina liitekohta õhulekke mõõtmistulemused (Sandberg jt, 2004 ja 2007).

	\dot{V} , l/(min·m)					
	10Pa			50Pa		
	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine
Krohvitud seinat ja katuse PE-kile ühendus puitliistuga	6,3	5,0	5,7	18,8	24,3	21,6
Krohvitud seinat ja katuse PE-kile ühendus hermeetiku ja puitliistuga	-	-	-	0	0,8	0,4

Kalamees ja Kurnitski (Kalamees ja Kurnitski, 2008) viisid läbi laboratoorsed uuringud, et kindlaks määrata niiskuse kovektsiooni läbi välisseina ja pööningu põranda liitekohta. Uuringutes kasutati kaht tüüpilist välisseina (puitkarkass ja poorbetoon) ja kaht erinevat plaatmaterjali (puitlaastplaat ja mineraalvillast plaat). Pööningu põrand oli mõlemal juhul puitkarkassist. Esimese mõõtmise puhul oli puitkarkassiseina ja pööningu põranda ühenduses auru- ja õhutõkke õhuleketeks avatud. Teise mõõtmise puhul vähendati lekkeala pikkust 10 cm-ni. Mõlemal juhul kasutati pööningu põranda katmiseks 12mm paksust puitlaastplaati. Kolmanda mõõtmise puhul suleti auru- ja õhutõkke ning pööningu põrandal kasutati 20mm paksust mineraalvillaplaati, mis kaeti tuuletõkke kangaga. Mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 2.10).

Tabel 2.10 Katuse ja välisseina liitekohta õhulekke mõõtmistulemused (Kalamees ja Kurnitski, 2008).

Pööningu põranda kattmaterjal	Auru- ja õhutõkke asend	\dot{V}_{10} , l/s	\dot{V}_{10} , l/(min·m)
12mm puitlaastplaat	Avatud	0,31	15,5
12mm puitlaastplaat	Avatud 10cm	0,18	9,0
20mm mineraalvillaplaat	Suletud	0,05	2,5

3 Meetodid

3.1 Mõõtestandardid

Hoonepiirete õhulekkeid saab mõõta vastavalt standarditele EVS EN 12114 või ISO 6589. Kuigi EN 12114 sisaldab palju spetsiifilisemaid kitsendusi ja suuniseid mõõtmiste täpsusele, on testimise protseduur on mõlema standardi puhul väga sarnane. EN 12114 soovib vähemalt 7 mõõteastet. Maksimaalne õhurõhu erinevus peab olema iseloomulik vastavale piirdetarindile, liitekohale, ehitusmaterjalile või hooneosale. Viimase määratluse puudumisel maksimaalne õhurõhu erinevus võib olla: $\pm 50\text{Pa}$, $\pm 100\text{Pa}$, $\pm 200\text{Pa}$, $\pm 500\text{Pa}$, $\pm 1000\text{Pa}$. ISO 6589 standard ei anna maksimaalseid väärtusi, kuid testimise jada peaks olema: 50–100–150–200–300–400–500–600–(600 +x 250 Pa).

Nii EN 12114 kui ka ISO 6589 standard määratlevad täpselt enne õhulekkekatset tekitatavad 3 üle- või alarõhu impulssi, mis peavad olema 10-12% suuremad kui katseaegne maksimaalne rõhkude erinevus. Mõlemad standardid nõuavad testimist vaid positiivse rõhuga (välisrõhk hoonele on suurem kui siserõhk). Käesoleva uuringu käigus teostatud mõõtmistel on lähtunud standardist EN 12114.

3.2 Mõõteseade

Laboratoorsed mõõtmised viidi läbi perioodil juuni 2014 - märts 2015 Tallinna Tehnikaülikooli Ehituskonstruksioonide teadus- ja katselaboris õhulekke mõõtekambris (1,12x1,54x2,44m), mis koosneb järgnevatest osadest (vt Joonis 3.1 ja Joonis 3.2):

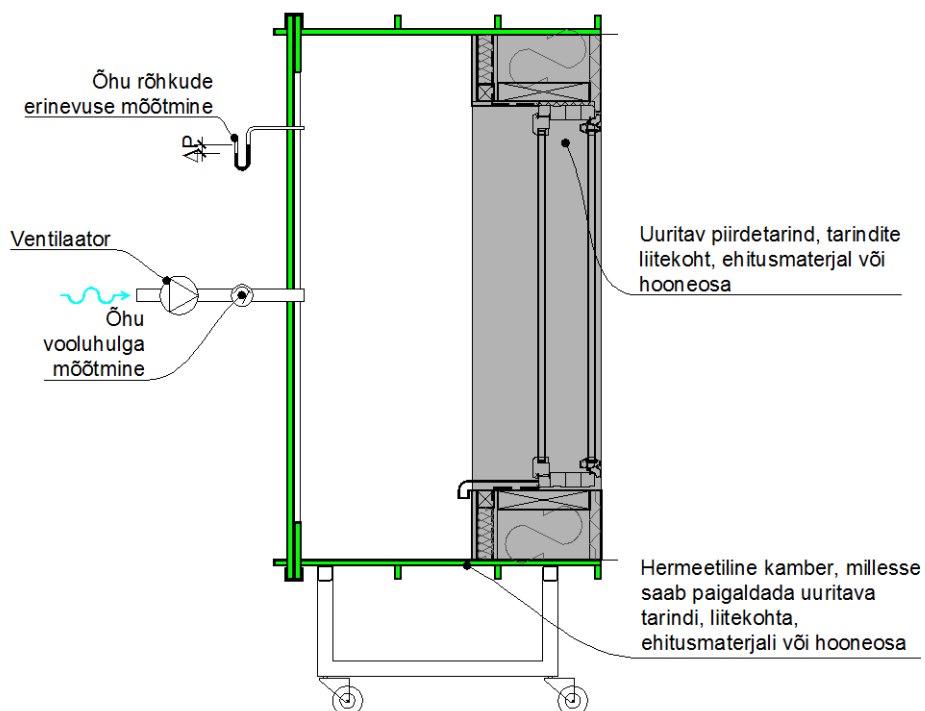
- hermeetiline kamber, millesse saab paigaldada ja tihendada uuritava tarindi, liitekohta, ehitusmaterjali või hooneosa;
- õhurõhkude erinevuse tekitamise ja muutmise seadmed;
- õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse mõõtmise seadmed (täpsus < 5%; EVS-EN 12114).

Laborimõõtmisteks AS-i Matek tehases ehitatud spetsiaalne õhulekke mõõtekamber on valmistatud 18mm paksustest veekindlatest vineerplaatidest. Vineerplaadid on jäigastatud 45x70mm puidust ribidega. Hermeetilisuse tagamiseks teibiti kõik kambri sisse jäävad kruviliited ja plaatide vuugid õhutiheda teibiga Tescon Profil. Lisaks liimiti kambri sisepinnale 1mm paksune plekk, mis lisab õhupidavust ja suurendab pinna kulumiskindlust. Mõõtekambri hermeetilisuse testimiseks suleti kambri avad katteplaatidega ja viidi läbi test maksimaalse rõhuerinevuseni. Kambri katteplaadiga sulgemiseks kasutati pitskrugi tüüpi sulgureid, hermeetilisuse tagas kaanele 2 ringi liimitud tihendit.

Katsekambri kaane kaudu on mõõtekamber ühendatud erinevate mõõte- ja juhtimiseseadmetega, mis kõik on ühendatud juhtimisarvuti või andmesalvestiga. Mõõte- ja juhtimisandurite tulemuste lugemine ja seadmete juhtimine toimub üheaegselt. Eelistatavad on analoogandurid. Mõõteandurid/seadmed on toitest ja salvestussüsteemist sisse/välja lülitatavad.

Õhulekke mõõtekambris üle- ja alarõhu tekitamiseks kasutati Elmo Rietchle külgkanalpuhurit (<http://www.gd-elmorietschle.com>) 2GBH100. Külgkanalpuhur oli torustike ja kuulkraanide abil ühendatud mõõtestendiga. Õhulekkekambrisse paigutatud katsetarindi ruumipoolse ja välisruumi vahele rõhuerinevuse tekitamiseks vajalikud vooluhulgad mõõdeti mõõtestendil olevate Dwyeri vooluhulga mõõtjatega. Rõhuerinevuse mõõtmiseks kasutati diferentsiaalmanomeetreid Pro dual PEL-DK või Dwyer Magnesense. Katseruumi temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks kasutati temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõteandurit Rotronic HygroClip SC05.

Erinevate mõõteandurite mõõtetulemuste salvestamiseks kasutati andmelogerit Grant Squirrel SQ2010. Andmelogeri juurde kuuluva tarkvaraga Squirrel View oli võimalik hiljem logifaile kasutada ja analüüsida.



Joonis 3.1 Õhulekke mõõtekambri põhimõtteskeem vertikaalse tarindi uuringuks (Kalamees, 2012).



Joonis 3.2 Õhulekke mõõtekamber TTÜ laboris (Kalamees jt, 2015).

Vaakumpump Elmo Rietschle

Külgkanalpuhur Elmo Rietschle G-BH1 suudab tekitada rõhku kuni 100kPa, vaakumit kuni 90kPa ning õhuvoolu 50-2450m³/h. Antud seadmele on iseloomulik madalad hoolduskulud, vastupidavus ja madal müratase (<http://www.gd-elmorietschle.com/>).

Sagedusmuundur EATON DC1

Kompaktsagedusmuundur EATON DC1-S24DNN-A20N, võimsus 0,37kW, sobib ideaalselt ventilaatorite, pumpade ja konveierite käivitamiseks, kuna seda on lihtne nii paigaldada, ühendada kui seadistada. Antud uuringus kasutati sagedusmuundurit külgkanalpuhuri käivitamiseks ja juhtimiseks (<http://www.eaton.ee>).

Dwyer vooluhulga mõõtjad

Vooluhulkade mõõtmisel kasutati kolme erineva mõõtepiirkonnaga Dwyer-i vooluhulkade mõõtjat: GFC 1109 - mõõtepiirkond 0-5l/min, täpsus ±1,5% mõõtepiirkonnast; GFC 1131 – mõõtepiirkond 0-30l/min, täpsus ±1,5% mõõtepiirkonnast; GFC 1144 – mõõtepiirkond 0-500l/min, täpsus mõõtepiirkonna vahemikus 0-20% ±3%, 20-100% vahemikus ±1,5% mõõtepiirkonnast. Seadme torusensor voolupiirajaga tagab kõrge täpsuse ja korratavuse (<http://www.dwyer-inst.com>).

Diferentsiaalmanomeeter Pro dual PEL-DK

Suurte rõhuerinevuste mõõtmiseks kasutati manomeetrit Pro dual PEL-DK. Mõõteulatus on antud seadmel 0-1000Pa, täpsus ±1% mõõtepiirkonnast. Antud andurit kasutatakse rõhkude ja rõhuerinevuste mõõtmiseks ventilatsioonisüsteemide juures (<http://www.produal.com/>).

Diferentsiaalmanomeeter Dwyer Magnesense MS

Dwyer Magnesense MS diferentsiaalmanomeetrit kasutatakse õhu ja mittesüttivate gaasidega katsetel rõhkude mõõtmiseks. Antud mõõtmisel kasutati Magnesense manomeetrit väikeste rõhuerinevuste (mõõteulatus ±100Pa, täpsus ±1% mõõteulatuses) mõõtmiseks (<http://www.dwyer-inst.com>).

Temperatuuri- ja niiskusandur Rotronic HygroClip SC05

Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks kasutati kõrge täpsusega andurit Rotronic HygroClip SC05 Ø 5mm×51mm; mõõteala -40 kuni +60°C; 0...100% RH; mõõtetäpsus ±0,3 °C; ±1,5% RH. Seadmel on nii digitaal- kui ka analoogväljund ning ta sobib hästi kasutamiseks kitsastes tingimustes keskkonna- ja laboritestides (<http://www.rotronic.com>).

Andmeloger Grant Squirrel SQ2010

Grant Squirrel 2010 on mitmekülgne üldotstarbeline loger, 4 kuni 8 analoogsisendiga voolu, pinge, takistuse ja temperatuuri mõõtmiseks, lisaks 8 digitaalkanalit. Kõiki kanaleid saab logida või kasutada käivititena logimise automaatseks alustamiseks või lõpetamiseks. Loger on kompaktne ja kaasaskantav, aga sobib ka tööpinkidel ja statsionaarsetel seadmetel kasutamiseks. Seade on kergesti programmeeritav nelja integreeritud nupu ja suure graafilise displei abil, mõõtetäpsus on 0,1%. Loger SQ2010 on võimeline täitma rutiinseid andmekogumisvajadusi, sealhulgas uuringuid, mis vajavad kuni 10 näitu sekundis ühel kanalil (<http://www.grantinstruments.com/>).

Grant Squirrel SQ2010 andmelogeri poolt kogutud andmete analüüsimiseks ja kasutamiseks tuleb kasutada antud logerile tootja poolt valmistatud tarkvara Squirrel View. Squirrel View võimaldab andmete analüüsimiseks eksportida neid Excelisse, kontrollida logeri hetkesstaatust, logeri sätete salvestamist arvutisse efektiivseks taaskasutamiseks ja andmete allalaadimist kuupäeva, aja või sündmuse järgi (<http://www.grantinstruments.com/>).

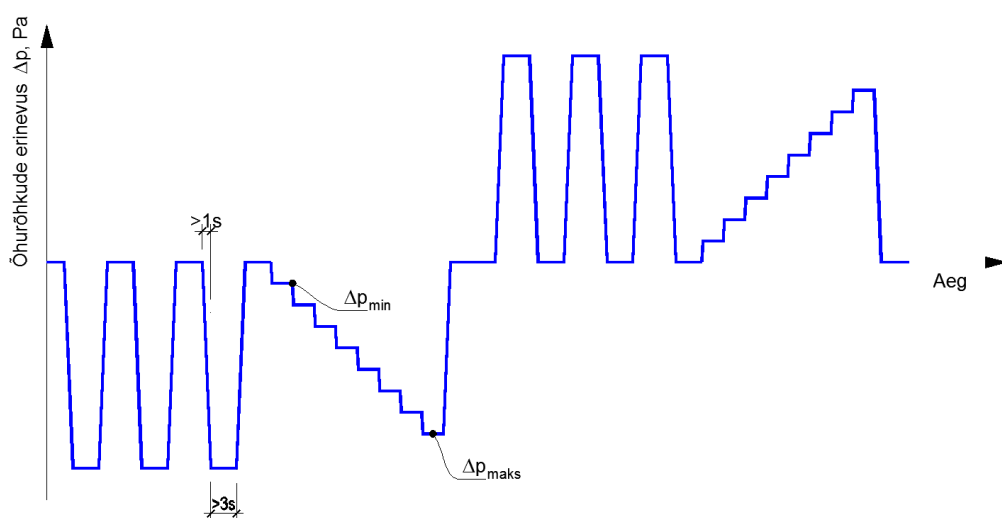
3.3 Mõõtemetoodika

Hoonepiirete ühenduskohtade õhupidavust mõõdeti vastavalt standardile EVS EN 12114. Mõõteseadme ventilaator tekitab kambri sise- ja väliskeskonna vahele soovitud õhurõhkude erinevuse. Katse käigus mõõdeti õhuvooluhulka, mis oli vajalik tekitatud rõhuerinevuse hoidmiseks. Sama õhuhulk, mis läbis ventilaatorit, tuli ka katsekambrisse läbi piirete liitekohta. Lekkeõhu hulka mõõdeti erinevate õhurõhkude, nii alarõhu kui ka ülerõhu tingimustes 5/25/50 Pa sammuga, 20...500Pa. Õhuvooluhulga ja õhurõhu erinevused salvestatakse samaaegselt. Lekkeõhuvoolu ja rõhuerinevuse mõõtetulemused (vt Joonis 2.1) esitatakse lekkeõhuvoolu graafikuna. Alarõhu ja ülerõhu mõõtmistulemuste trendijoonelt arvutatakse konkreetsele rõhuerinevusele vastav lekkeõhuvoolu hulk. Mõõtetulemus korrigeeritakse vastavalt baastingimustele.

Uuritav tarind, tarindite liitekoht, ehitusmaterjal või hooneosa peab olema esinduslik ja vastama oma tavapärasele olukorrale ehitises. Kui uuritav tarind, tarindite liitekoht, ehitusmaterjal või hooneosaobjekt sisaldab pragusid, vuuke või muid õhulekkekohti, peavad need olema ka testitavas objektis.

Enne katset tuleb mõõta temperatuur (täpsus $<\pm 2$ K), õhurõhk (täpsus $<\pm 1$ kPa) ja suhteline niiskus (täpsus $<\pm 5$ %) ja tagada nende näitajate püsivus katse ajal esitatud täpsuse piires. Katseaegsed keskkonnatingimused peavad olema vahemikus $+15$ °C... $+30$ °C ja 25 %...75 %. Ehitusmaterjalide temperatuur ja niiskussisaldus peavad olema tasakaalustunud nendes keskkonnatingimustes.

Õhulekke katse viiakse läbi alarõhu tingimustes (piirdetarindi ruumipoolsel küljel on väiksem rõhk kui välisõhu poolsel küljel (konvektsiooni suund „õuest siseruumi“) ja vajadusel ka ülerõhu tingimustes.



Joonis 3.3 Õhurõhkude idealiseeritud muutus katse ajal (Kalamees, 2008).

Enne õhulekkekatsset tekitati kolm ala/üleriõhu impulssi, vt Joonis 3.3. Õhuriõhu erinevus impulsi ajal on õhuriõhuerinevus taotluslikult 10 %...12 % suurem kui katse aegne maksimaalne õhuriõhkude erinevus Δp_{max} . Õhuriõhu tõus peab olema aeglasem kui 1 sekund ja õhuriõhu kestvus impulsi ajal peab olema üle 3 sekundi.

Õhulekkestest tuleb läbi viia astmeliselt erinevate õhuriõhu erinevuste juures. Õhuvooluhulga ja õhuriõhu erinevused salvestatakse samaaegselt. Iga astme kestvus peab olema selline, et õhuriõhu erinevus ja õhuvooluhulk on stabiliseerunud enne mõõtmist.

Maksimaalne õhuriõhu erinevus oli taotluslikult iseloomulik vastavale piirdetarindile, liitekohale, ehitusmaterjalile või hooneosale. Maksimaalne õhuriõhu erinevus ei või põhjustada uuritavale objektile pöördumatuid kahjustusi. Väikseim õhuriõhu erinevus, Δp_{min} , peab olema selline, mida on võimalik mõõta täpsusega <5 %. Väikseim õhuriõhu erinevus ei või siiski olla $<1/5 \Delta p_{max}$.

Õhuriõhu tõus peab olema aeglasem kui 1 sekund ja õhuriõhu kestvus impulsi ajal peab olema üle 3 sekundi. Õhulekkestest viidi läbi astmeliselt erinevate õhuriõhu erinevuste juures. Õhuvooluhulga ja õhuriõhu erinevused salvestati samaaegselt. Iga astme kestvus oli selline, et õhuriõhu erinevus ja õhuvooluhulk on stabiliseerunud enne mõõtmist.

Õhulekkestesti teised õhuriõhuerinevused valitakse minimaalse ja maksimaalse õhuriõhuerinevuse vahele nii, et tekiks vähemalt seitse mõõtetaset.

Kui katseaegsed keskkonnatingimused ei ole vahemikus +18°C...+22°C ja 25%...50% ja 100000Pa...102000Pa, tuleb õhuvool õhutiheduse alusel korrigeerida.

3.4 Õhulekkekohtade tuvastamine

Õhulekkekohtade tuvastamiseks testiti erinevaid meetodeid:

- visuaalne vaatlus;
- õhuvooluindikaatori kasutamine;
- suitsumasina kasutamine.

Visuaalne vaatlus õhulekkekohtade leidmisel

Suuremad lekked kohad oli võimalik avastada ka kompamise abil käega.

Õhuvooluindikaatori kasutamine õhulekkekohtade leidmisel

Õhuvooluindikaatorina kasutati Dragon Puffer indikaatorit (vt Joonis 3.4; <http://www.zerotoys.com>), mis sobib hästi nii professionaalseks kui ka hobikasutuseks. Dragon Puffer on spetsiaalselt projekteeritud kahjutu suitsusamba tekitamiseks ning sobib kasutamiseks alatest energiaauditite läbiviimisest kuni laboritestideni. Indikaatori tekitatud märkesuits ei ole kuum, seetõttu ei mõjuta soojuslik energia tema liikumist.



Joonis 3.4 Õhuvooluindikaator Dragon Puffer (<http://www.zerotoys.com>).

Suitsumasina kasutamine

Lekkekohtade leidmiseks kasutati suitsumasinat HQ Power VDP700SM (vt Joonis 3.5; <http://www.hqpower.eu>). Suitsumasin paigutati katsekambrisse, suitsumasina toite- ja kontrolleri kaablid ühendati läbi katsekambri seina, läbiviik seinast tihendati. Kui suitsumasina soojusvaheti jõudis sobiva temperatuurini tekitati läbi juhtpuldi suits. Suitsuvedelik paisati küttekehale, suitsuvedelik kuumenes järsult ja aurustus. Seejärel aurustunud vedelik lasti läbi pihusti atmosfääri, kus see segunedes külma õhuga muutus aerosooliks. Suitsumasinaga oli võimalik leida katsetarindite lekkekohti ülerõhu tingimustes (katsekambris oli rõhk kõrgem kui katsekambri väljas).



Joonis 3.5 Suitsumasin HQ Power katsekambris.

3.5 Uuritavad liitekohad

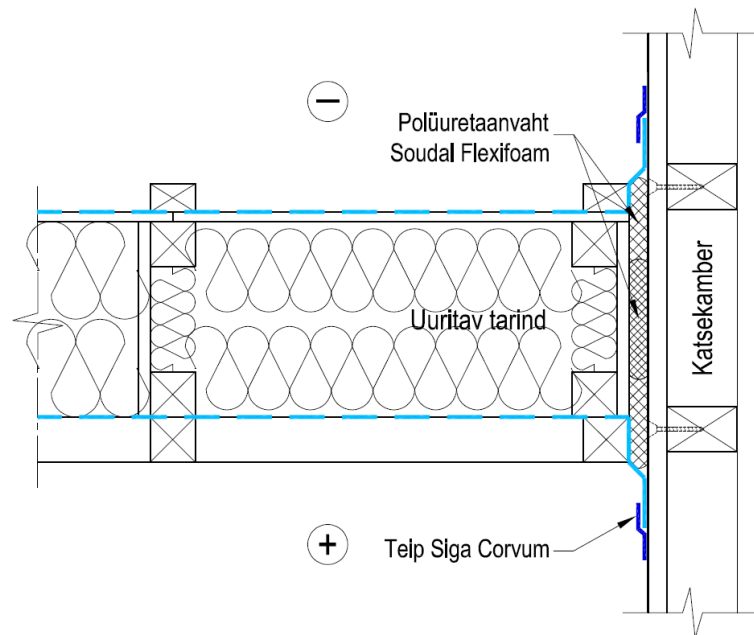
Uuritav tarind, tarindite liitekoht, ehitusmaterjal või hooneosa peab olema esinduslik ja vastama oma tavapärasele olukorrale ehitises. Kui uuritav tarind, tarindite liitekoht, ehitusmaterjal või hooneosaobjekt sisaldab pragusid, vuuke või muid õhulekkekohti, peavad need olema ka testitavas objektis. Uuriti välisseina liitumisi naabertarinditega. Uuritavad tarindid ja tarindite liitekohad valiti AS-i Matek hoonetüübi kohaselt ning pidid vastama tavapärasele olukorrale ehitises:

- Välisseina välisnurk (VSVS);

- Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU);
- Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL);
- Välisseina ja akna liitekoht (VSA);
- Välissein vannitoa kohal (VSVA);
- Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht (VSTS);
- Välisseina ja katuse liitekoht (VSKE);
- Katusehari (KEKE);

Peamine põhjus, miks valiti tarindid piisavalt suurte mõõtudega ja mitte ainult tarindite liitekoht, oli soov imiteerida tegelikke olusid, millega praktikas kokku puututakse.

Uuritav tarindi ja katsekambri vaheline vuuk täideti polüuretaanvahtuga (Soudal Flexifoam, vt Joonis 3.6). Tarindite tuuletõkkekangad ja aurutõkkekiiled teibiti katsekambri seinte külge. Katsed tehti peale vähemalt 12 tunni pikkust kõvenemisaega.



Joonis 3.6 Uuritava tarindi tihendamine katsekambris.

Katsekehade tihendamisel katsekambris kasutatud materjalid:

Soudal Flexifoam

Flexifoam on ühekomponentne, isepaisuv, kasutusvalmis polüuretaan püstolivaht. Vahul on elastsed omadused, sobib kasutada liikuvates ühenduskohtades ehitusestöödel (<http://www.soudal.ee>).

Tehnilised andmed (<http://www.soudal.ee>):

- Vastupidavus temperatuurile -40°C kuni +90°C (kõvenenult) 120°C (maks. 1 tund)
- Õhu läbilaskvus uuena (DIN 18542) – $a < 0,1 \text{ m}^3 / [\text{h} \cdot \text{m} \cdot (\text{daPa})^{2/3}]$
- Veeauru läbilaskvus – (DIN EN ISO 12572) $\mu = 20$
- Kõvenemisaeg – 40 minutit (FEICA TM 1005-210)
- Kuivamisaeg (20°C ja 60% R.H.) – tolmukindel 20-25 minuti pärast
- Mahukahanemine – puudub
- Järempaisumine <3% (FEICA TM 1004-2010)

Siga Corvum 12/48

Siga Corvum on ühepoolne eelvolditud kõrgete tehniliste näitajatega teip püsivate õhutihedate ühenduste ja läbiviikude teostamiseks aurutõkkekihis (www.siga.ch).

Tehnilised andmed (www.siga.ch):

- Vastupidavus temperatuurile -40°C kuni +100°C
- Suhteline difusioonitakistus s_d – 8m
- Töötlemistemperatuur >- 10 °C

Siga Wigluv 20/40

Siga Wigluv on ühepoolne kõrgete tehniliste näitajatega teip püsivate õhu- ja veetihedate ühenduste ja läbiviikude teostamiseks välisingimustes (www.siga.ch).

Tehnilised andmed (www.siga.ch):

- Vastupidavus temperatuurile -40°C kuni +100°C
- Suhteline difusioonitakistus s_d <2m
- Töötlemistemperatuur >- 10 °C

Tabel 3.1 Uuritavad tarindid

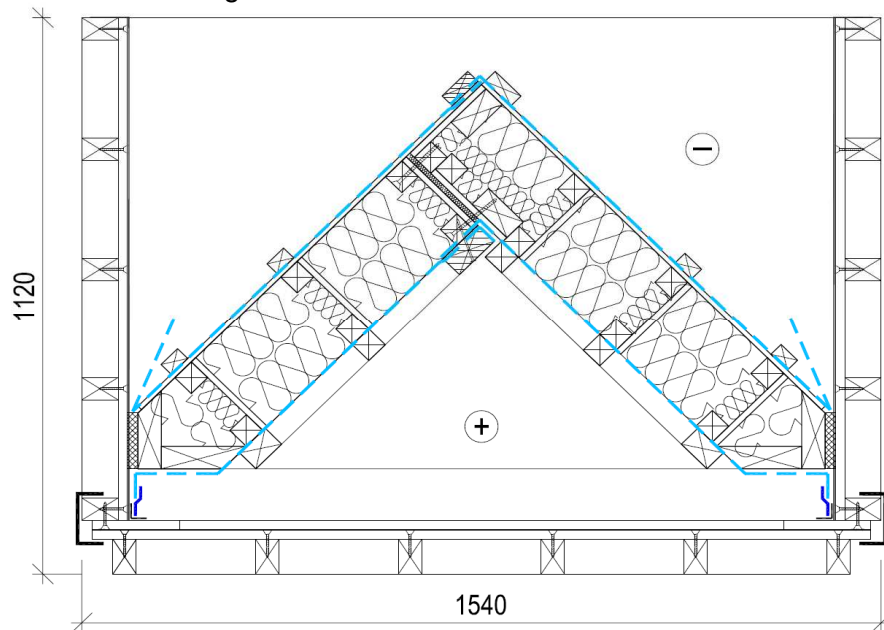
Tavaruumi välissein	Vannitoa välissein
<ul style="list-style-type: none">• Roov 28x45mm• Tuuletõkkekangas Icopal Windbreak/Tyvek Soft• Kipsplaat 9,5mm• Liitpost 45x195(prussid 45x45mm või 45x95mm ühendatud OSB/3 12mm plaadiga) + klaasvill 2x100mm• PE-kile 0,2mm• Karkass 45x45mm	<ul style="list-style-type: none">• Roov 28x45mm• Tuuletõkkekangas Tyvek Soft• Kipsplaat 9,5mm• Liitpost 45x195 + klaasvill 2x100mm• Karkass 45x45mm + klaasvill 50mm• Kipsplaat 12,5mm ÕS• Niiskustõke (Schönöks HA, vannitoa poolses osas)
Vahelagi	Vannitoa sisesein
<ul style="list-style-type: none">• Puitlaastplaat P5 21mm• Karkass 45x245mm + klaasvill 2x100+50mm• Nöörid villa hoidmiseks	<ul style="list-style-type: none">• Kipsplaat 12,5mm ÕS• Karkass 45x95mm + klaasvill 100mm• Kipsplaat 12,5mm TS• Niiskustõke (Schönöks HA)
Korterite vaheline sein	Katus
<ul style="list-style-type: none">• Kipsplaat 12,5mm ÕS• Kipsplaat 12,5mm TS• Karkass 45x95mm + klaasvill 100mm• Õhkvahe 30mm• Karkass 45x95mm + klaasvill 100mm• Kipsplaat 12,5mm TS• Kipsplaat 12,5mm ÕS	<ul style="list-style-type: none">• Roov 28x45mm• Aluskate Icopal Ventex• Karkass 45x245mm + klaasvill 2x100+50mm• OSB/3 12mm• PE-kile 0,2mm• Roov 28x70mm

3.5.1 Välisseina välisnurk

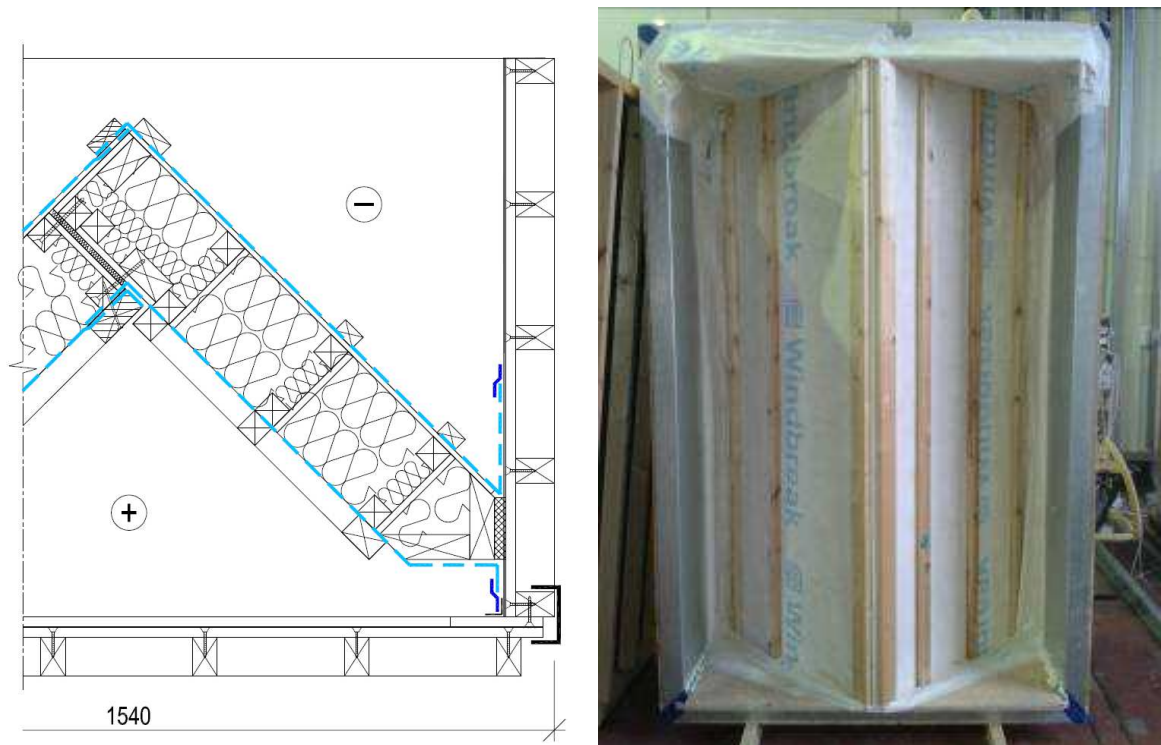
Katsekeha välisseina välisnurk (VSVS; vt Lisa 1 – Välisnurk (VSVS)) koosneb kahest tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist. Elementide konstruktsioon vastab

tavaruumi välisseina konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), paneelid on ühendatud analoogselt reaalse hoone välisseinaelementidega. Katsekehaga VSVS teostati 3 erinevat mõõtmist:

- 1) VSVS-1 – Tuuletõkkekangas katsekambri seinte külge teipimata (olukord imiteerib kehva kutsemeisterlikkust, kus tuuletõkkekangas on täielikult ühendamata või projekteerimist vt Joonis 3.7). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..50/-20...-50Pa sammuga 5Pa.
- 2) VSVS-2 – Tuuletõkkekangas katsekambri külge teibitud (vt Joonis 3.8). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 50..200/-50...-200Pa sammuga 25Pa.
- 3) VSVS-3 – Tuuletõkkekangas katsekambri külge teibitud (vt Joonis 3.8). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 75..315/-75...-315Pa sammuga 40Pa.



Joonis 3.7 Välisseina välisnurk katsekambris (VSVS-1).



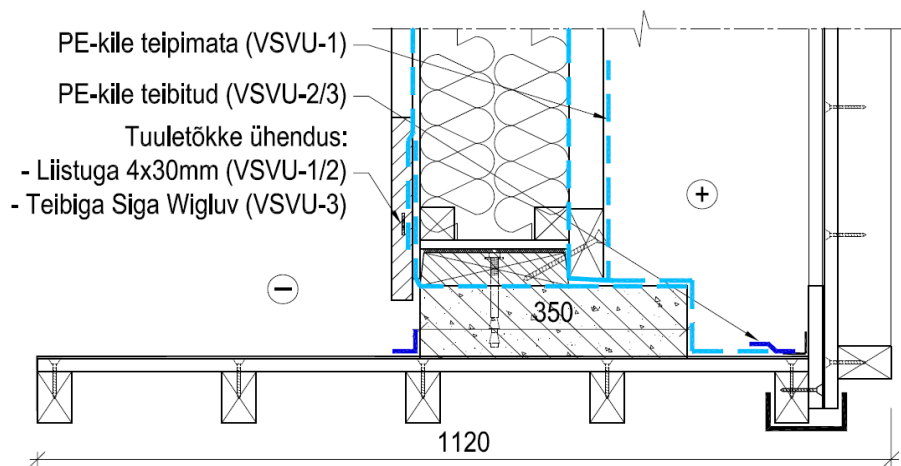
Joonis 3.8 Välisseina välisnurk katsekambris (VSVS-2, VSVS-3).

3.5.2 Välisseina ja sokli liitekoht

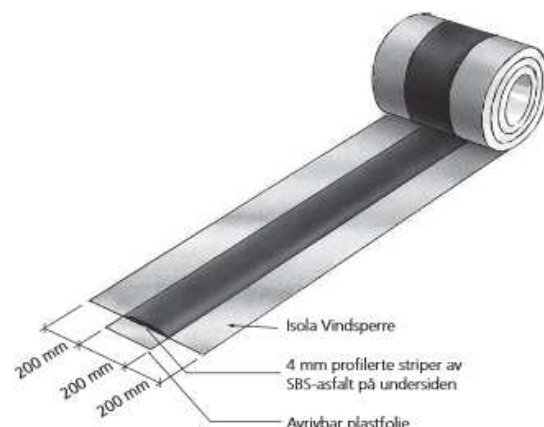
Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU; vt Lisa 2 – Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU)) koosneb tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist ja betoonplokkist. Välisseina konstruktsioon vastab tavaruumi välisseina konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), seinaelement ja betoonplokk on ühendatud analoogselt reaalse hoonega. Seinaelemendi ja sidepuu vaheline vuuk on tihendatud villasuka ribadega (Isover TK polüetüleenkilega kaetud ja silikooniga töödeldud mineraalvillaribad (www.isover.ee), vt Joonis 3.10). Vundamendi pinna saab lugeda tasaseks (vt pt 2.3.2). Antud uuringu käigus ei olnud võimalik jäljendada vundamendile mõjuvaid koormusi, mis võis põhjustada suuremaid katsetulemusi võrreldes võimaliku koormatud katsekehaga (Relander jt, 2011). Katsekehaga VSVU teostati 3 erinevat mõõtmist:

- 1) VSVU-1 – Välisseina aurutõkketile (PE-kile) vundamendi külge teipimata (olukord imiteerib kehvast kutsemeisterlikkusest või projekteerimisest), tuuletõkketanga ja sidepuumembraanina kasutatud Svillemembran-i (Svillemembran on sidepuumembraan, millel on bituumenriba kahe tuuletõkketangast „kõrvaga“, mis täidab betooni ja puitkonstruktsiooni eralduskihi funktsiooni, vt Joonis 3.10) ühendus liistuga (vt Joonis 3.9).
- 2) VSVU-2 – PE-kile vundamendi külge teibitud, tuuletõkketanga ja sidepuumembraani ühendus liistuga (vt Joonis 3.9).
- 3) VSVU-U – PE-kile vundamendi külge teibitud, tuuletõkketanga ja sidepuumembraani ühendus teibitud (vt Joonis 3.9).

Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.



Joonis 3.9 Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU) katsekambris.

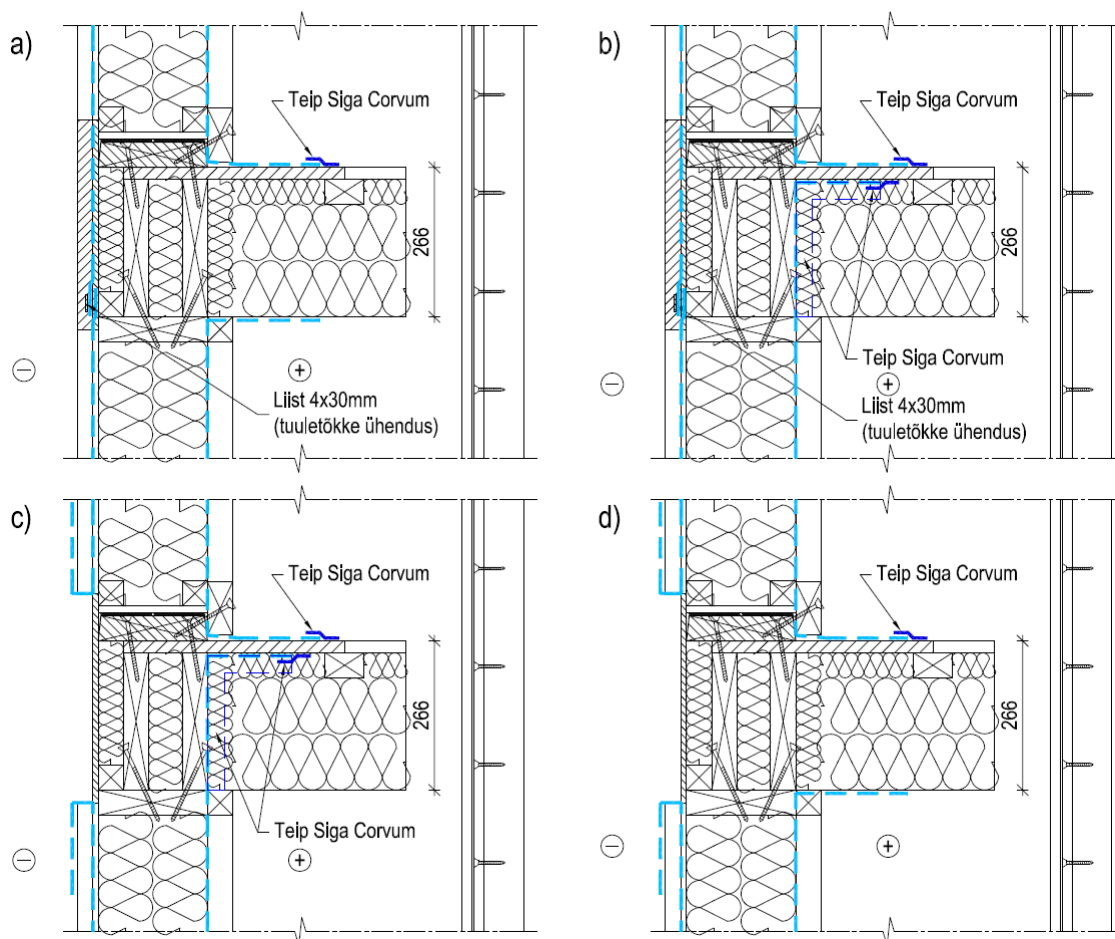


Joonis 3.10 Villasukk (vasakul, www.isover.ee) ja sidepuumembraan (Svillemembran, www.isola.no).

3.5.3 Välisseina ja vahelae liitekoht

Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL; vt Lisa 3 – Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL)) koosneb kahest tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist ja vahelaeelemendist (vt Tabel 3.1). Seinaelementide konstruktsioon vastab tavaruumi välisseina konstruktsioonile, laeelement vahelae konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), seinaelemendid ja vahelaeelement on ühendatud analoogselt reaalse hoonega. Katsekehaga VSVL teostati 4 erinevat mõõtmist:

- 1) VSVL-1 – PE-kile vahelaetalade all, tuuletõkkekangas ühendatud (vt Joonis 3.9 Joonis 3.11a). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.
- 2) VSVL-2 – PE-kile teibitud vahelaeplaadil alumise pinna ja vahelaetalade külge, tuuletõkkekangas ühendatud (vt Joonis 3.11b). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..215/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.
- 3) VSVL-3 – PE-kile teibitud vahelaeplaadil alumise pinna ja vahelaetalade külge, tuuletõkkekangas ühendamata (vt Joonis 3.11c). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..215/-20...-500Pa sammuga 5/10/25/50Pa.
- 4) VSVL-4 – PE-kile vahelaetalade all, tuuletõkkekangas ühendamata (vt Joonis 3.9 Joonis 3.11d). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..100/-20...-500Pa sammuga 5/10/25/50Pa.



Joonis 3.11 Välisseina ja vahelae liitekohta (VSVL) mõõdetud variandid.

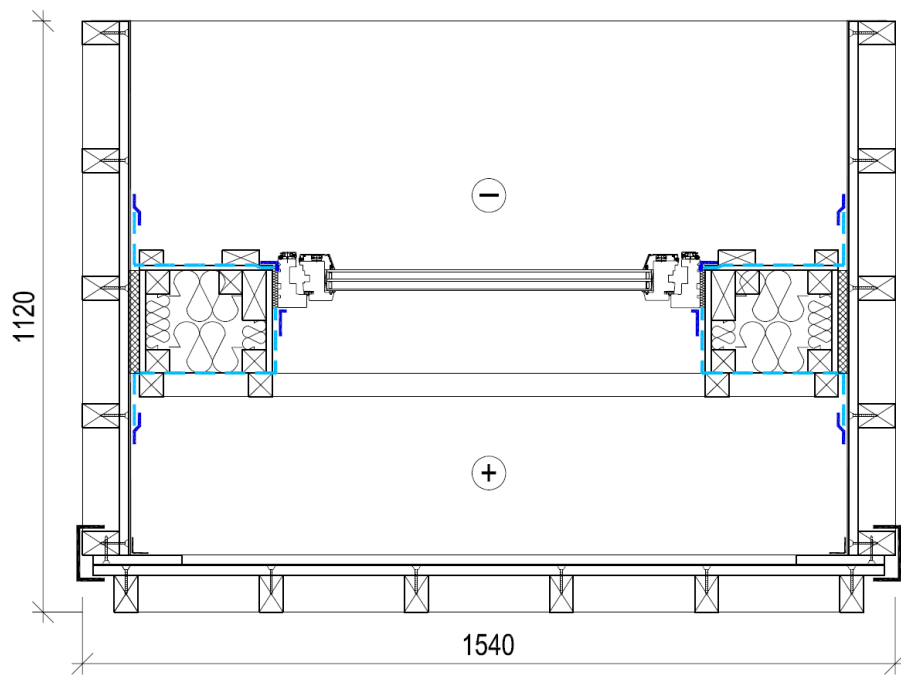


Joonis 3.12 Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL) katsekambris.

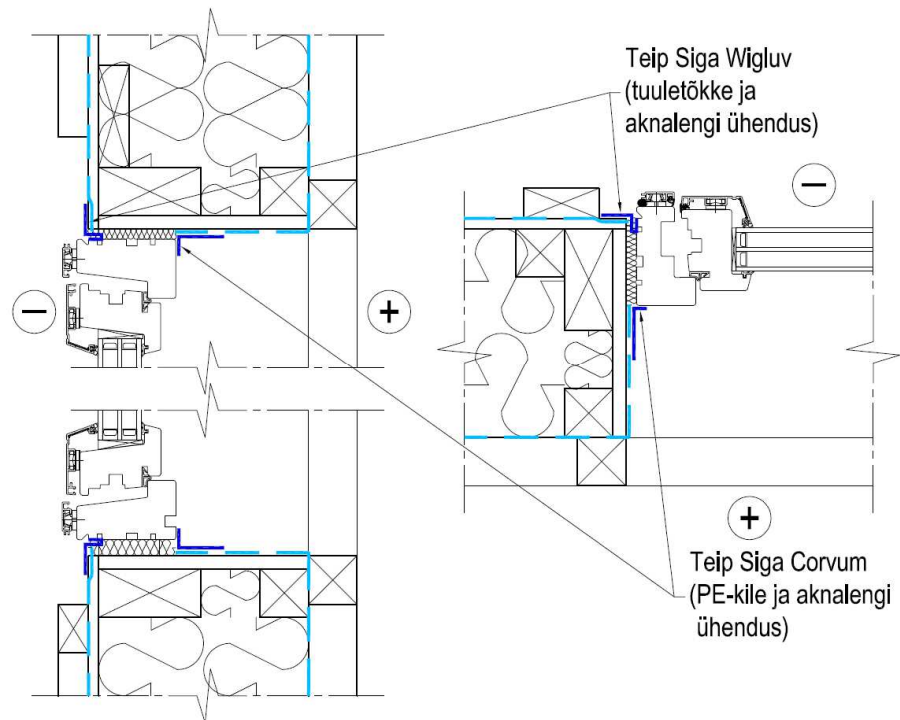
3.5.4 Välisseina ja akna liitekoht

Välisseina ja akna liitekoht (VSA; vt Lisa 4 – Välisseina ja akna liitekoht (VSA)) koosneb tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist ja aknast. Välisseina konstruktsioon vastab tavaruumi välisseina konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), avatäitena on kasutatud Viking Widow AS-i toodetud väljapoole külgavanevat puitaluumiinium akent (SW11, www.viking.ee) mõõtudega 800x1500mm. Aken on kinnitatud karkassipostide külge kruvidega läbi lengi ning paigaldusklambritega. Katsekehaga VSVU teostati 3 erinevat mõõtmist:

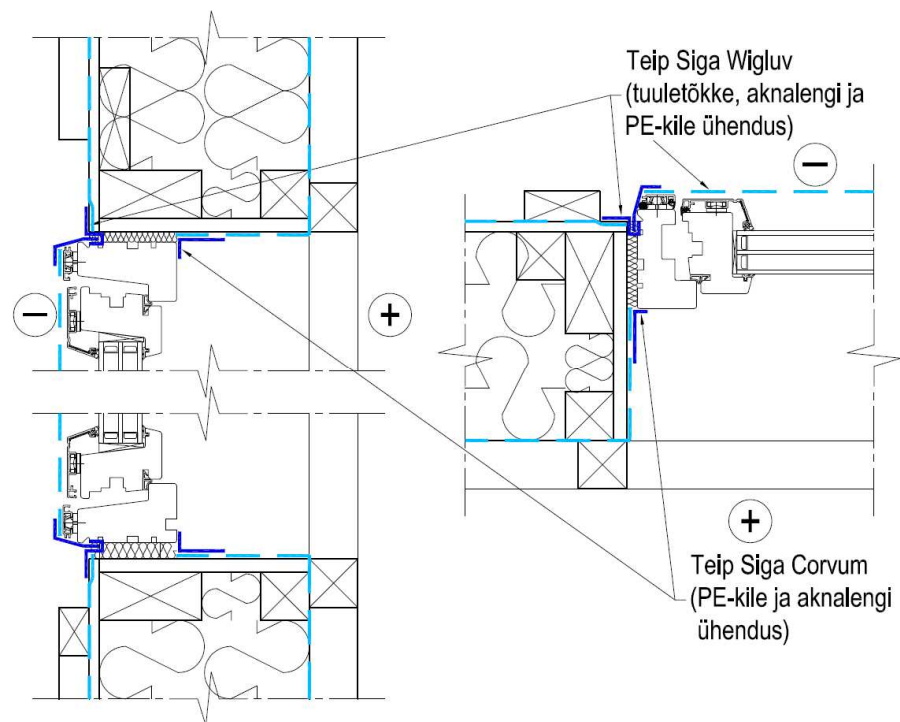
- 1) VSA-1 – Tuuletõkkekangas korrektselt teibitud aknalengi külge (vt Joonis 3.14). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..450/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.
- 2) VSA-2 – Tuuletõkkekangas korrektselt teibitud aknalengi külge, aken kaetud killega ja teibitud, et kõrvaldada tulemustest akna omaleke (vt Joonis 3.15). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.
- 3) VSA-3 – Tehases teostatud tuuletõkkekanga ebakorrektneteipimine aknalengi alumiiniumprofiili külge (olukord imiteerib kehvata kutsemeisterlikkust või projekteerimist). Alumiiniumprofiilid, millega on kaetud akna õuepoolne külg, ei ole kinnitatud puidu külge õhu- ega veetihedalt (vt Joonis 3.16). Korrektne on teipida tuuletõkkekangas aknalengi puitosa külge (vt Joonis 3.14) Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..400/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.



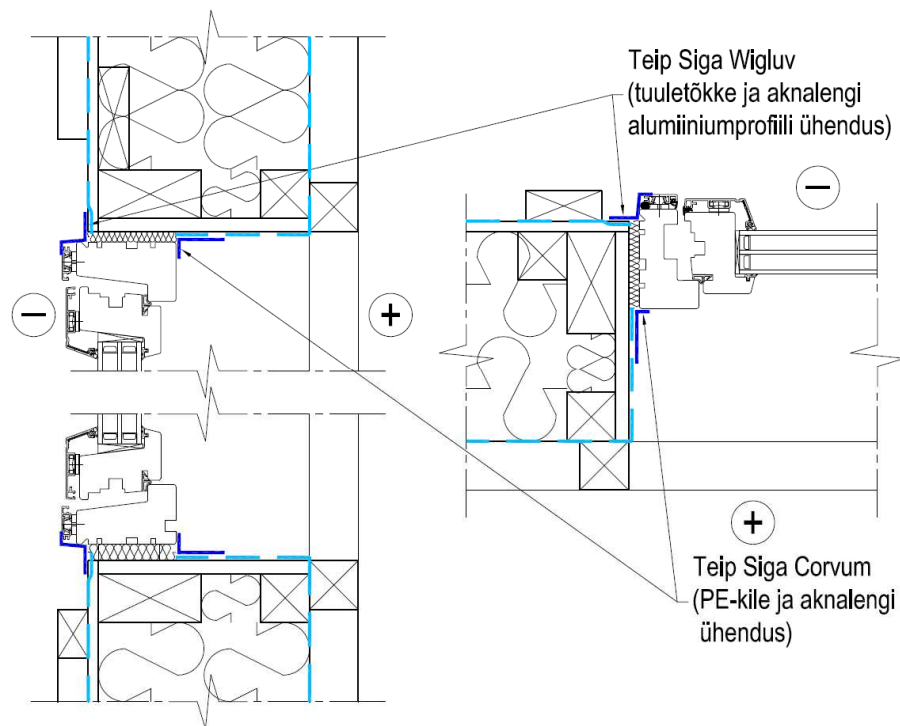
Joonis 3.13 Välisseina ja akna liitekoht (VSA) katsekambris.



Joonis 3.14 Tuuletõkkekangas teibitud aknalengi külge (VSA-1).



Joonis 3.15 Aken kaetud kilega ja teibitud (VSA-2).



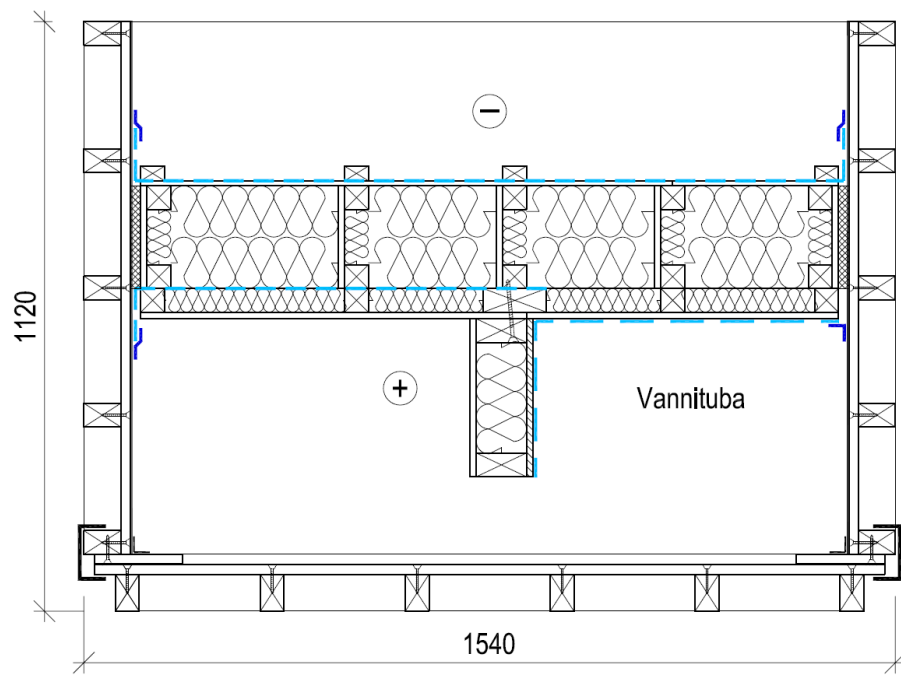
Joonis 3.16 Tehases teostatud tuuletõkkekanga ebakorrektneteipimine (VSA-3).

3.5.5 Välissein vannitoe kohal

Katsekeha välissein vannitoe kohal (VSVA; vt Lisa 5 – Välissein vannitoe kohal (VSVA)) koosneb tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist ja siseseinaelemendist. Elementide konstruktsioon vastab vannitoe välisseina ja sisesein siseseina konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), paneelid on ühendatud analoogselt reaalse hoone elementidega. Katsekehaga VSVA teostati 3 erinevat mõõtmist:

- 1) VSVA-1 – Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..50/-20...-50Pa sammuga 5Pa.
- 2) VSVA-2 – Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 200..500/-200...-500Pa sammuga 50Pa.
- 3) VSVA-3 – Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.

Antud katsekeha mõõtmistulemust kasutatakse reaalse hoone eeldatava õhulekkearvu arvutamisel piirde pinnaühikut läbiva vooluhulgana ($m^3/(m^2 \cdot h)$), kuna välisseinaelemendis on esitatud nii tuuletõkkekiht kui ka auru- ja õhutõke katkestusega (katkestus jälgendab aurutõkkekihi ebakvaliteetset jätkamist või torustiku läbiviiku).



Joonis 3.17 Välissein + sisesein vannituba kohal (VSVA) katsekambris.

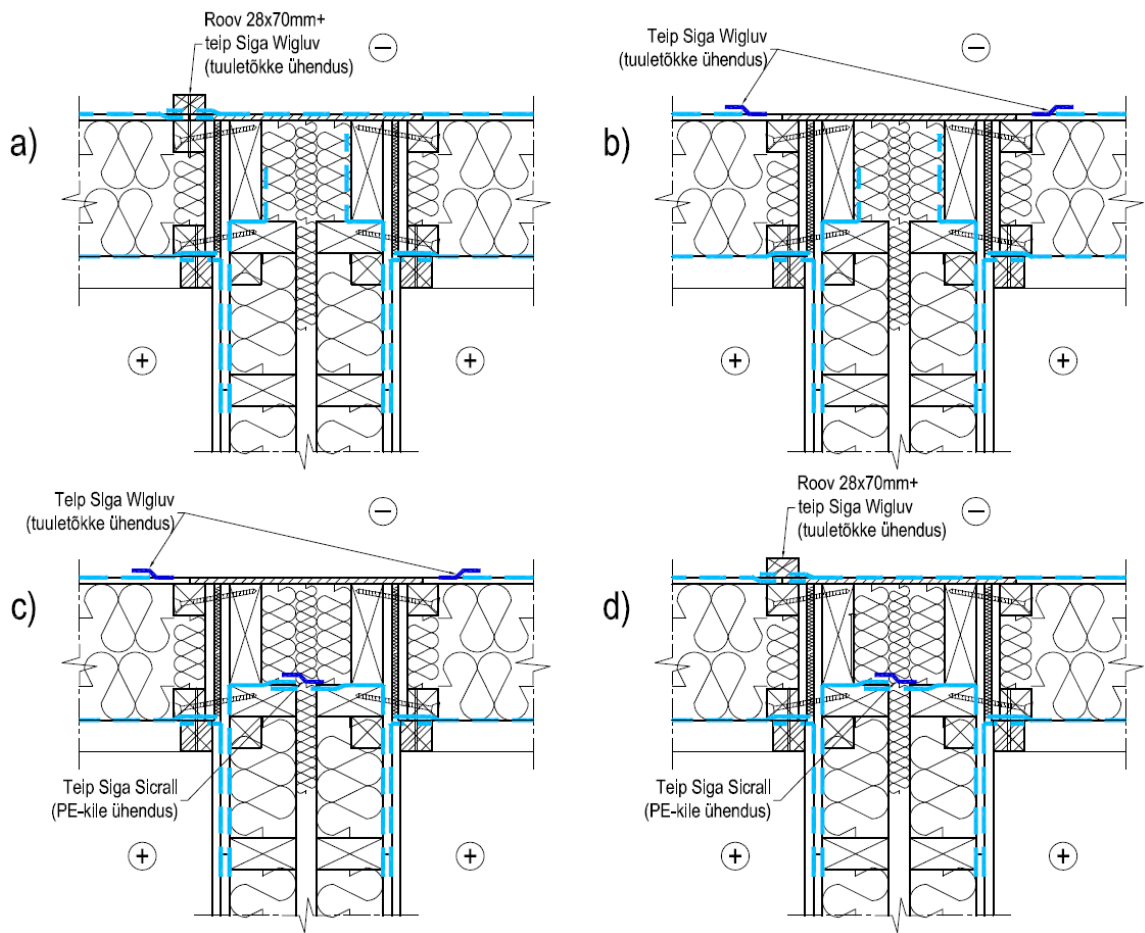
3.5.6 Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht

Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht (VSTS; vt Lisa 6 – Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht (VSTS)) koosneb 2-st tehase tingimustes valmistatud välisseinaelemendist ja korterite vahelisest seinast (EI30 (Tuleohutud puitmajad, 2014); vt Tabel 3.1). Seinaelementide konstruktsioon vastab tavaruumi välisseina konstruktsioonile, laeelement vahelae konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), seinaelemendid on ühendatud analoogselt reaalse hoonega. Katsekehaga VSTS teostati 4 erinevat mõõtmist:

- 1) VSTS-1 – PE-kile ühendamata, tuuletõkkekangas ühendatud (vt Joonis 3.19a). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.
- 2) VSTS-2 – PE-kile ühendamata, tuuletõkkekangas ühendamata (vt Joonis 3.19b). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..250/-20...-215Pa sammuga 5/25/Pa.
- 3) VSTS-3 – PE-kile ühendatud, tuuletõkkekangas ühendamata (vt Joonis 3.19c). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..300/-20...-225Pa sammuga 5/25Pa.
- 4) VSTS-4 – PE-kile ühendatud, tuuletõkkekangas ühendatud (vt Joonis 3.19d). Õhuvooluhulgad mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 20..500/-20...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.



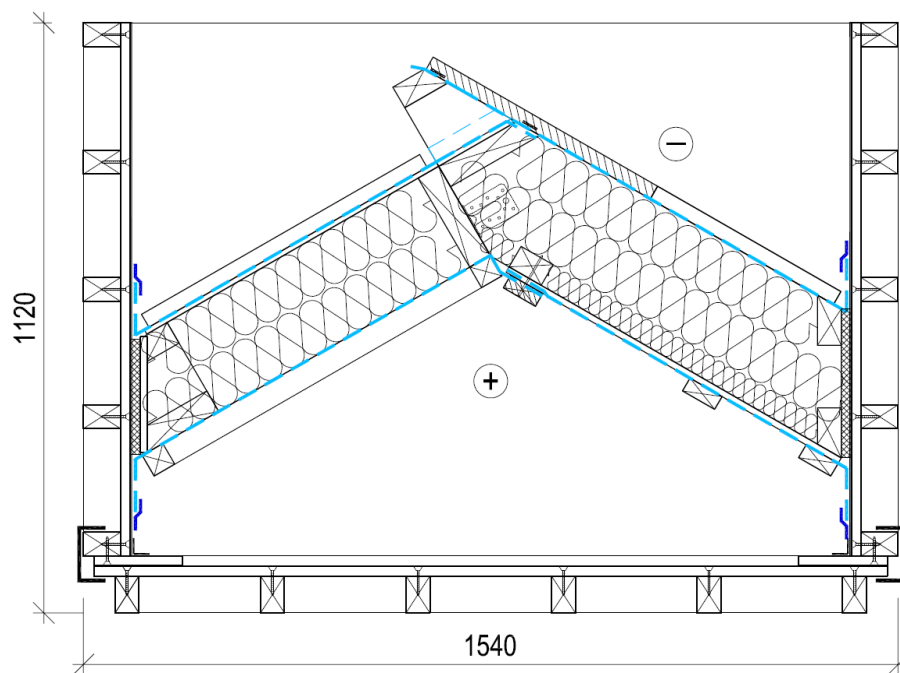
Joonis 3.18 Välissein + korterite vaheline sein katsekambris (VSTS).



Joonis 3.19 Välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta (VSTS) mõõdetud variandid.

3.5.7 Välisseina ja katuse liitekoht

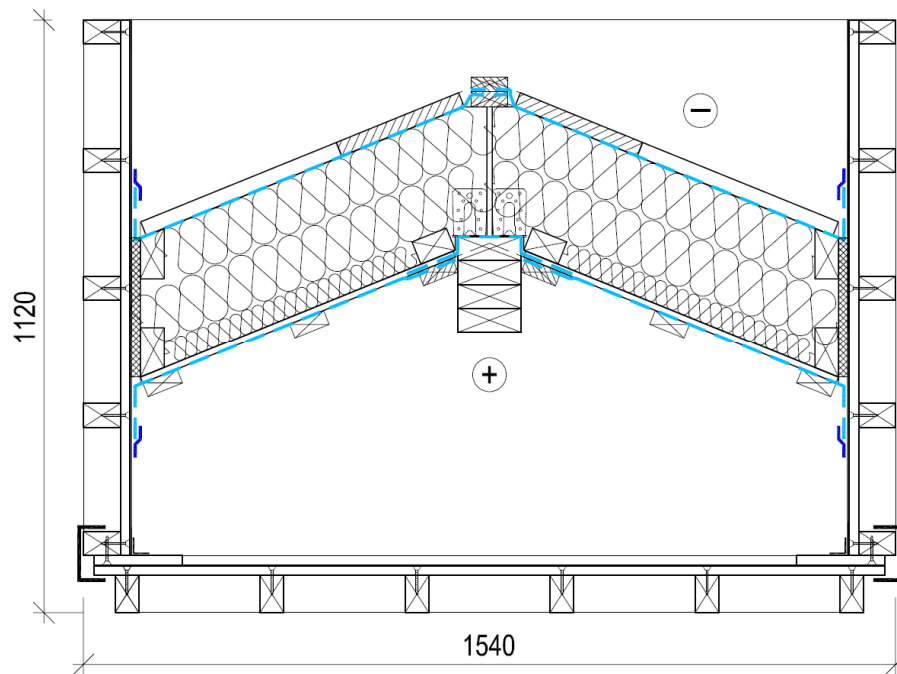
Katsekeha välisseina ja katuse liitekoht (VSKE; vt Lisa 7 – Välisseina ja katuse liitekoht) koosneb tehase tingimustes valmistatud räästaga viilkatuse katuseelemendist ja välisseinaelemendist. Elementide konstruktsioon vastab katuse konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), paneelid on ühendatud analoogselt reaalse hoone elementidega. Õhurõhu tekitamiseks vajaminev õhuvooluhulk mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 10..500/-10...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.



Joonis 3.20 Välisseina ja katuse liitekoht (VSKE) katsekambris.

3.5.8 Katusehari

Katsekeha katusehari (KEKE; vt Lisa 8 – Katusehari (KEKE)) koosneb kahest tehase tingimustes valmistatud katuseelemendist ja harjatalast. Elementide konstruktsioon vastab katuse konstruktsioonile (vt Tabel 3.1), paneelid on ühendatud harjatalaga analoogselt reaalse hoone katuseelementidega. Õhurõhu tekitamiseks vajaminev õhuvooluhulk mõõdeti iga rõhuerinevuse taseme juures vahemikus 10..500/-10...-500Pa sammuga 5/25/50Pa.



Joonis 3.21 Katusehari (KEKE) katsekambris.

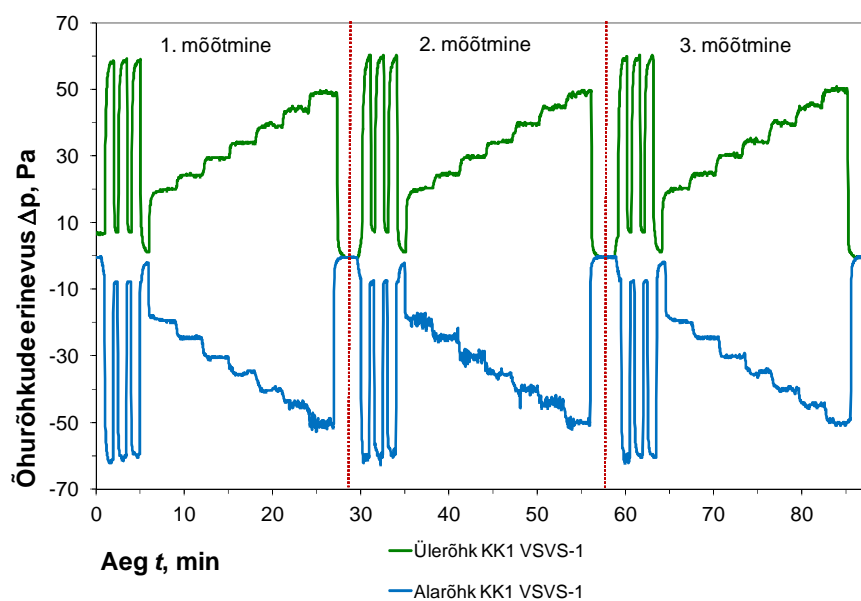
4 Laboratoorsed mõõtmistulemused

Uuringu raames viidi mõõtmised läbi kaheksa puitsõrestik välisseina liitekohta tihendusvariandiga. Kõigi katsete juures ei olnud tagatud nõue hoida temperatuuri 15-30°C ja suhtelist õhuniiskust 25-75% juures (EVS EN 12114, 2000). Antud uurimuses ei ole õhu mahuvoolu vastavalt baastingimustele korrigeeritud, kuna on teadmata temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse muutuste mõju liitekohtade õhulekete suurustele. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega, et näidata, kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta. Alarõhu- ja ülerõhu mõõtmistulemuste trendijoonelt arvutati lekke õhuvooluhulk 10 ja 50Pa juures (EVS EN 15242).

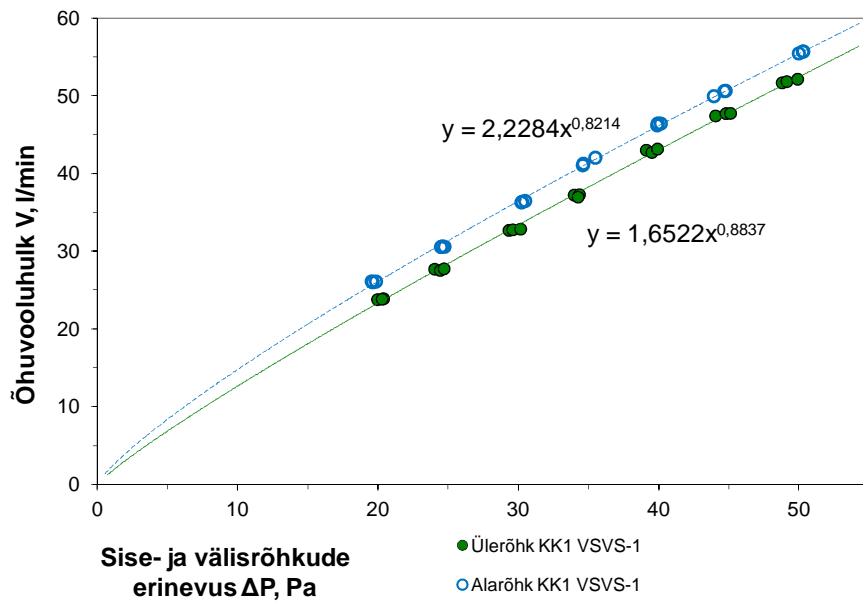
4.1.1 Välisseina välisnurk

Tuuletõkkekangas katsekambri seinte külge ühendamata

Katse teostati saamaks teada täielikult tihendamata konstruktsiooni liitekohta õhuleket (olukord, kus tuuletõkkekangas on katsekambri seinte külge ühendamata, vt peatükk 0). Mõõtmist korraldi 3 korda. Kuna mõõtetulemuste graafikud olid väga sarnased (vt Joonis 4.1), siis järgnevad mõõtmised sooritati ainult ühe korra. Õhulekkegraafikule (vt Joonis 4.2) on kantud kõigi kolme mõõtmise tulemused stabiliseerunud õhurõhkude erinevuste ja õhuvooluhulkade juures. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (2,188m), et näidata, kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



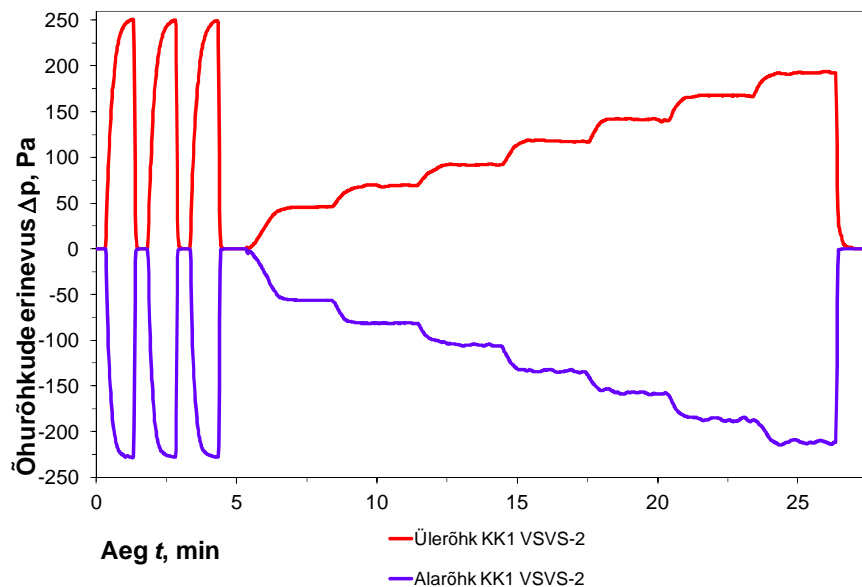
Joonis 4.1 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVS-1).



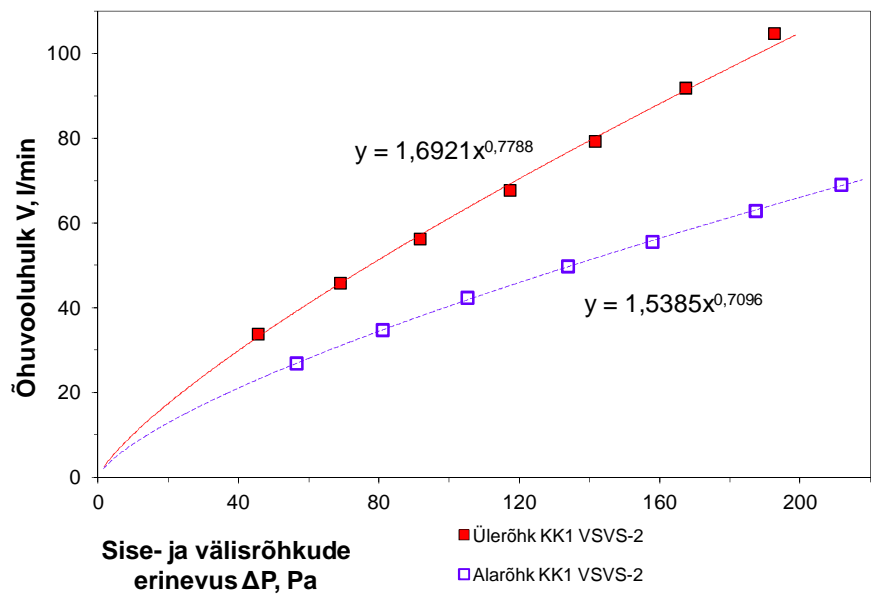
Joonis 4.2 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVS-1).

Tuuletõkkekangas ühendatud

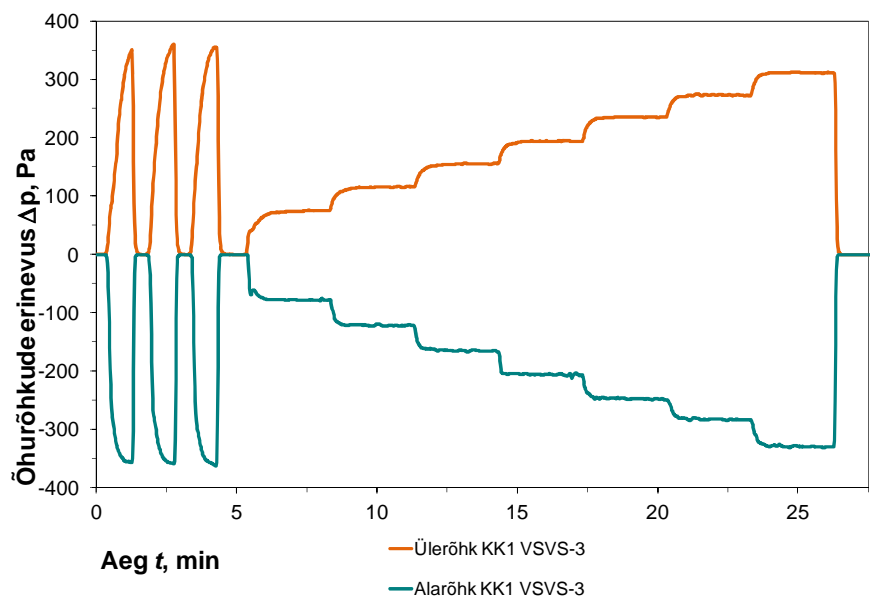
Antud konstruktsiooni, kus tuuletõkkekangas on katsekambri seinte külge ühendatud (vt peatükk 0), õhulekke uurimiseks teostati kaks katset, mõõtmised teostati rõhuerinevuste tasemetel vahemikes 50..200/-50...-200Pa (VSVS-2) ja 75..315/-75...-315Pa (VSVS-3). Katsetulemustest on puudu 350-500Pa mõõtmistulemused, kuna ventilaator ei olnud suuteline antud rõhuerinevustele vastavat vooluhulka tekitama. Tulemuste hindamisel kasutatakse graafikut, kus VSVS-2 ja VSVS-3 on ühel graafikul.



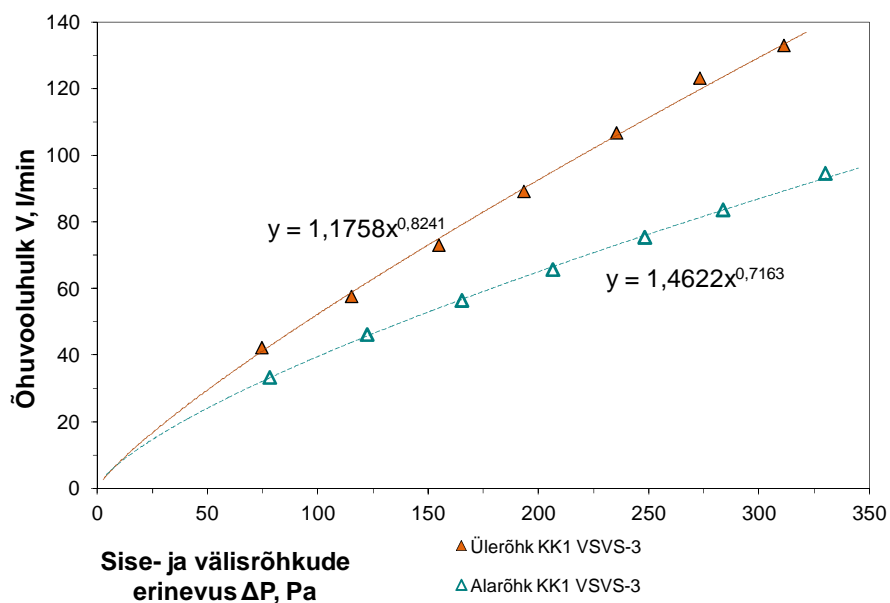
Joonis 4.3 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVS-2).



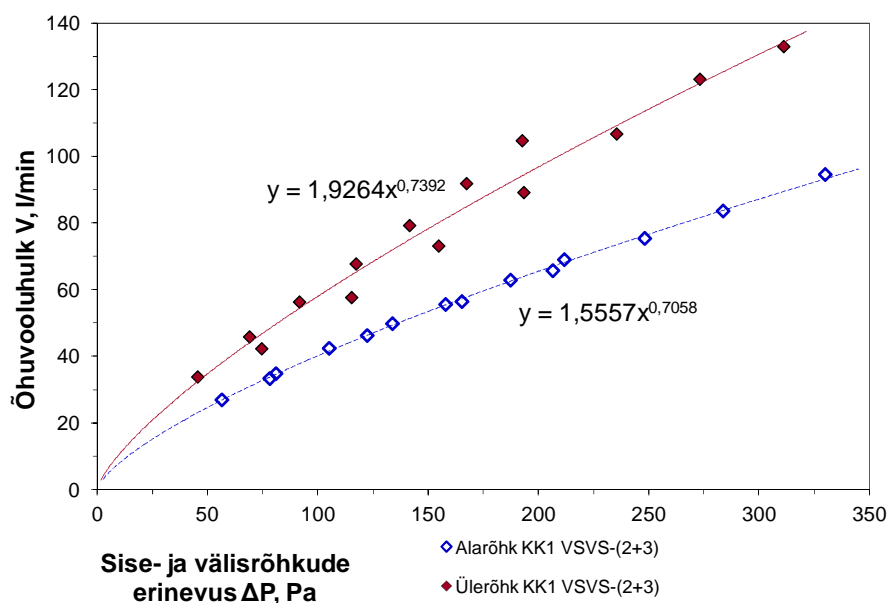
Joonis 4.4 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVS-2).



Joonis 4.5 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVS-3).



Joonis 4.6 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVS-3).



Joonis 4.7 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVS-(2+3)).

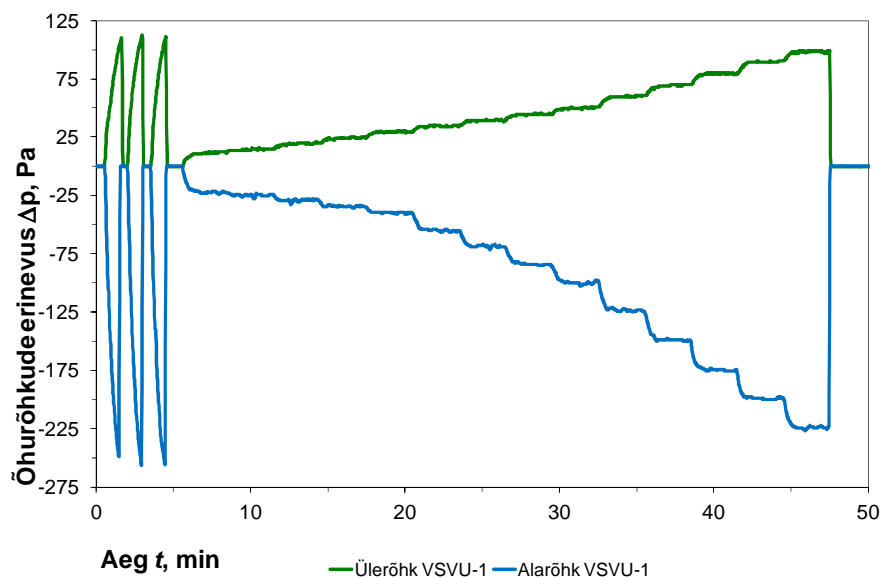
Tabel 4.1 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSVS).

	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVS-1	5,8	6,8	24,0	25,3	1,65	0,88	2,23	0,82
2. VSVS-2	4,6	3,6	16,3	11,3	1,69	0,78	1,54	0,71
3. VSVS-3	3,6	3,5	13,5	11,0	1,18	0,82	1,46	0,72
4. VSVS-(2+3)	4,8	3,6	15,9	11,2	1,93	0,74	1,56	0,71

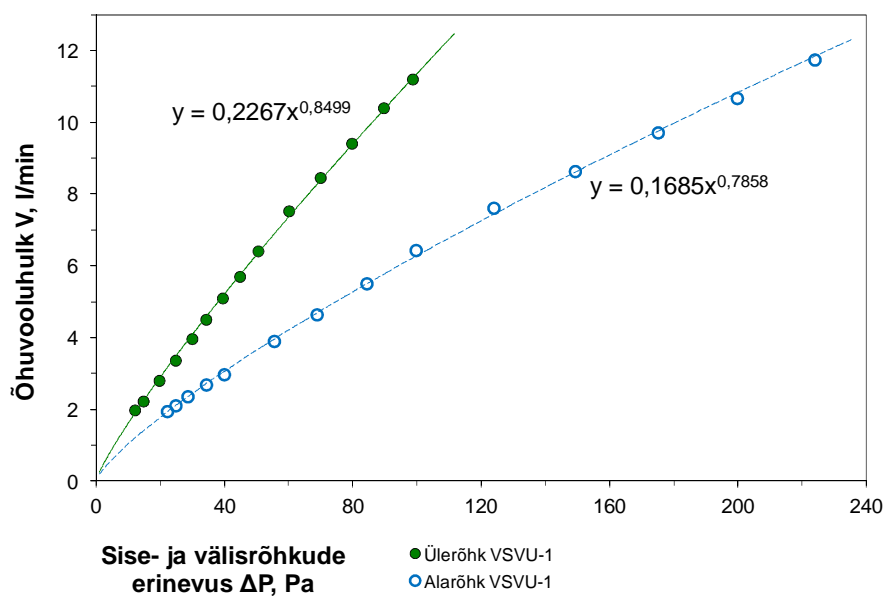
4.1.2 Välisseina ja sokli liitekoht

Antud katsekehaga (vt peatükk 3.5.2) viidi läbi 3 katset kontrollimaks tuuletõkkekanga ja Svillemembran-i ning aurutõkketile erinevate ühendusviiside mõju välisseina ja sokli liitekohta õhutihedusele. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (1,324m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.

PE-kile teipimata, tuuletõkkekanga ja Svillemembran-i ühendus liistuga (VSVU-1)

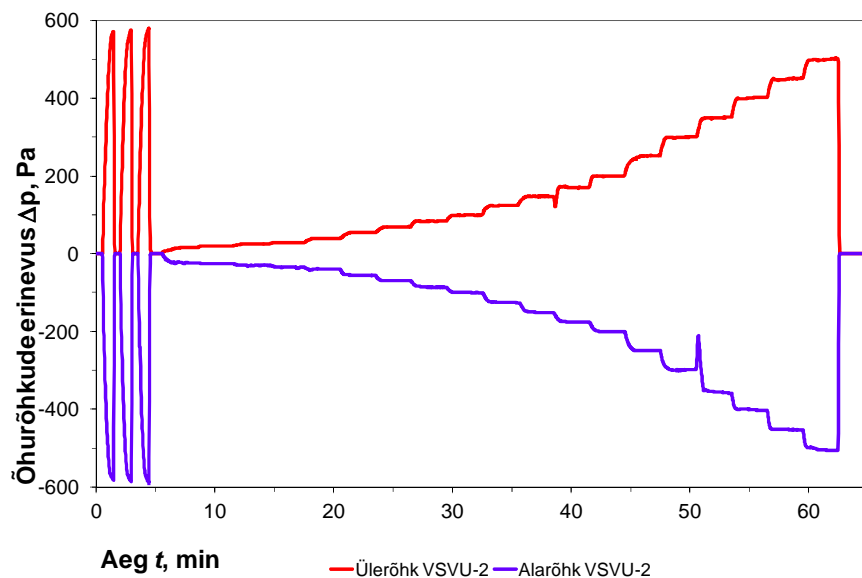


Joonis 4.8 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVU-1).

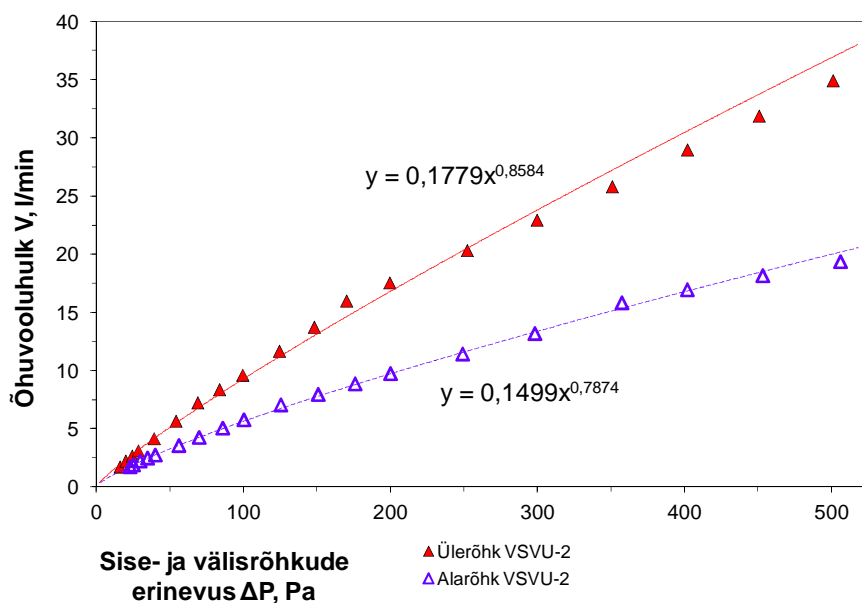


Joonis 4.9 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVU-1).

PE-kile teibitud, tuuletõkkekanga ja Svillemembran-i ühendus liistuga (VSVU-2)

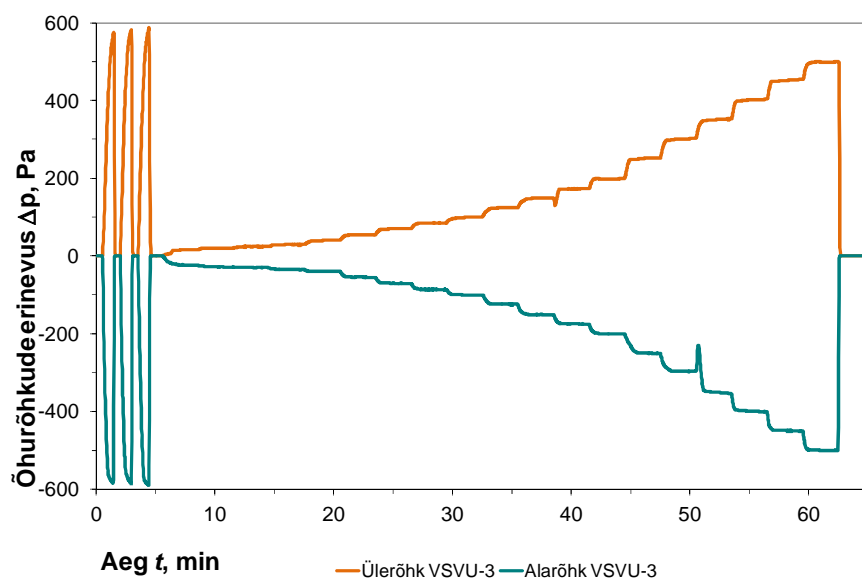


Joonis 4.10 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVU-2).

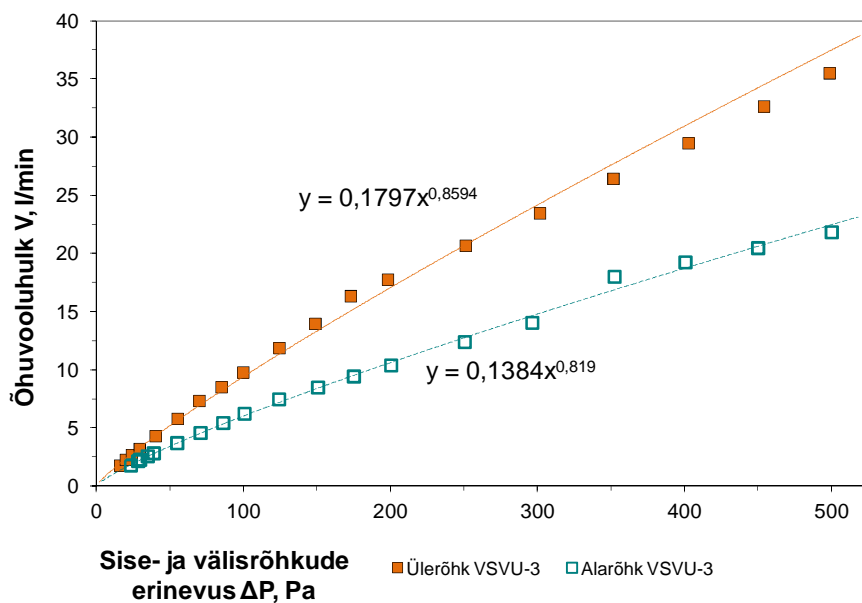


Joonis 4.11 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVU-2).

PE-kile teibitud, tuuletõkkekanga ja Svillemembran-i ühendus teibitud (VSVU-3)



Joonis 4.12 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVU-3).



Joonis 4.13 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVU-3).

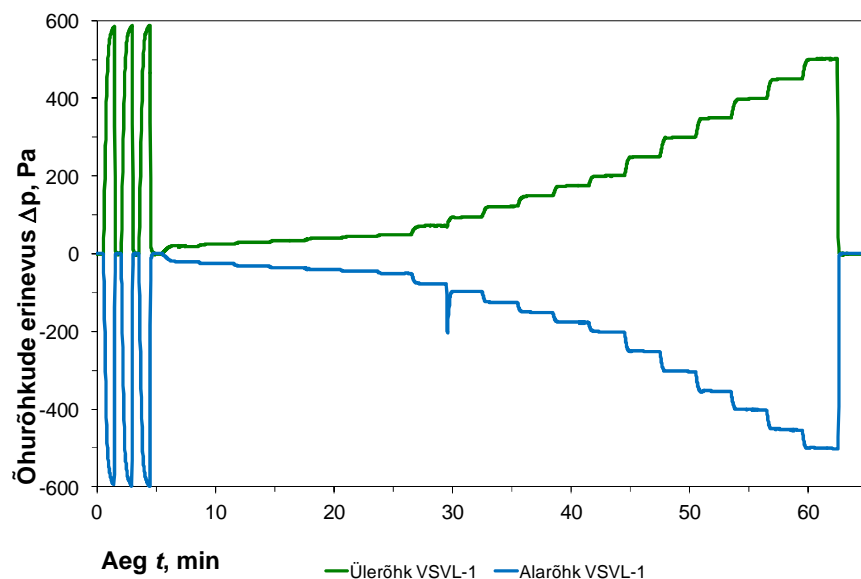
Tabel 4.2 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSVU).

	Õhulekkearvu, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVU-1	1,21	0,78	4,76	2,75	0,23	0,85	0,17	0,79
2. VSVU-2	0,97	0,69	3,86	2,46	0,18	0,86	0,15	0,79
3. VSVU-3	0,98	0,69	3,92	2,57	0,18	0,86	0,14	0,82

4.1.3 Välisseina ja vahelaie liitekoht

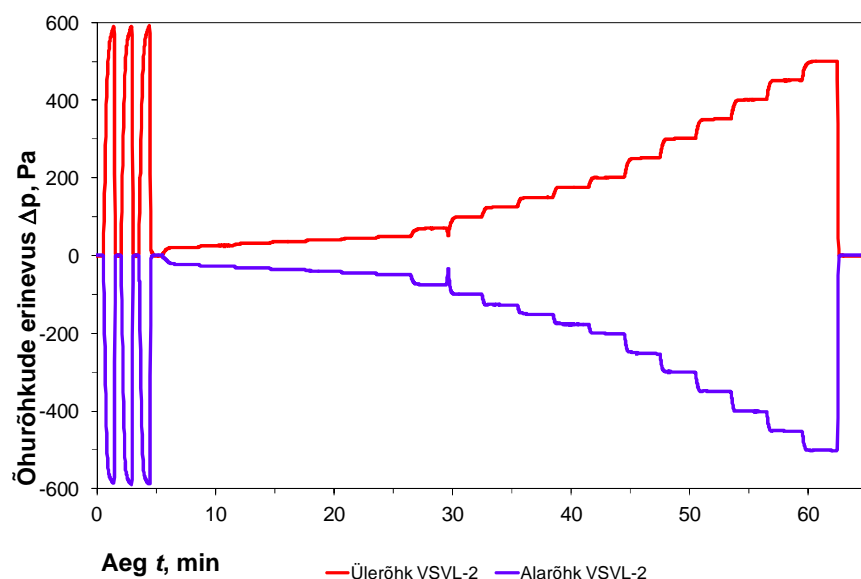
Antud katsekehaga (vt peatükk 3.5.3) viidi läbi mõõtmised kontrollimaks aurutõkkele kahe erineva asetuse mõju välisseina ja vahelaie liitekohta õhutihedusele. Aurutõkkele mõju paremaks esiletulemiseks mõõdeti mõlemat olukorda situatsioonis, kus tuuletõkkekanas oli nii ühendatud kui ka ühendamata (vt Joonis 3.11). Katsetulemustest on puudu ülerõhu mõõtmistulemused vahemikes 200-500Pa (VSVL-3) ja 150-500Pa (VSVL-4), kuna ventilaator ei olnud suuteline antud rõhuerinevustele vastavat vooluhulka tekitama. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (1,324m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.

Aurutõkkele vahelaetalade all, tuuletõkkekanas ühendatud (VSVL-1)

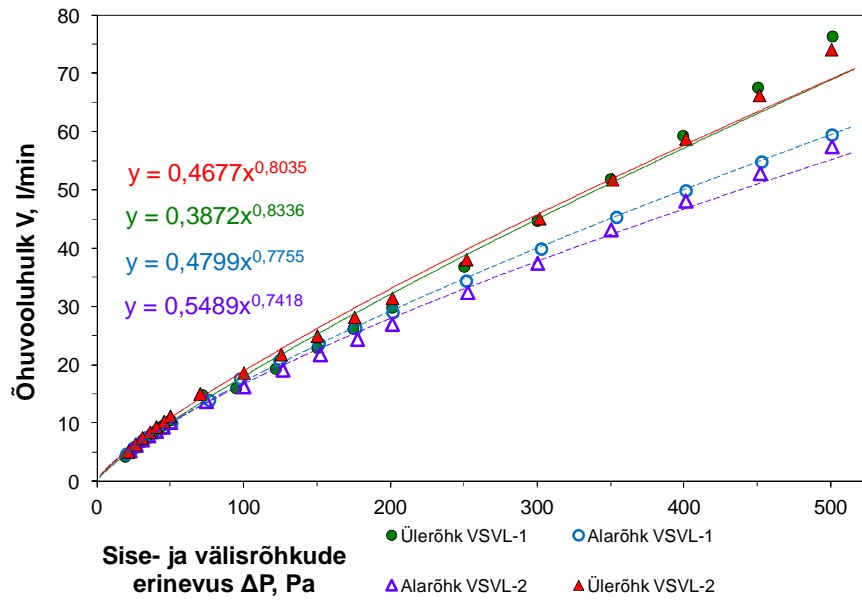


Joonis 4.14 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVL-1).

Aurutõkkele vahelaieplaadi all, tuuletõkkekanas ühendatud

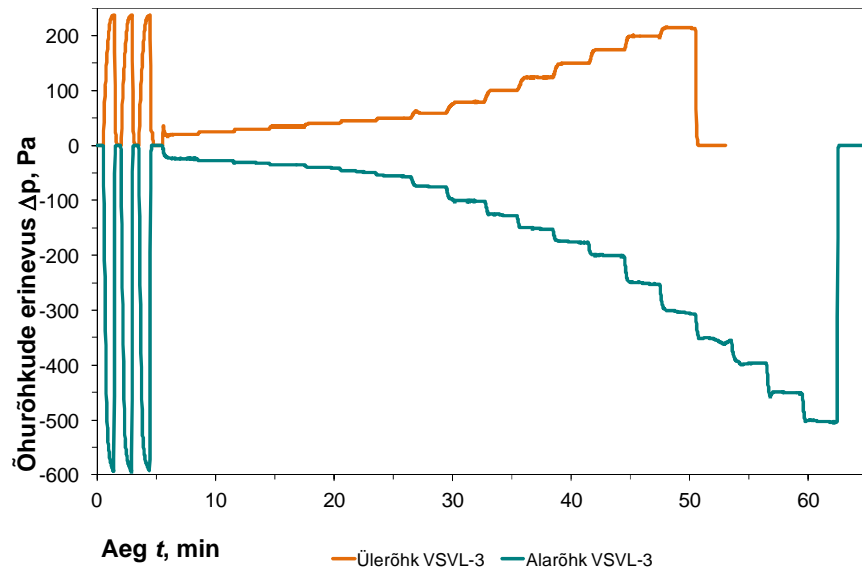


Joonis 4.15 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVL-2).



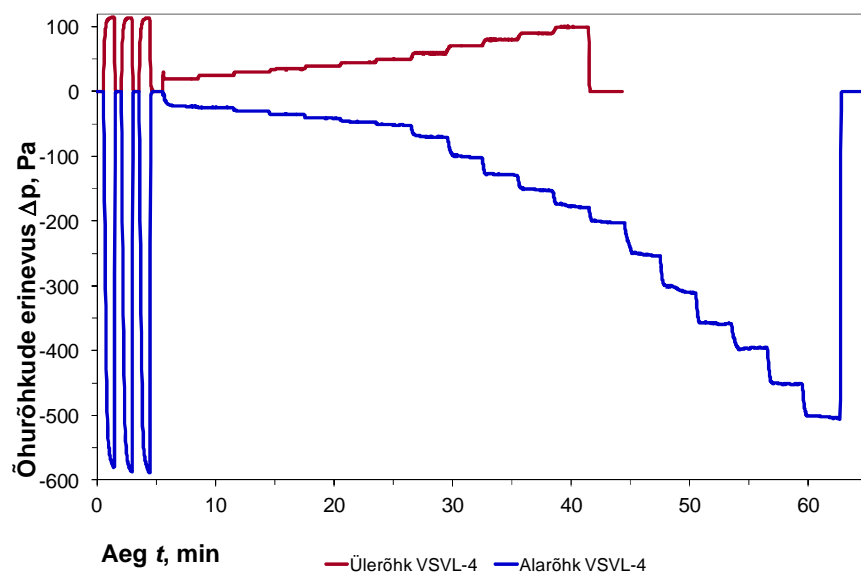
Joonis 4.16 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVL-1 + VSVL-2).

Aurutõkkele vahelaeplaadi all, tuuletõkkekangas ühendamata

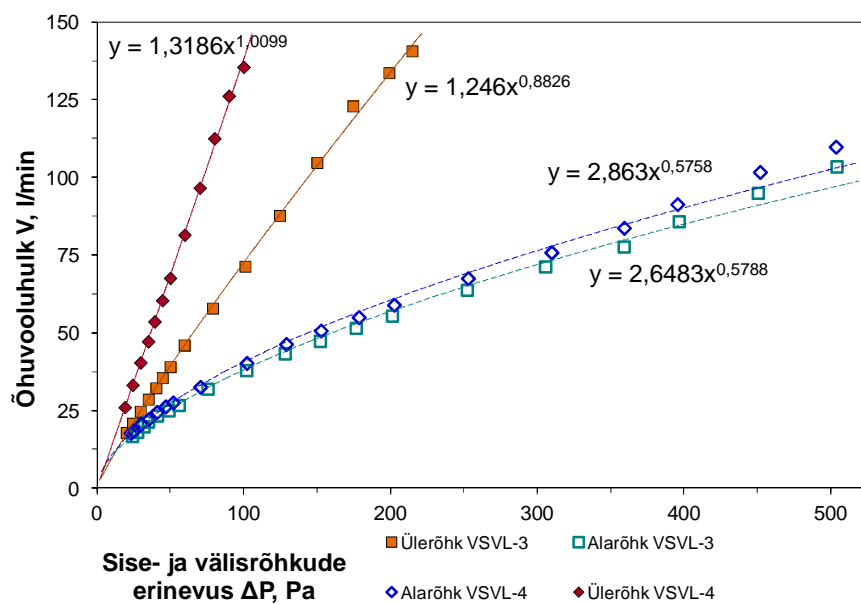


Joonis 4.17 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVL-3).

Aurutökkelile vahelaetalade all, tuuletökkekangas ühendamata



Joonis 4.18 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVL-4).



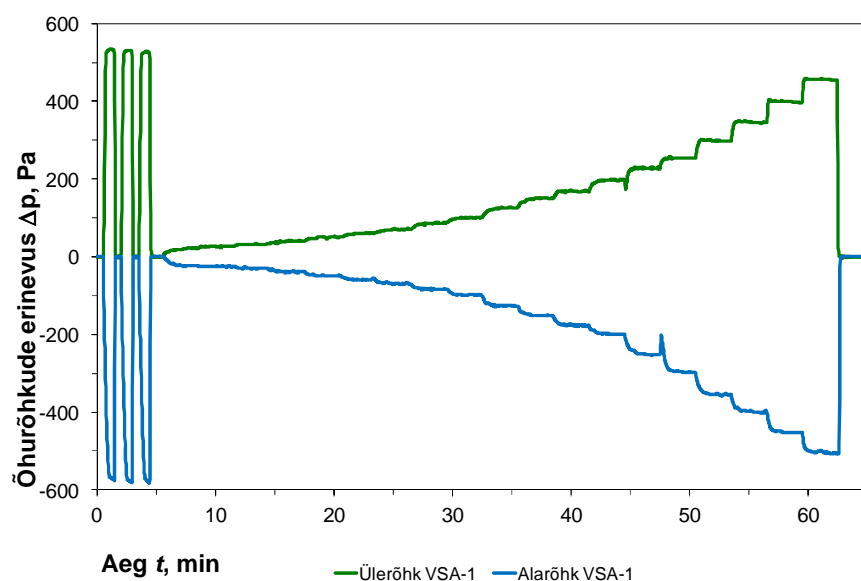
Joonis 4.19 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVL-3 + VSVL-4).

Tabel 4.3 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSVL).

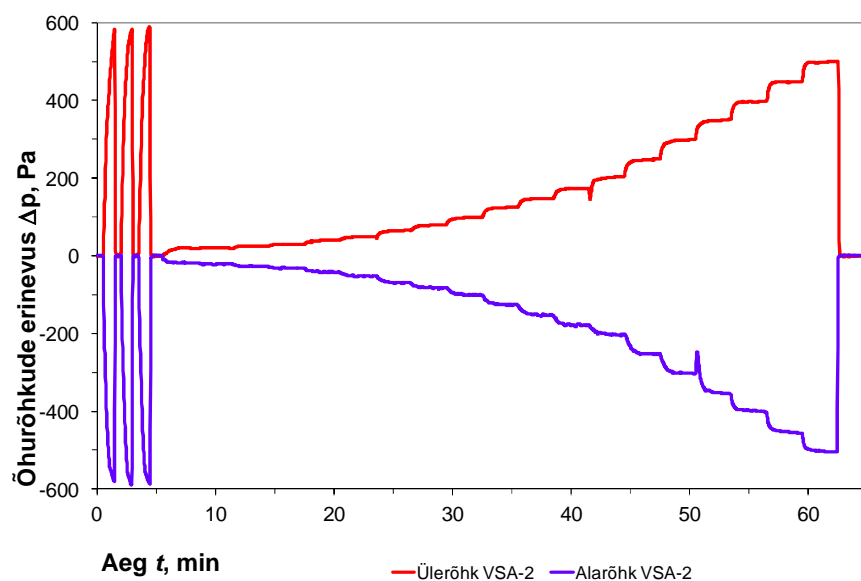
	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVL-1	2,0	2,2	7,6	7,5	0,39	0,83	0,48	0,78
2. VSVL-2	2,2	2,3	8,2	7,5	0,47	0,80	0,55	0,74
3. VSVL-3	7,2	7,6	29,7	19,3	1,25	0,88	2,65	0,58
4. VSVL-4	10,2	7,6	51,8	19,3	1,32	1,01	2,86	0,58

4.1.4 Välisseina ja akna liitekoht

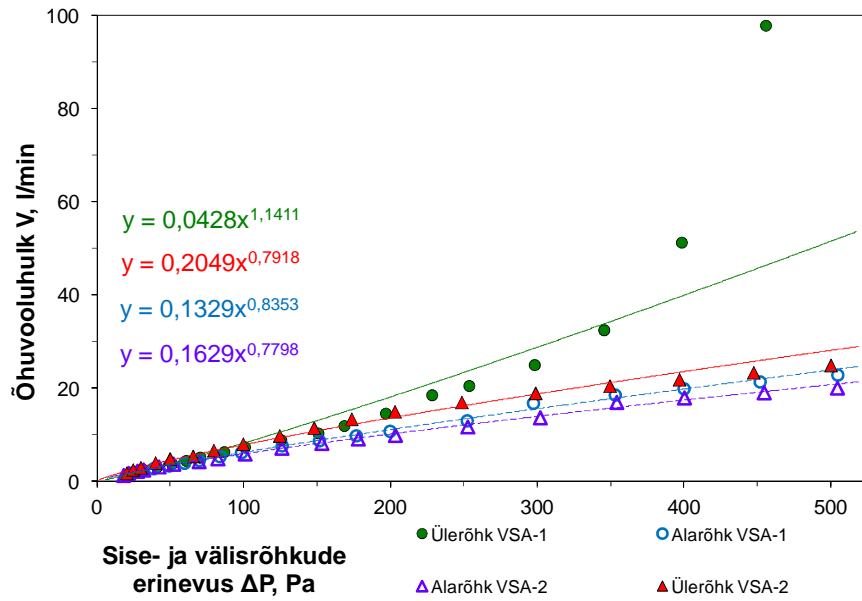
Antud katsekehaga (vt peatükk 3.5.4) viidi läbi mõõtmised kontrollimaks välisseina ja akna liitekohta õhutihedust. Esiteks mõõdeti korrektselt teibitud aknasõlme (VSA-1, vt Joonis 3.14) ning seejärel olukorda, kus aken oli kaetud killega, et eemaldada akna omaleke (VSA-2, vt Joonis 3.15). Lisaks mõõdeti antud konstruktsiooni õhutihedust situatsioonis, kus tuuletõkkekanga teipimine tehases oli vääralt teostatud (VSA-3, vt Joonis 3.16). Katsetulemustest on puudu ülerõhu mõõtmistulemused 500Pa (VSA-1) ja 450-500Pa (VSA-3) juures, kuna ventilaator ei olnud suuteline antud rõhuerinevustele vastavat vooluhulka tekitama. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (4,645m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



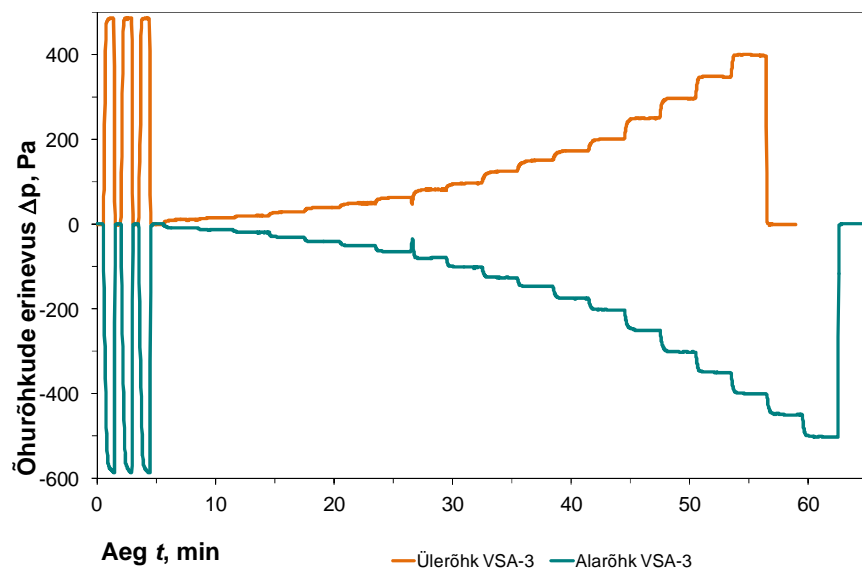
Joonis 4.20 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSA-1).



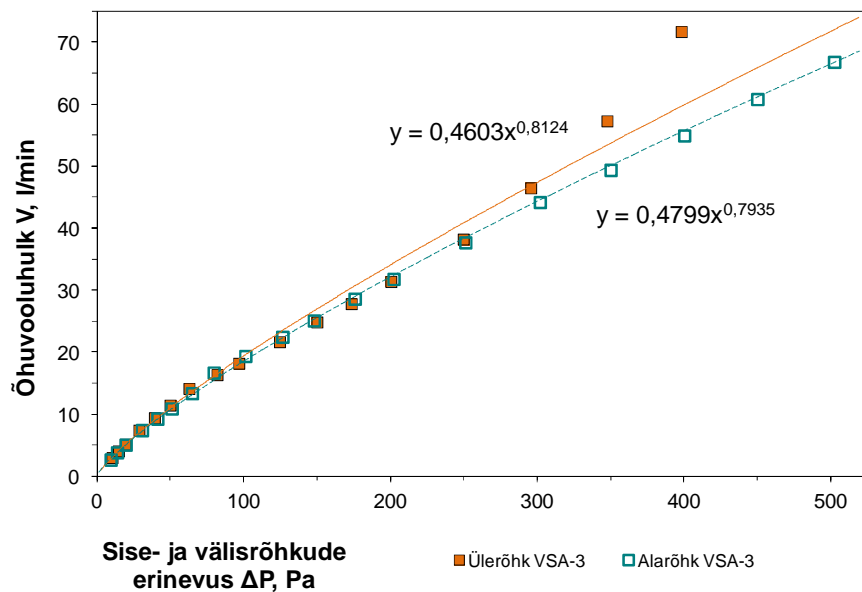
Joonis 4.21 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSA-2).



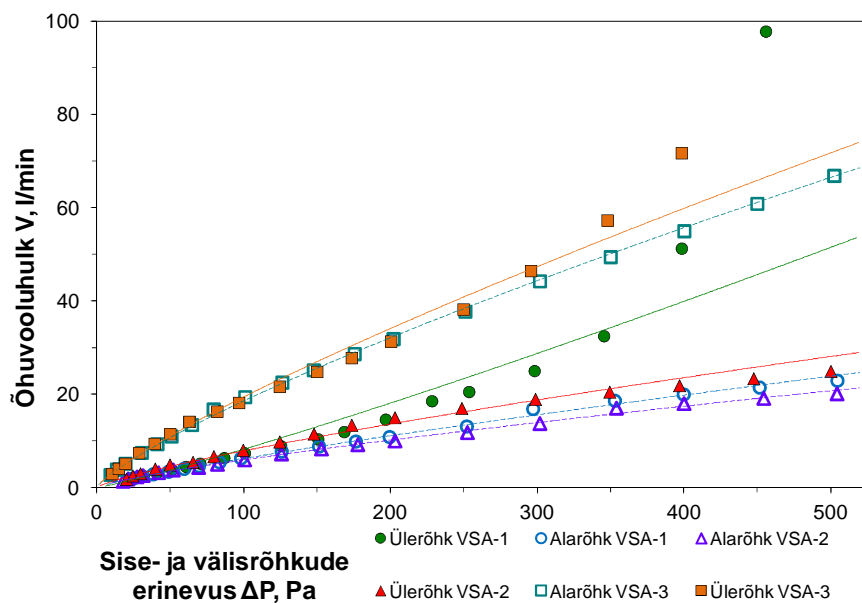
Joonis 4.22 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSA-1 + VSA-2).



Joonis 4.23 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSA-3).



Joonis 4.24 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSA-3).



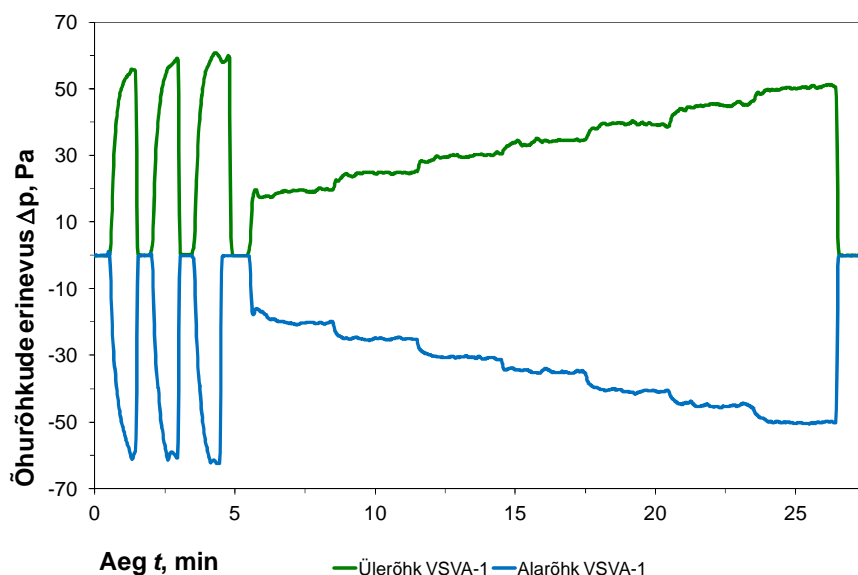
Joonis 4.25 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSA).

Tabel 4.4 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSA).

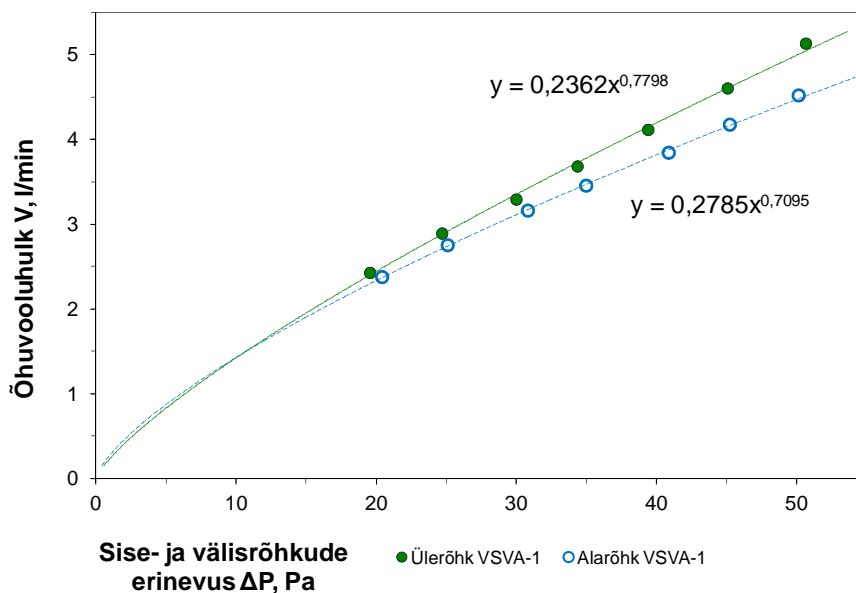
	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSA-1	0,13	0,18	0,80	0,69	0,04	1,14	0,13	0,84
2. VSA-2	0,27	0,21	0,98	0,74	0,20	0,79	0,16	0,78
3. VSA-3	0,64	0,64	2,38	2,30	0,46	0,81	0,48	0,79

4.1.5 Välissein vannitoa kohal

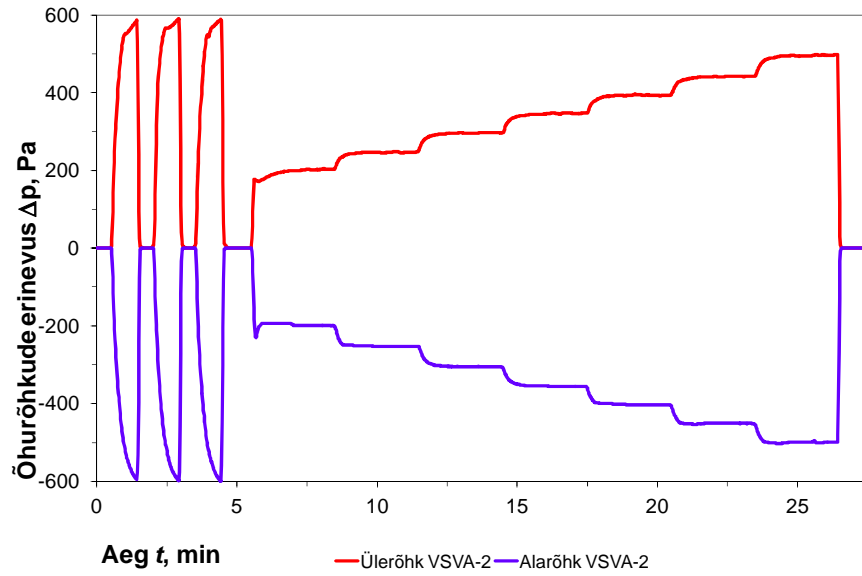
Antud konstruktsiooni (vt peatükk 3.5.5) õhulekke uurimiseks teostati kolm katset, et saada teada välisseina, mille aurutõkketule on katkestatud vannitoa ja tavaruumi vahelise siseseina ühenduse kohal, õhuleket. Mõõtmised teostati rõhuerinevuste tasemetel vahemikes 20...50/-20...-50Pa (VSVA-1), 200..500/-200...-500Pa (VSVA-2) ja 20..500/-20...-500Pa (VSVA-3). Tulemuste analüüs kasutatakse graafikut VSVA-3. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (2,188m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



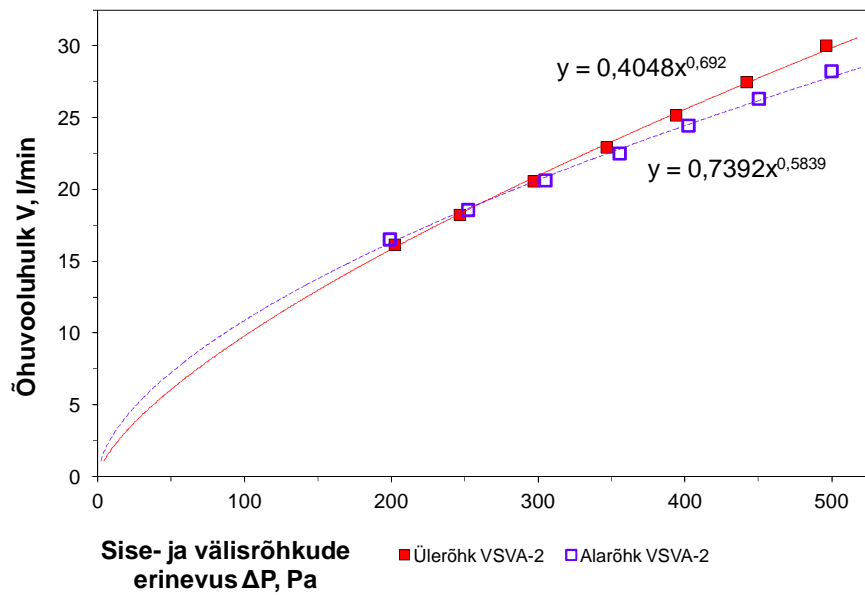
Joonis 4.26 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVA-1).



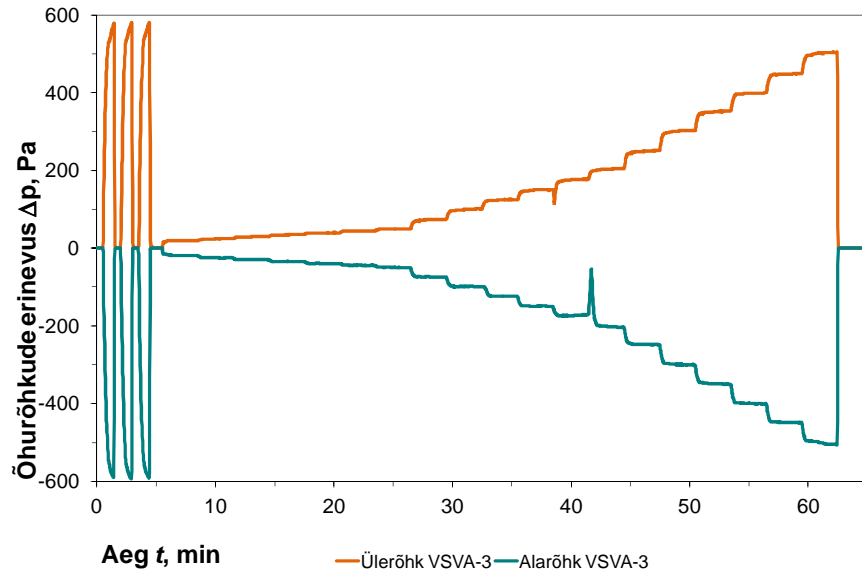
Joonis 4.27 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVA-1).



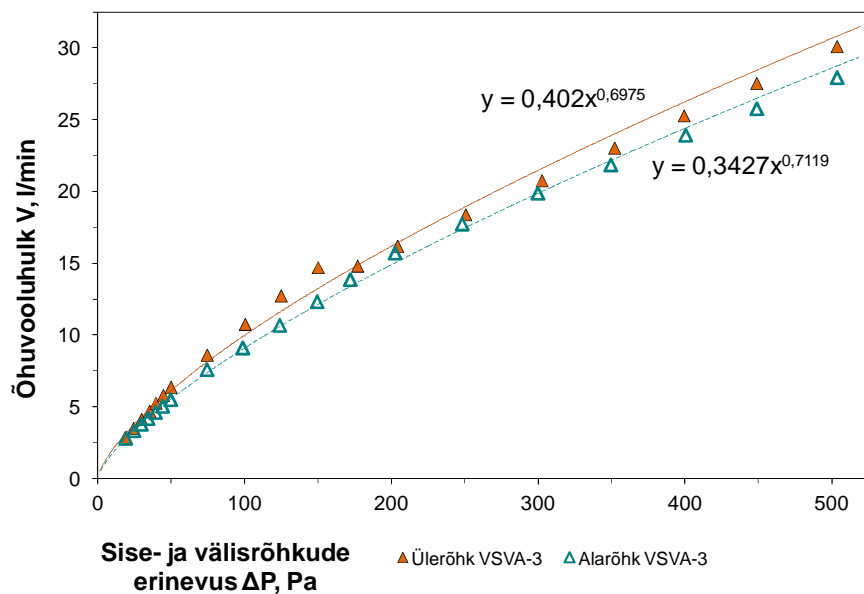
Joonis 4.28 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVA-2).



Joonis 4.29 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVA-2).



Joonis 4.30 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSVA-3).



Joonis 4.31 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSVA-3).

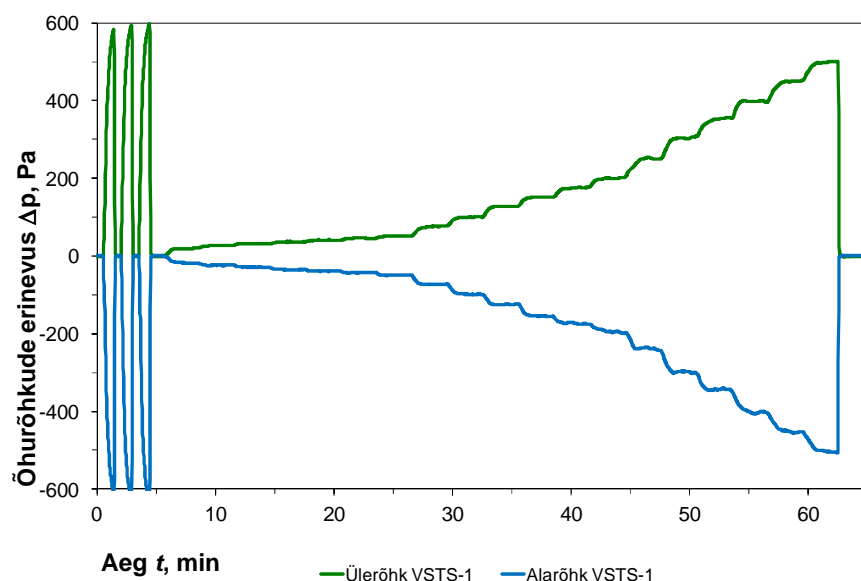
Tabel 4.5 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSVA).

	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVA-1	0,65	0,65	2,28	2,04	0,24	0,78	0,28	0,71
2. VSVA-2	0,91	1,30	2,77	3,32	0,40	0,69	0,74	0,58
3. VSVA-3	0,92	0,81	2,81	2,54	0,40	0,70	0,34	0,71

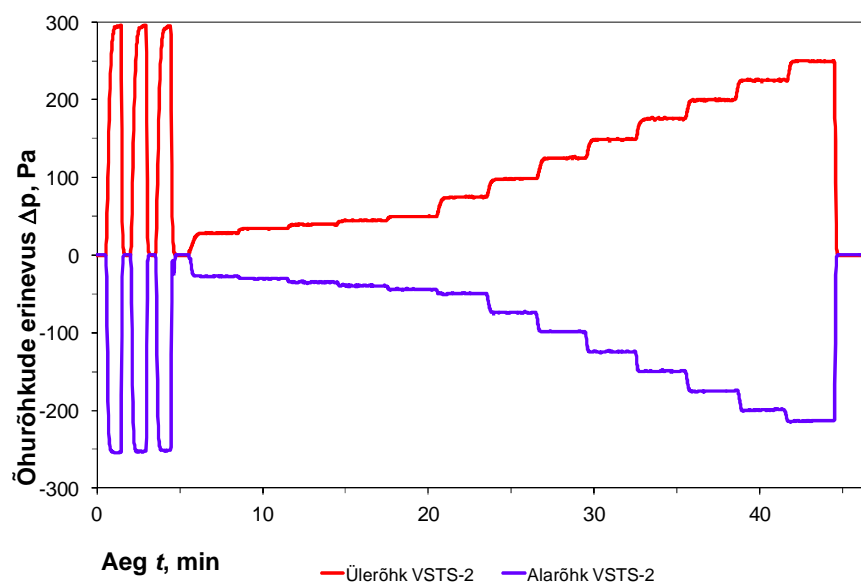
Antud katsekeha mõõtmistulemuste alusel piirde pinnaühikut läbiva vooluhulga suuruseks (VSVA-3) on $q_{50}=2,46/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$, $q_{-50}=1,92/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$, mida kasutatakse reaalse hoone eeldatava õhulekkearvu arvutamisel (vt peatükk 5.1.9).

4.1.6 Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht

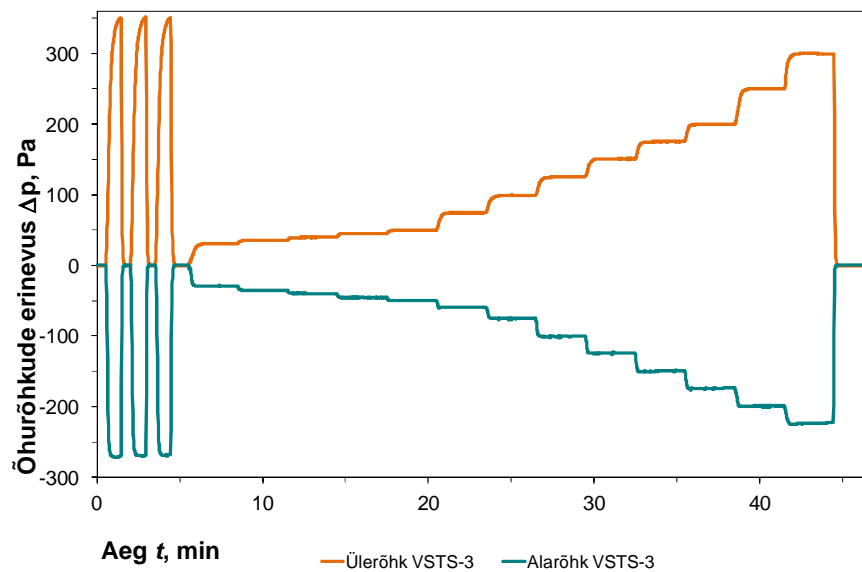
Katse teostati kontrollimaks välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta (vt peatükk 3.5.6) õhuleket ning aurutõkkele kahe erineva asetuse mõju antud liitekohta õhutihedusele. Aurutõkkele mõju paremaks esiletulemiseks mõõdeti mõlemat olukorda situatsioonis, kus tuuletõkkekanas oli nii ühendatud kui ka ühendamata (vt Joonis 3.19). Katsetulemustest on puudu mõõtmistulemused vahemikes 250-500Pa (VSTS-2) ja 250-500Pa (VSTS-3), kuna ventilaator ei olnud suuteline antud rõhuerinevustele vastavat vooluhulka tekitama. Kõik mõõdetud õhulekked jagati läbi liitekohta üldpikkusega (2,188m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



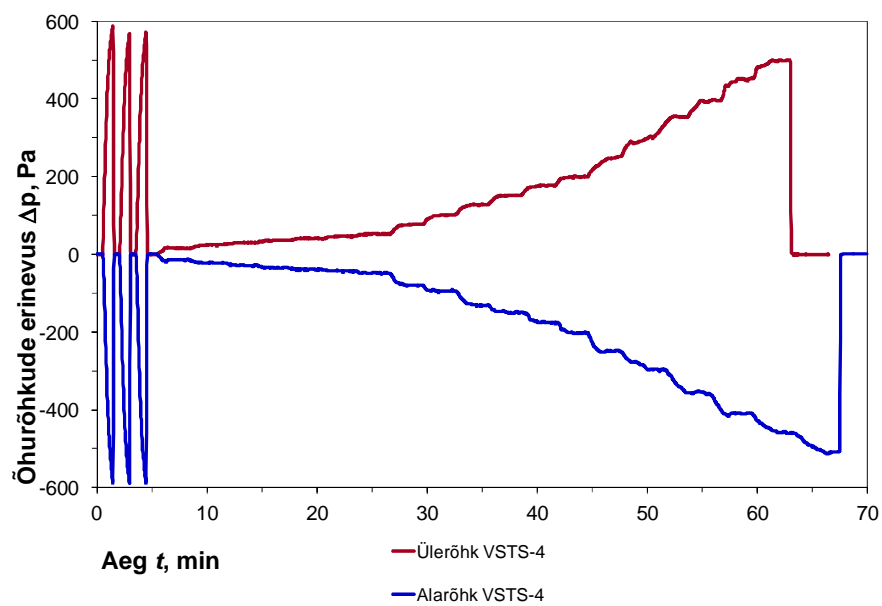
Joonis 4.32 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSTS-1).



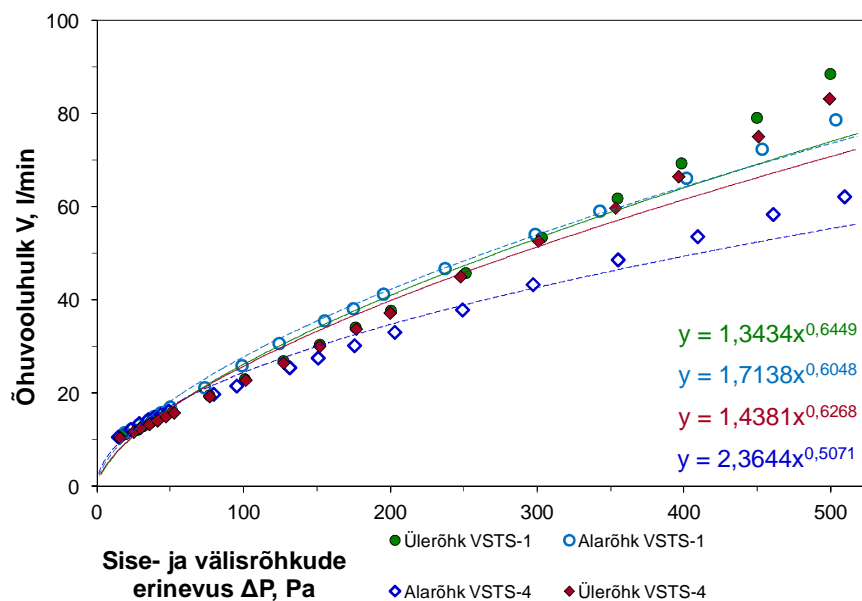
Joonis 4.33 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSTS-2).



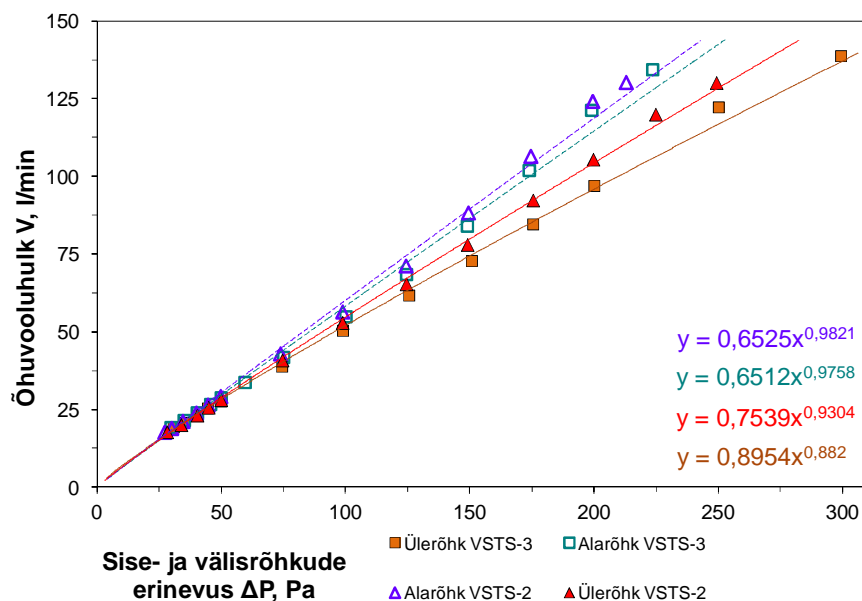
Joonis 4.34 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSTS-3).



Joonis 4.35 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSTS-4).



Joonis 4.36 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures, tuuletõkkekangas ühendatud (VSTS-1 ja VSTS-4).



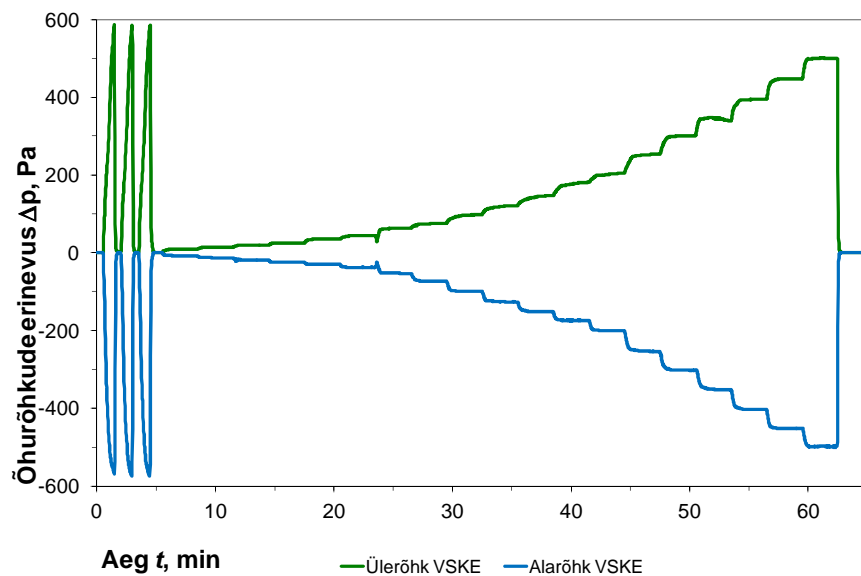
Joonis 4.37 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures, tuuletõkkekangas ühendamata (VSTS-2 ja VSTS-3).

Tabel 4.6 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSTS).

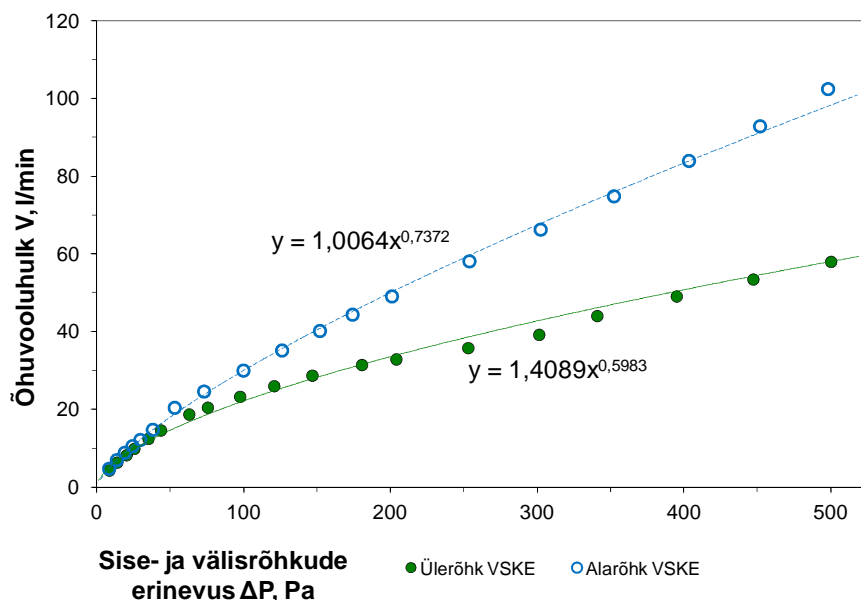
	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSTS-1	2,7	3,2	7,7	8,3	1,34	0,64	1,71	0,60
2. VSTS-2	2,9	2,9	13,1	13,9	0,75	0,93	0,65	0,98
3. VSTS-3	3,1	2,8	12,9	13,5	0,90	0,88	0,65	0,98
4. VSTS-4	2,8	3,5	7,6	7,9	1,44	0,63	2,36	0,51

4.1.7 Välisseina ja katuse liitekoht

Antud katsekeha (vt peatükk 3.5.2) õhulekete uurimiseks viidi läbi üks mõõtmine saamaks teada välisseina ja katuseelemendi liitekohta õhuleket. Mõõtmine teostati rõhuerinevuste tasemetel vahemikes 20..500/-20...-500Pa. Katsetulemust sobib kasutada tulemuste analüüsis. Mõõdetud õhuleke jagati läbi liitekohta üldpikkusega (2,188m), et näidata kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



Joonis 4.38 Õhurõhkude muutus katse ajal (VSKE).



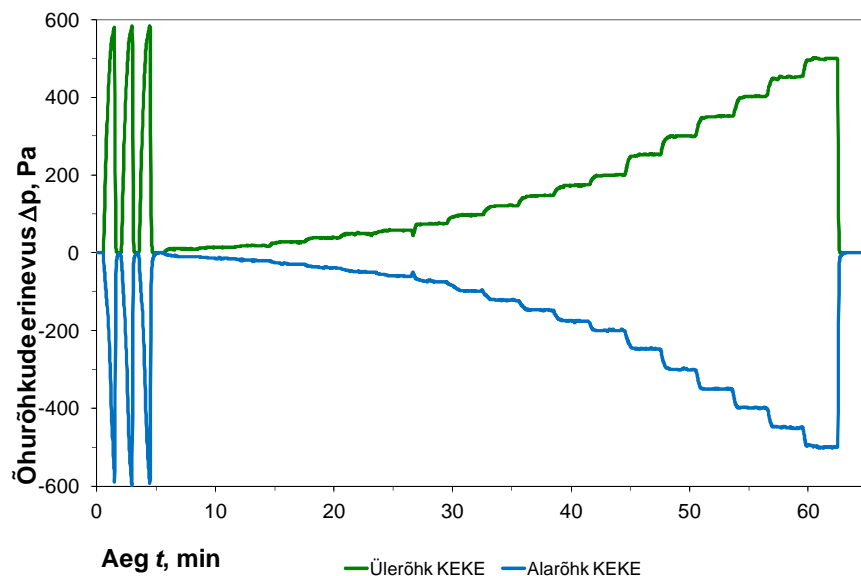
Joonis 4.39 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (VSKE).

Tabel 4.7 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (VSKE).

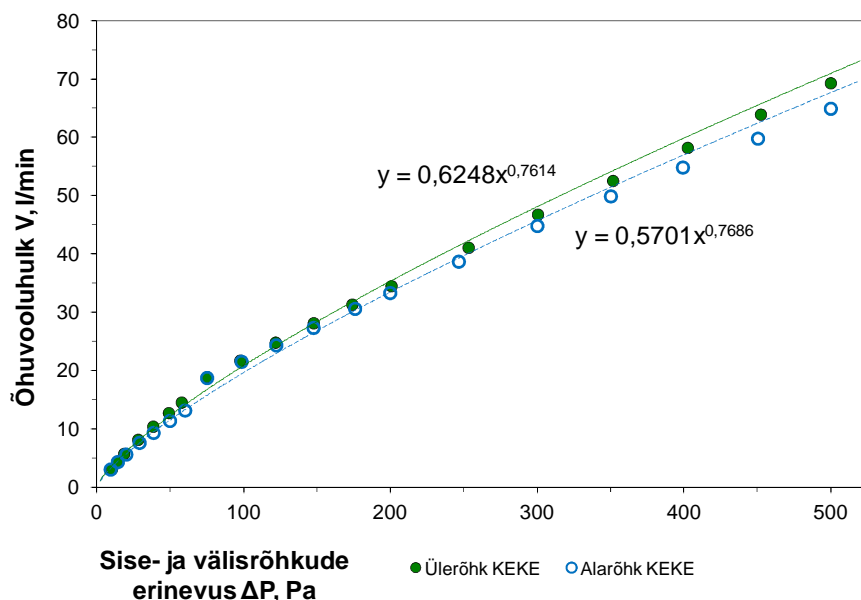
	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSKE	2,6	2,5	6,7	8,2	1,41	0,60	1,01	0,74

4.1.8 Katusehari

Antud katsekeha (vt peatükk 3.5.8) õhulekete uurimiseks viidi läbi üks mõõtmine saamaks teada katuseharja (kahe katuseelemendi liitekoha) õhuleket. Mõõtmine teostati rõhuerinevuste tasemetel vahemikes 20..500/-20...-500Pa. Katsetulemust sobib kasutada tulemuste analüüsis. Mõõdetud õhuleke jagati läbi liitekoha üldpikkusega (2,188m), et näidata, kui palju lekkis õhku ühe meetri pikkuse lõigu kohta.



Joonis 4.40 Õhurõhkude muutus katse ajal (KEKE).



Joonis 4.41 Lekkeõhuvoolu graafikud ühtlustunud väärtuste juures (KEKE).

Tabel 4.8 Hoonepiirete õhulekkearvu iseloomulikud suurused (KEKE).

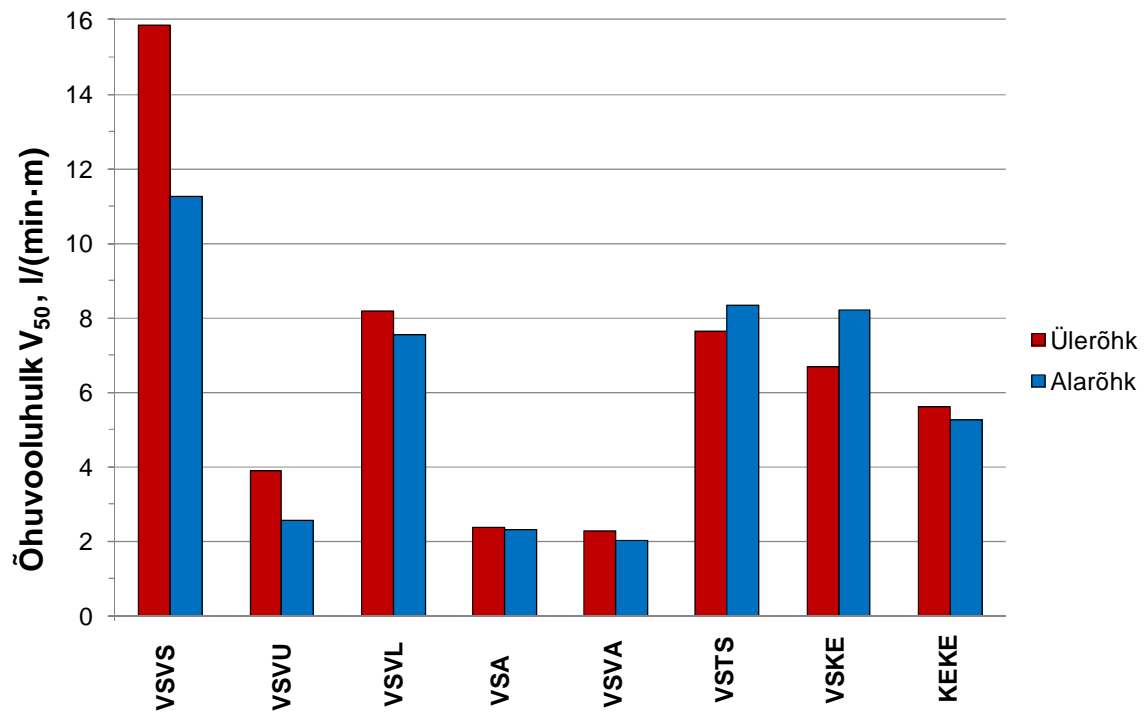
	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. KEKE	1,6	1,5	5,6	5,3	0,62	0,76	0,57	0,77

4.1.9 Laboratoorsete mõõtmistulemuste kokkuvõte

Puitsõrestik välisseina ja naabertarindite liitekohtade õhulekete mõõtmistulemused on kokku võetud Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Õhulekete mõõtmistulemuste koondtabel.

Liitekoht	Õhulekkearv, l/(min·m)				Ülerõhk		Alarõhk	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVS-1	5,8	6,8	24,0	25,3	1,65	0,88	2,23	0,82
2. VSVS-2	4,6	3,6	16,3	11,3	1,69	0,78	1,54	0,71
3. VSVS-3	3,6	3,5	13,5	11,0	1,18	0,82	1,46	0,72
4. VSVS-(2+3)	4,8	3,6	15,9	11,2	1,93	0,74	1,56	0,71
5. VSVU-1	1,21	0,78	4,76	2,75	0,23	0,85	0,17	0,79
6. VSVU-2	0,97	0,69	3,86	2,46	0,18	0,86	0,15	0,79
7. VSVU-3	0,98	0,69	3,92	2,57	0,18	0,86	0,14	0,82
8. VSVL-1	2,0	2,2	7,6	7,5	0,39	0,83	0,48	0,78
9. VSVL-2	2,2	2,3	8,2	7,5	0,47	0,80	0,55	0,74
10. VSVL-3	7,2	7,6	29,7	19,3	1,25	0,88	2,65	0,58
11. VSVL-4	10,2	7,6	51,8	19,3	1,32	1,01	2,86	0,58
12. VSA-1	0,13	0,18	0,80	0,69	0,04	1,14	0,13	0,84
13. VSA-2	0,27	0,21	0,98	0,74	0,20	0,79	0,16	0,78
14. VSA-3	0,64	0,64	2,38	2,30	0,46	0,81	0,48	0,79
15. VSVA-1	0,65	0,65	2,28	2,04	0,24	0,78	0,28	0,71
16. VSVA-2	0,91	1,30	2,77	3,32	0,40	0,69	0,74	0,58
17. VSVA-3	0,92	0,81	2,81	2,54	0,40	0,70	0,34	0,71
18. VSTS-1	2,7	3,2	7,7	8,3	1,34	0,64	1,71	0,60
19. VSTS-2	2,9	2,9	13,1	13,9	0,75	0,93	0,65	0,98
20. VSTS-3	3,1	2,8	12,9	13,5	0,90	0,88	0,65	0,98
21. VSTS-4	2,8	3,5	7,6	7,9	1,44	0,63	2,36	0,51
22. VSKE	2,6	2,5	6,7	8,2	1,41	0,60	1,01	0,74
23. KEKE	1,6	1,5	5,6	5,3	0,62	0,76	0,57	0,77



Joonis 4.42 Mõõdetud liitekohtade õhulekked 50Pa suuruse rõhuerinevuse juures

5 Tulemuste hindamine

5.1.1 Välisseina välisnurk

Kahe välisseinaelemendi liitekohta (VSVS) mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 4.1). Esimese katse (VSVS-1) puhul oli tegemist olukorraga, kus tuuletõkkekangas oli katsekambri seinte külge ühendamata (vt Joonis 3.7). Mõõtmistulemustest (vt Joonis 4.2) on näha, et lekkegraafikud on peaaegu lineaarsed, mis omakorda osutab laminaarsele voolamisele. Laminaarsele voolamisele viitavad ka õhuvoolu eksponendid, mis on nii üle- kui ka alarõhu puhul lähedal ühele.

Teise ja kolmanda mõõtmise (VSVS-2, VSVS-3) puhul oli tuuletõkkekangas katsekambri seinte külge ühendatud (vt Joonis 3.8). Mõõtmistulemused näitavad väiksemaid lekkeid võrreldes esimese mõõtmisega (VSVS-1) ja suuremaid lekkeid positiivse rõhuerinevuse korral võrreldes negatiivse rõhuerinevusega. Selle põhjuseks võib välja tuua õhutihedate membraanide erinevad asendid muude konstruktsioonide suhtes. Ülerõhu korral puhutakse tuuletõkkekangast tuuletõkkeplaadist eemale, alarõhu korral imetakse kangas vastu plaati ning see aitab ebatihedaid kohti sulgeda. Aurutõkkekile seda erinevust ei põhjusta, kuna kile taga plaatmaterjal puudub. Visuaalselt leitud lekkekohad esinesid tuuletõkkekangaste ühendamiseks kasutatud roovi ja muu roovitise all. Lekkekohti põhjustavad augud, mis tekivad läbi tuuletõkkekihi roovide kinnitamisest elemendi külge. Tekkinud avadest pääseb õhk liikuma, sest tänu roovide kõverusele või kinnitusvahendite liiga suurele sammule ei ole roov kogu ulatuses tihedalt alumise materjali vastas. Lekkegraafikute õhuvoolude eksponendid (vt Joonis 4.7) on üle- ja alarõhu korral peaaegu võrdsed, seega antud liitekohta puhul ei olene lekkekohtade kogus ja suurus õhurõhu suunast.

Võrreldes tulemusi kõigi teiste mõõdetud liitekohtadega olid kahe välisseina liitekohta õhulekked kõige suuremad ning üle- ja alarõhu puhul erinesid lekkevoolud kõige rohkem. Teistest liitekohtadest kehvemad õhupidavust põhjustab tõenäoliselt ebakvaliteetne montaažitöö ehk ebapiisava PE-kile ja tuuletõkkekangaste ühenduste tihendamine. Kirjanduses leitud tulemustega on VSVS lekkeid raske võrrelda, kuna leitud tulemuste saavutamiseks oli kasutatud erinevaid materjale või olid andmed puudulikud. Antud liitekohta madala õhulekke saavutamiseks tuleb suurt tähelepanu pöörata aurutõkkekile ja tuuletõkkekanga ühenduste korrektsele tihendamisele.

5.1.2 Välisseina ja sokli liitekoht

Erinevate välisseina ja sokli liitekohta mõõtmistulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 4.2). Esimese katse (VSVU-1) puhul oli tegemist olukorraga, kus välisseina tuuletõkkekangas ja sipepuumembraani tuuletõkkeosa olid liistuga ühendatud, kuid aurutõkkekile ühendus vundamendiga teostamata (vt Joonis 3.9). Mõõtmistulemused näitavad suuremaid lekkeid negatiivse rõhuerinevuse korral võrreldes positiivse rõhuerinevusega. Seda põhjustab õhutihedate membraanide erinevad asendid muude konstruktsioonide suhtes (vt peatükk 5.1.1).

Teise mõõtmise (VSVU-2) jaoks teibiti välisseina aurutõkkekile katsekambri põranda külge (vt Joonis 3.9). Mõõtmistulemustest (vt Tabel 4.2) selgub, et negatiivse rõhuerinevuse korral avaldab aurutõkkekile teipimine põranda külge väikest mõju, ülerõhu korral on aga PE-kile ühenduse mõju selgelt märgata. Sarnaselt esimesele mõõtmisele (VSVU-1) olid ka selle mõõtmise lekkesid alarõhu korral väiksemad kui ülerõhul.

Kolmanda välisseina ja sokli liitekohta mõõtmise jaoks asendati tuuletõkkekanga ja Svillemembran-i kangaosa ühendusliist teibiga Siga Wigluv (vt Joonis 3.9).

Mõõtmistulemuste alusel saab öelda, et sidepuumembraani ja tuuletõkkekanga ühendusviisist välisseina ja sokli liitekohta lekkeõhuvool ei sõltu (vt Tabel 4.2).

Antud liitekohta suitsumasina testides olid leitud lekkekohaks betoonploki ja sidepuu ühenduskoht, kus leket võis põhjustada vundamendi ebatasasus või sidepuu kõverus. Võrreldes ülejäänud mõõtetud liitekohtadega võib antud katsekeha õhulekkeid lugeda väikesteks.

Kui mitte arvestada vundamendile rakendatud koormust, siis käesoleva uuringu tulemusi saab võrrelda Norras läbi viidud mõõtmiste (Relander, Heiskel jt, 2011) tulemustega. Antud katsekeha esimese mõõtmise tulemused (PE-kile ei olnud vundamendi külge ühendatud, VSVU-1) on veidi suuremad ($\dot{V}_{50} = 3,8l / (\text{min} \cdot m)$), kui Relander-i omad (vastavalt), vt Tabel 2.4), kus liitekohta tihendamiseks oli kasutatud villasukka ja sidepuumembraani. Seda saab seletada asjaoluga, et käesolevas uuringus ei olnud võimalik rakendada vundamendile koormust, mida Relander-i ekperimentides tehti. Relanderi- mõõtmistulemustest on näha, et suuremad koormused põhjustavad väiksemaid lekkeid (vt Tabel 2.4). Olukorras, kus PE-kile kile oli vundamendi külge teibitud (VSVU-2, VSVU-3), olid lekkesid väiksemad (mõlemal juhul $\dot{V}_{50} = 3,2l / (\text{min} \cdot m)$), vt Tabel 4.2) kõigist kirjandusest leitud tulemustest.

Võrdlus Sandberg-i (Sandberg jt, 2004 ja 2007) tulemustega on raskendatud, kuna nii koormus kui ka vundamendi pinna tasasus on erinevalt defineeritud. Samuti on liitekohta tihendamiseks kasutatud erinevaid materjale.

Välisseina ja sokli liitekohta juures on selgelt näha õhulekke sõltuvus auru- ja õhutõkkele korrektsest ühendamisest vundamendiga. Vääralt teostatud aurutõkkele ühendus põhjustab ülerõhu korral suuremat õhu mahuvoolu kui korrektselt teostatud liide. Kirjandusest leitud tulemustest nähtub, et vundamendi tasapinnalisusel on oluline mõju antud liite õhulekkele.

5.1.3 Välisseina ja vahelae liitekoht

Erinevad välisseina ja vahelae liitekohta (VSVL) mõõtmistulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 4.3). Esimese katse (VSVL-1) puhul oli tegemist korrektselt tihendatud sõlmega (vt Joonis 3.11a), mida varem kasutati AS-i Matek poolt toodetud elementmajade püstitamisel. Mõõtmistulemustest (vt Tabel 4.3) on näha, et negatiivse rõhuerinevuse korral on õhulekked väiksemad kui positiivsel rõhuerinevusel. Seda põhjustab tuuletõkkekanga ja aurutõkkele erinevad asendid muude konstruktsioonide suhtes (vt peatükk 5.1.1). Üldiselt on antud liitekohta lekkesid üle- ja alarõhu korral samas suurusjärgus.

Teise mõõtmise jaoks antud liitekohaga (VSVL-2) teibiti alumise välisseina aurutõkkele vahelaepaadil alla ja vahelaetalade külge (vt Joonis 3.11b). Lekkegraafikult (vt Joonis 4.16) on näha, et võrreldes eelmise mõõdetud variandiga (VSVL-1), on lekkevoolud veidi vähenenud, samas tabeli (vt Tabel 4.3) järgi on lekkesid samad või hoopis suuremad. Väiksele lekkeõhuvoolu vähenemisele viitavad ka õhuvoolu eksponentide vähenemised (vt Joonis 4.16). Üle- ja alarõhu lekkegraafikud erinevad üksteisest veidi rohkem kui esimesel mõõtmisel.

Kolmanda mõõtmise (VSVL-3) jaoks avati tuuletõkkekanga ühenduskoht (vt Joonis 3.11c). Tulemustest (vt Tabel 4.3) selgub, et lekkesid on oluliselt suuremad võrreldes esimeste mõõtmistega (VSVL-1, VSVL-2). Suurenenud lekkesid on näha lekkegraafikult (vt Joonis 4.19), kus lekkegraafikud on oluliselt järsema tõusunurgaga kui esimestel mõõtmisel (VSVL-1, VSVL-2). VSVL-3 ülerõhu lekkegraafik on peaaegu lineaarne, mis omakorda osutab laminaarsele voolamisele. Laminaarsele voolamisele viitab ka õhuvoolu eksponent, mis on ülerõhu puhul ~ 1 . Antud liitekohta üle- ja alarõhu lekkegraafikute suurt erinevust põhjustab lahtine tuuletõkkekangas, mis alarõhu korral

imetakse vastu tuuletõkkeplaati ja sulgeb lekkekohad, ülerõhu puhul aga surutakse plaadist eemale. Õhulekked olid lihtsalt tajutavad tuuletõkkeplaadi vuukide kohal.

Neljanda katsetamise (VSVL-4) jaoks ühendati välisseinte aurutõkkekile vahelaeplaadi küljest lahti ja keerati vahelaetalade alla (vt Joonis 3.11d). Võrreldes eelmise mõõtmisega (VSVL-3) suurenesid õhulekked alarõhu puhul väga vähe, ülerõhu korral aga oluliselt (vt Joonis 4.19). Ülerõhu puhul on lekkegraafik enam-vähem lineaarne ja õhuvoolu eksponent on >1 , mis viitab katse käigus lekkekoha geomeetria suurenemisele. Lekete suurused olid suured ja tajutavad tuuletõkkeplaadi vuukide kohal.

Võrdlus Norras läbiviidud uuringuga (Relander, Bauwens jt, 2011) on võimalik, kuna testitud konstruktsioonid ja materjalid olid väga sarnased. Kuigi Relander testis ainult üht õhkupidavat kihti korraga, olid tema mõõtmistulemused väiksemad. Ainult antud uuringu mõõtmistulemus olukorras, kus PE-kile oli vahelaetalade all (VSVL-1), oli Relander-i tulemustest (PE-kile vahelaetalade ulatuses katkestatud) väiksem ($\dot{V}_{50} = 7,6l / (\text{min} \cdot m) < \dot{V}_{50} = 9,8l / (\text{min} \cdot m)$). Sedagi seetõttu, et VSVL-1 puhul oli tuuletõkkekangas ühendatud. Relanderi tulemustest on näha, et teipides PE-kile vahelatalade ja vahelaeplaadi külge, vähenes õhuleke peaaegu 3 korda, antud mõõtmiste puhul oli PE-kile talade ja vahelaeplaadi külge teipimise mõju väga väike.

Välisseina ja vahelae liitekohta juures on selgelt näha õhulekke sõltuvus tuuletõkkekanga ühendamisest. Korrektselt ühendatud tuuletõkkekanga korral avaldab välisseinte aurutõkkekile teipimine vahelaeplaadi ja vahelaetalade külge liitekohta õhupidavusele väikest mõju. Aurutõkkekile teipimise mõju vahelaeplaadi alla tuleb esile positiivse rõhuerinevuse korral kui tuuletõkkekangas on ühendamata. Aurutõkkekile ühendamine on siiski oluline takistamiseks niiske siseõhu konvektsiooni hoonepiirdesse.

5.1.4 Välisseina ja akna liitekoht

Erinevad välisseina ja akna liitekohta mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt

Tabel 4.4). Esimese katse (VSA-1) puhul oli tegemist korrektselt tihendatud aknasõlmega. Mõõtmistulemustest (vt Tabel 4.4) on näha, kuidas madalate rõhuerinevuste korral on õhulekked samas suurusjärgus. Rõhuerinevuse suurenedes kasvavad ülerõhu korral lekkevoolud kiiremini, alates 300Pa suurusest rõhuerinevusest lausa hüppeliselt. See on seletatav sellega, et ülerõhk hakkab väljapoole avanevat akent lahti lükkama. Sellele viitab ka õhuvoolu eksponent, mis antud mõõtmise puhul oli suurem kui 1 ($n=1,1411$).

Teise mõõtmise (VSA-2) jaoks kaeti aken kilega ja teibiti kinni, et kõrvaldada tulemustest akna omaleke. Mõõtmistulemustest (vt Joonis 4.25) selgub, et madalate rõhuerinevuste korral akna omaleke välisseina ja akna liitekohta lekkele erilist mõju ei avalda. Ülerõhu korral on alates 100Pa rõhuerinevusest märgata õhulekete vähenemist võrreldes esimese mõõtmisega. Teise mõõtmise alarõhukatse tulemused jäid samasse suurusjärku esimese mõõtmise tulemustega. Kahe esimese mõõtmise puhul (VSA-1 ja VSA-2) oli väga väikseid lekkeid võimalik tuvastada kompimise teel teibitud akende nurkades. Kuna nurkade tihendamine ja teipimine on keeruline (vt Joonis 3.14), siis tuleb akende paigaldamisel neile erilist tähelepanu pöörata.

Kolmandaks akna ja välisseina liitekohta mõõtmiseks teibiti tehases aknasõlme vääralt (VSA-3). Nagu näha tabelist (vt

Tabel 4.4), suurendas ebakorrektnete teipimise liite õhuleket võrreldes eelnevate mõõtmistega üle kahe korra. Suurenenud õhuleket oli võimalik suitsumasina testides näha, kui aknalengi alumiiniumprofiilide alt imbus suits välisruumi. Eelnevate mõõtmiste puhul ei olnud lekkekohti suitsumasina testides võimalik märgata. Katsetulemustest on

näha (vt Joonis 4.24), et üle- ja alarõhu korral on õhulekked peaaegu samad, alates 250Pa suurusest rõhuerinevusest kasvavad lekkevoolud ülerõhu puhul kiiremini. See on seletatav akna lahtipressimisega nagu ka esimese mõõtmise puhul.

Kõigi kolme mõõtmise tulemused näitavad suuremaid lekkeid positiivse rõhuerinevuse korral võrreldes negatiivse rõhuerinevusega. Selle põhjusena võib välja tuua lisaks akna lahtisurumisele õhutihedate membraanide erinevad asendid muude konstruktsioonide suhtes (vt peatükk 5.1.1). Võrreldes tulemusi kõigi teiste mõõdetud liitekohtadega, olid välisseina-akna liitekohta õhulekked kõige väiksemad. Kõrvutades tulemusi mujal tehtud uuringutega on näha, et tellisseina ja akna liitekohta väiksematest tulemustest (Van Den Bossche jt, 2012) ja enamikest Norras (Relander jt, 2008) tehtud mõõtmistest (välja arvatud liitekohta tihendamise teibiga), on käesolevad uuringu õhulekked väiksemad.

Antud liitekohta juures on selgelt näha õhulekke sõltuvus teipimise kvaliteedist. Ebakorrektselt tihendatud liite korral on näha suur õhulekke. Korrektselt teibitud akna ja välisseina liitekohta tagab madala õhulekke.

5.1.5 Välissein vannitoa kohal

Antud katsekeha (VSVA) mõõtmistulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 4.5). Tulemused näitavad, et võrreldes negatiivse rõhuerinevusega on positiivse rõhuerinevuse juures õhulekked suuremad. Lekkegraafikute õhuvoolude eksponendid (vt Joonis 4.31) on üle- ja alarõhu korral peaaegu võrdsed, seega antud liitekohta puhul ei olene lekkekohtade kogus ja suurus õhurõhu suunast. Võrreldes teiste mõõdetud liitekohtadega võib antud katsekeha õhulekkeid lugeda väikesteks. Aja möödudes võib VSVA liitekohta õhupidavus väheneda, kuna on oht prao tekkimiseks välisseina ja siseseina ühenuskoha niiskustõkkeksesse.

Kompamise teel leitud lekkekohad esinesid roovitise all. Lekkekohtade esinemist põhjustavad samad põhjused kui VSVS puhul (vt peatükk 5.1.1).

5.1.6 Välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta

Erinevate välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta (VSTS) mõõtmistulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 4.6). Esimese katse (VSTS-1) puhul oli tegemist korrektselt tihendatud sõlmega (vt Joonis 3.19a), mida hetkel kasutatakse ASi Matek poolt toodetud elementmajade püstitamisel. Mõõtmistulemustest (vt Joonis 4.36) on näha, kuidas madalate rõhuerinevuste korral on õhulekked ülerõhu puhul väiksemad kui alarõhu, suurte rõhkude korral vastupidi. Üldiselt on antud liitekohta lekkes üle- ja alarõhu korral samas suurusjärgus. Antud liitekohta lekkes ei ole oluliselt väiksemad juhul kui õhutihe membraan surutakse plaatmaterjali vastu. VSTS korral on selleks alarõhu olukord, kus tuuletõkkekanas imetakse tuuletõkkeplaadi vastu. Sellest saab järeldada, et tuuletõkkekanas esinevad lekkekohad, milleks suure tõenäosusega on ebatihedused kangaste ühenduskohas ja lekkes roovide all (vt peatükk 5.1.1).

Teise mõõtmise (VSTS-2) jaoks avati tuuletõkkekanaga ühenduskohta ja teibiti kanga servad tuuletõkkeplaadi külge (vt Joonis 3.19b). Tulemustest (vt Tabel 4.6) selgub, et lekkes on oluliselt suuremad võrreldes esimese mõõtmisega (VSTS-1). Suurenenud lekkes on näha lekkegraafikul (vt Joonis 4.37), kus lekkegraafik on oluliselt järsema tõusunurgaga kui esimesel mõõtmisel (VSTS-1) ja peaaegu lineaarne, mis omakorda osutab laminaarsele voolamisele. Laminaarsele voolamisele viitavad ka õhuvoolu eksponendid, mis on nii üle- kui ka alarõhu puhul ~1. Õhulekked olid kergelt tajutavad tuuletõkkeplaadi vuukide kohal.

Kolmanda katsetamise (VSTS-3) jaoks ühendati välisseinte aurutõkkele (vt Joonis 3.19c). Võrreldes eelmise mõõtmisega (VSTS-2) vähenesid õhulekked väga vähe.

Alarõhu puhul on lekkegraafik (vt Joonis 4.37) peaaegu lineaarne ja õhuvoolu eksponent ~ 1 (suured lekkekohad, laminaarne voolamine). Ülerõhu korral võib täheldada veidi suuremat lekke vähenemist kui alarõhu korral. Samuti on vähenenud õhuvoolu eksponent, mis osutab lekkekohtade arvu ja suuruse vähenemisele. Lekete suurused olid endiselt suured ja tajutavad tuuletõkkeplaadi vuukide kohal.

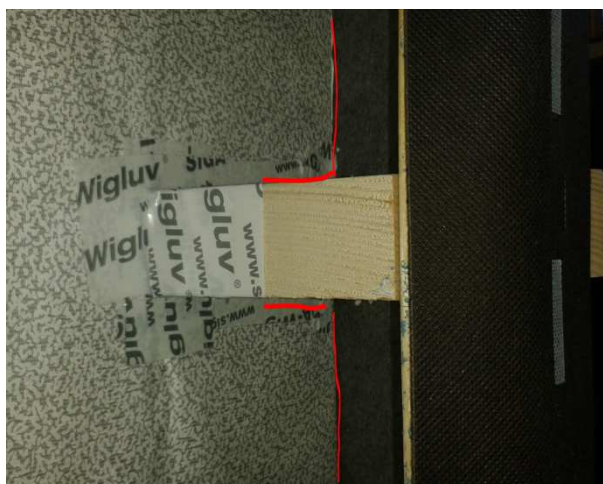
Antud liitekohta viimase katsetamise (VSTS-4) jaoks suleti tuuletõkkekangas (vt Joonis 3.19d). Mõõtmistulemustest (vt Joonis 4.36) on näha, kuidas madalate rõhuerinevuste korral on õhulekked ülerõhu puhul väiksemad kui alarõhul, suurte rõhkude korral vastupidi. Lekked olid veidi väiksemad kui VSTS-1 mõõtmisel ja oluliselt väiksemad kui VSTS-2 ja VSTS-3 puhul (vt Tabel 4.6).

Välisseina ja korterite vahelise seina liitekohta juures on selgelt näha õhulekke sõltuvus tuuletõkkekanga ühendamisest. Analoogselt välisseina ja vahelae liitekohale (VSVL), avaldab antud sõlmahenduse korral välisseinte aurutõkkele ühendamine korterite vahelise seina mahus liitekohta õhupidavusele väikest mõju. Aurutõkkele ühendamine on siiski oluline takistamiseks niiske siseõhu konvektsiooni hoonepiirdesse.

5.1.7 Välisseina ja katuse liitekoht

Välisseina ja katuseelemendi liitekohta (VSKE) mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis (vt Tabel 4.7). Mõõtmistulemused näitavad suuremaid lekkeid negatiivse rõhuerinevuse korral võrreldes positiivse rõhuerinevusega. Alarõhu korral puhutakse katuse aluskatet katusest ja välisseina tuuletõkkakangast tuuletõkkeplaadist eemale, aurutõkkekilet surutakse samal ajal aga katuseplaadi vastu. Ülerõhu puhul on olukord vastupidine. Nagu näha ka graafikult (vt Joonis 4.39) on madalate rõhuerinevuste juures lekkevool üle- ja alarõhu korral samas suurusjärgus. Alates 50Pa suurusest rõhuerinevusest kasvavad lekked alarõhu puhul kiiremini. Suurematele leketele alarõhu korral viitab ka õhuvoolu eksponent, mis on suurem ülerõhu omast ($0,737 > 0,598$, vt Joonis 4.39).

Ülerõhu olukorras olid suitsumasinaga testides leitud lekkekohtadeks seina tuuletõkkekanga ühendus sarikaga ja tuuletõkkekanga ja katuse aluskatte ühendus.



Joonis 5.1 Tuuletõkkekanga teipimine sarika külge ja lekkekohad (punasega).

Kõrvutades Kalamees-i (Kalamees ja Kurnitski, 2008) uuringu kõige tihedama konstruktsiooni tulemust antud uuringu tulemusega on näha, et lekete suurused on samad ($\dot{V}_{10} = 2,5 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m})$). Võrdlus Sandbergi (Sandberg jt, 2004 ja 2007) uuringutega on raskendatud, kuna testiti erinevaid materjale ja konstruktsioone.

Mõõtmistulemustest saab järeldada, et antud liitekohta õhupidavusele avaldab suuremat mõju auru- ja õhutõkkele. Kogu liitekohta madala õhulekke tagamiseks tuleb suurt tähelepanu pöörata tuuletõkkekanga teipimisele katusesarikate külge ning seinatuuletõkkekanga ja katuse aluskatte ühendamisele.

5.1.8 Katusehari

Kahe katuseelemendi liitekohta (KEKE) mõõtmistulemused on esitatud tabelis (vt Tabel 4.8). Mõõtmistulemused näitavad veidi suuremaid lekkeid ülerõhu korral võrreldes alarõhuga. Erinevalt teistest mõõdetud liitekohtadest ei ole antud liitekohta lekkesid väiksemad juhul kui õhutihe membraan surutakse plaatmaterjali vastu. KEKE korral on selleks ülerõhu olukord, kus aurutõkkele vajutatakse õhu poolt OSB/3 plaadi vastu. Sellest võib järeldada, et aurutõkkele esinevad lekkekohad, milleks suure tõenäosusega on ebatihedused aurutõkkele ühendustes harjatala juures.

Lekkegraafikute õhuvoolude eksponendid (vt Joonis 4.41) on üle- ja alarõhu korral peaaegu võrdsed, seega antud liitekohta puhul ei olene lekkekohtade hulk ja suurus õhurõhu suunast.

Suitsumasinaga testides olid leitud lekkekohtadeks väiksed ebaregulaarselt esinevad lekkesid katuseelementide aluskatete ühendusroovi alt. Lekkekohtade korrapäratut esinemist võib põhjustada ühendusroovide kõverus ning kinnitusvahendite liiga suur vahekaugus, mistõttu kinnitusvahendid ei tõmba roovi kogu ulatuses tihedalt alumise materjali vastu.

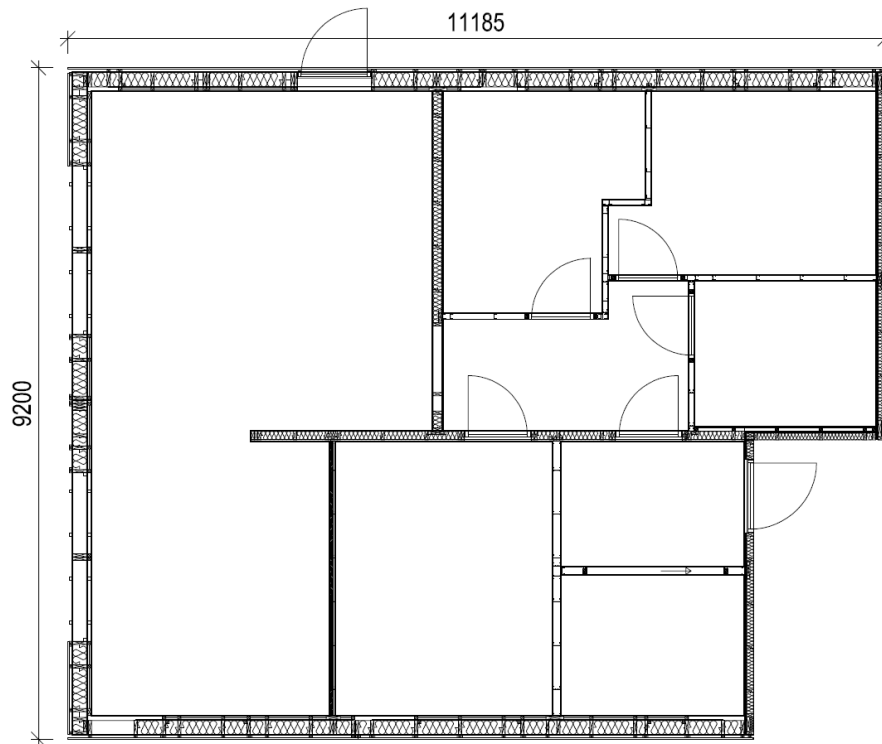
Muude tulemustega KEKE tulemusi võrralda ei saa, kuna kirjandusest sarnase konstruktsiooniga liitekohta uuringute kohta infot ei olnud võimalik leida. Võrreldes käesoleva uuringu teiste liitekohtade tulemustega on antud liitekohta lekete suurused keskmised (vt Joonis 4.42).

Antud liitekohta madala õhulekke saavutamiseks tuleb keskenduda eelkõige aurutõkkele korrektsele ühendamisele harjatala juures kui ka aluskatete ühendamisele katuseharjas.

5.1.9 Reaalse hoone eeldatav õhulekke

Reaalse puitsõrestikhoone teoreetilise eeldatava õhulekke saab arvutada uuringu tulemustel saadud liitekohtade ja piirete õhulekete summeerimise teel. Aluseks on võetud kahekorruseline viilkatusega kortermaja (vt Joonis 2.2 ja Joonis 5.2), mille ühe korteri sisepiirete pindala $A_E = 398,5m^2$ ja sisemine kubatuur $V = 488,2m^3$. Piirde pinnaühikut läbiva vooluhulga suuruseks on võetud mõõtmise VSVA-3 tulemus, avatäidete omalekkes on arvestatud piirde lekkena.

$$\begin{aligned} \sum \dot{V}_{50} &= \sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSKL} C \cdot \Delta P^n + \\ &+ \sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n + \sum_{piirded} C \cdot \Delta P^n = \\ &= 39,1/2,19 \cdot 1,93 \cdot 50^{0,74} + 39,6/1,32 \cdot 0,18 \cdot 50^{0,86} + 55,6/1,32 \cdot 0,47 \cdot 50^{0,80} + \\ &132,0/4,65 \cdot 0,04 \cdot 50^{1,14} + 10,0/2,19 \cdot 1,34 \cdot 50^{0,64} + 41,4/2,19 \cdot 1,41 \cdot 50^{0,60} + \\ &+ 3,2/2,19 \cdot 0,62 \cdot 50^{0,76} + 398,5/(2,19 \cdot 1,32) \cdot 0,40 \cdot 50^{0,70} = 2556l / \text{min} \Rightarrow 153,3m^3 / h \end{aligned}$$



Joonis 5.2 Arvutustes kasutatud maja 1. korruse plaan (hoone lõige vt Joonis 2.2).

$$\begin{aligned}
 \sum \dot{V}_{-50} &= \sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSKE} C \cdot \Delta P^n + \\
 &+ \sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n + \sum_{piirded} C \cdot \Delta P^n = \\
 &= 39,1/2,19 \cdot 1,56 \cdot 50^{0,71} + 39,6/1,32 \cdot 0,14 \cdot 50^{0,82} + 55,6/1,32 \cdot 0,55 \cdot 50^{0,74} + \\
 &132,0/4,65 \cdot 0,13 \cdot 50^{0,84} + 10,0/2,19 \cdot 1,71 \cdot 50^{0,60} + 41,4/2,19 \cdot 1,01 \cdot 50^{0,74} + \\
 &+ 3,2/2,19 \cdot 0,62 \cdot 57^{0,77} + 398,5/(2,19 \cdot 1,32) \cdot 0,34 \cdot 50^{0,71} = 2266l/min \Rightarrow 136,0m^3/h
 \end{aligned}$$

$$q_{50} = 153,3/398,5 = 0,38m^3/(h \cdot m^2)$$

$$n_{50} = 153,3/488,2 = 0,31h^{-1}$$

$$q_{-50} = 136,0/398,5 = 0,34m^3/(h \cdot m^2)$$

$$n_{-50} = 136,0/488,2 = 0,30h^{-1}$$

Uuringu tulemustest saab järeldada, et kasutades testitud liitekohtade lahendusi tegelike hoonete püstitamisel, on võimalik saavutada väga väikseid õhulekkeid. Teoreetiline hoone koguleke täidab liginullenergiamaja nõuded õhupidavusele ($q_{50} < 1m^3/(h \cdot m^2)$; VV määrus nr. 68) ning isegi passiivmaja kriteeriumi õhutihedusele ($n_{50} < 0,6h^{-1}$; <http://heloest.ee/passiivmaja/>). Juhul kui ehitustöid teostatakse kehvemini, on õhulekked suuremad. Tuleb mainida, et mõõtmised on tehtud laboritingimustes, mis võivad anda väiksemaid tulemusi.

6 Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli analüüsida erinevate puitsõrestik välisseina liitekohtade õhupidavust ning liitekohtade lekete kaudu püüda hinnata reaalse hoone piirete õhupidavust. Töö läbiviimiseks paigaldati ja tihendati spetsiaalsesse hermeetilisse mõõtekambrisse kaheksa erinevat liitekohta ning analüüsiti nende õhupidavust erinevatest sise- ja välisrõhu erinevustest lähtudes. Mõõdetud õhulekete juures koostati õhulekkegraafikud ning nende alusel leiti vastavad õhulekkekordsused 10 ja 50 Pa juures.

Suurimad lekkesid esinesid välisseinte välisnurga liites ($VSVS, \dot{V}_{50} = 13,2l / (\text{min} \cdot m)$) ning tihedaim ühenduskoht oli välisseina ja akna liide ($VSA, \dot{V}_{50} = 0,7l / (\text{min} \cdot m)$).

Kaheksast mõõdetud liitekohast kahe mõõtetulemused olid suuremad negatiivse rõhuerinevuse korral võrreldes positiivse rõhuerinevusega (vt Joonis 4.42). Kõigist mõõtmistulemustest ainult ühe liitekohta õhulekked alarõhul olid märkimisväärselt suuremad ülerõhu õhuleketest ($VSKE$) ning vaid ühel juhul olid õhulekked tunduvalt suuremad ülerõhul võrreldes vooluhulkadega alarõhu tingimustes ($VSVS$).

Selle põhjuseks võib välja tuua õhutihedate membraanide erinevad asendid muude konstruktsioonide suhtes. Kui õhutihe membraan asetseb konstruktsioonis vahetult plaatmaterjali all või peal, siis vastavalt rõhu suunale õhutõke puhutakse plaatmaterjalist eemale või surutakse plaatmaterjali vastu, mis aitab lekkekohti sulgeda. Antud uurimuses peaaegu kõik katsetulemused olid suuremad kui õhutõke puhuti plaadist eemale. Erinevalt teistest liitekohtadest, õhulekked läbi katuseharja ($KEKE$) olid suuremad kui õhutõke suruti plaatmaterjali vastu, mis viitab ebatihedatele kohtadele PE-kile ühendustes harjatala juures.

Kahe liitekohta ($VSVL, VSTS$) puhul leiti, et ühendades õhu- ja aurutõkkena kasutatud PE-kile, oli mõju liite õhuleketele väike, samas välisseina ja vundamedi ühenduskohta ($VSVU$) puhul oli mõju märgatav. Aurutõkkkile ühendamise on siiski oluline takistamiseks niiske siseõhu konvektsiooni hoonepiirdesse.

Laboratoorsest mõõtmistulemustest ilmnes, et tuuletõke mõjutab liitekohtade õhulekkeid märgatavalt. Katsete käigus, mis tuuletõkkekangas oli ühendamata ($VSVL-3/4, VSTS-2/3$), olid mõõdetud vooluhulgad märgatavalt suuremad, eriti positiivse rõhuerinevuse korral (vt Tabel 4.9).

Tüüpilised katsetuste käigus leitud lekkekohad esinesid õhutõkete ühendamiseks kasutatud roovi aga ka muu roovitise all. Tõenäoliselt põhjustavad lekkeid augud, mis tekivad läbi tuuletõkkekihi roovide kinnitamisest elemendi külge. Tekkinud avadest pääseb õhk liikuma, sest tänu roovide kõverusele või kinnitusvahendite liiga suurele sammule ei ole roov kogu ulatuses tihedalt alumise materjali vastas. Lisaks leiti lekkekohti vundamenti ja välisseina ühenduses ($VSVU$), akna ja välisseina ühenduse nurkades ning tuuletõkkeplaadi vuukidest katsete käigus, mis tuuletõkkekangas ei olnud ühendatud ($VSVL, VSTS$). Kuigi mõõtmiste käigus oli võimalik tuvastada lekkekohti, võib uuritud liitekohtade lekete suurused lugeda väikesteks.

Uuringu tulemustest saab järeldada, et kasutades testitud liitekohtade lahendusi tegelike hoonete püstitamisel, on võimalik saavutada väga väikseid õhulekkeid. Juhul kui ehitustöid teostatakse kehvemini on õhulekked suuremad. Oluline on, et uuringute tulemused jõuaksid ehitusplatsile, tõuseks ehitustööde kvaliteet ja efektiivsus ning väheneks garantiitööde maht. Tuleb silmas pidada, et mõõtmised on tehtud laboritingimustes, mis võivad anda väiksemaid tulemusi.

7 Summary

7.1 Introduction

AS Matek is a producer of custom made prefabricated timber frame houses that has operated on the market of timber frame houses for more than 25 years. During this period the company has gone through big changes as regards products, production arrangement and has become a producer of custom made prefabricated timber frame houses. Currently, the main market of Matek AS is in the Scandinavian countries where airtightness requirements have become stricter. That leads to increased interest in methods for ensuring airtight building envelopes.

The airtightness of the building envelope is a key factor in the overall thermal performance of a building and affects directly the energy consumption of the building. Air leakage through a building envelope depends on the result of air-pressure differences over the envelope, the distribution of air leakage places and the airtightness of the building envelope. Uncontrolled air movement through a building envelope has an effect on factors such as hygrothermal performance, health, thermal comfort, the effectiveness of ventilation systems, noise and fire resistance.

When measuring air leakages, the airflow \dot{V} (m³/h) through an opening for an applied pressure difference ΔP (Pa) is commonly expressed by the empirical power law $\dot{V} = C \cdot \Delta P^n$. Flow coefficient C is related to the size of the opening and flow exponent n characterizing the flow regime ranging from 0,5 to 1. This equation can also be used when measuring the airtightness of components, such as doors, windows or construction details.

The objective of this study is to estimate air leakages of timber frame external wall junctions (in different construction stages if necessary). This was done by laboratory measurements of eight timber frame external wall joints with other structures. The connections to be tested were planned to correspond to practice as closely as possible. Finally the influence of the different junctions on the global airtightness of a building is demonstrated by calculating the q_{50} and n_{50} -value for a real timber frame house based on the measurement results.

7.2 Methods

7.2.1 Tested junctions

Studied junctions needed to be representative and comply with the conventional situation in a building. The main reason for choosing constructions of this size, rather than only the construction detail itself, was to imitate the actual scenario that a carpenter would be faced with in practice. Studied construction connections:

- The joint between two external wall elements (VSVS; outside corner);
- The joint between external wall and foundation (VSVU);
- The joint between external wall and floor/ceiling (VSVL);
- The joint between external wall and window (VSA);
- The external wall next to wet room (VSVA);
- The joint between external wall and wall between the apartments (VSTS);
- The joint between external wall and roof element (VSKE);
- The joint between two roof elements (KEKE; roof ridge).

7.2.2 Measurement methods

For carrying out laboratory measurements a special hermetic chamber (1,12x1,54x2,44m) was built. Airtight chamber was connected to different measuring and controlling devices that all were connected to a data logger. Collecting measuring and controlling data and management of the equipment took place at the same time. To ensure no air flows from the connection between the test pieces and airtight chamber, the junction was filled with spray-in-place foam and taped, as can be seen from figure (Joonis 3.6).

The airtightness of building components was measured according to standard EVS EN 12114. Readings of air leakage were taken at pressure differences of 20 to 500 Pa for internal positive and negative pressure in the airtight chamber. Air pressure difference levels between minimum and maximum levels were chosen so that at least seven measuring point were emerged. Before the leakage test, three rapid pulses of 10% higher than the maximum pressure difference were carried out. To ensure reliable measuring points, sufficient time was spent ensuring equilibrium of pressure and air flow to be reached. An exponential trend line was calculated according to the measurement points and an exact 10 and 50 Pa value was taken from the trend line.

7.3 Results

The air leakage results through different timberframe external wall connections with other constructions are summarized in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Results of air leakage measurements.

Connection	Air leakage rate, l/(min·m)				Overpressure		Underpressure	
	10 Pa	-10 Pa	50 Pa	-50 Pa	C	n	C	n
1. VSVS-1	5,8	6,8	24,0	25,3	1,65	0,88	2,23	0,82
2. VSVS-(2+3)	4,8	3,6	15,9	11,2	1,93	0,74	1,56	0,71
3. VSVU-1	1,21	0,78	4,76	2,75	0,23	0,85	0,17	0,79
4. VSVU-2	0,97	0,69	3,86	2,46	0,18	0,86	0,15	0,79
5. VSVU-3	0,98	0,69	3,92	2,57	0,18	0,86	0,14	0,82
6. VSVL-1	2,0	2,2	7,6	7,5	0,39	0,83	0,48	0,78
7. VSVL-2	2,2	2,3	8,2	7,5	0,47	0,80	0,55	0,74
8. VSVL-3	7,2	7,6	29,7	19,3	1,25	0,88	2,65	0,58
9. VSVL-4	10,2	7,6	51,8	19,3	1,32	1,01	2,86	0,58
10. VSA-1	0,13	0,18	0,80	0,69	0,04	1,14	0,13	0,84
11. VSA-2	0,27	0,21	0,98	0,74	0,20	0,79	0,16	0,78
12. VSA-3	0,64	0,64	2,38	2,30	0,46	0,81	0,48	0,79
13. VSVA-1	0,65	0,65	2,28	2,04	0,24	0,78	0,28	0,71
14. VSVA-2	0,91	1,30	2,77	3,32	0,40	0,69	0,74	0,58
15. VSVA-3	0,92	0,81	2,81	2,54	0,40	0,70	0,34	0,71
16. VSTS-1	2,7	3,2	7,7	8,3	1,34	0,64	1,71	0,60
17. VSTS-2	2,9	2,9	13,1	13,9	0,75	0,93	0,65	0,98
18. VSTS-3	3,1	2,8	12,9	13,5	0,90	0,88	0,65	0,98
19. VSTS-4	2,8	3,5	7,6	7,9	1,44	0,63	2,36	0,51
20. VSKE	2,6	2,5	6,7	8,2	1,41	0,60	1,01	0,74
21. KEKE	1,6	1,5	5,6	5,3	0,62	0,76	0,57	0,77

Based on the laboratory measurements it is possible to calculate theoretical total airtightness of a timber frame house. For that, the total air leakage $\sum \dot{V}$, internal volume V and total envelope area A_E is needed. To evaluate leakage results of this study, air leakage calculation was carried out of a pitched roof two-storied apartment house with internal volume $V = 488,2m^3$ and total envelope area $A_E = 398,5m^2$. Total air leakage

$\sum \dot{V}_{50}$ of example house:

$$\begin{aligned} \sum \dot{V}_{50} &= \sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSKE} C \cdot \Delta P^n + \\ &+ \sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n + \sum_{borders} C \cdot \Delta P^n = \\ &= 39,1/2,19 \cdot 1,93 \cdot 50^{0,74} + 39,6/1,32 \cdot 0,18 \cdot 50^{0,86} + 55,6/1,32 \cdot 0,47 \cdot 50^{0,80} + \\ &132,0/4,65 \cdot 0,04 \cdot 50^{1,14} + 10,0/2,19 \cdot 1,34 \cdot 50^{0,64} + 41,4/2,19 \cdot 1,41 \cdot 50^{0,60} + \\ &+ 3,2/2,19 \cdot 0,62 \cdot 50^{0,76} + 398,5/(2,19 \cdot 1,32) \cdot 0,40 \cdot 50^{0,70} = 2556l/min \Rightarrow 153,3m^3/h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{V}_{-50} &= \sum_{VSVS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVU} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSVL} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSA} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSTS} C \cdot \Delta P^n + \sum_{VSKE} C \cdot \Delta P^n + \\ &+ \sum_{KEKE} C \cdot \Delta P^n + \sum_{borders} C \cdot \Delta P^n = \\ &= 39,1/2,19 \cdot 1,56 \cdot 50^{0,71} + 39,6/1,32 \cdot 0,14 \cdot 50^{0,82} + 55,6/1,32 \cdot 0,55 \cdot 50^{0,74} + \\ &132,0/4,65 \cdot 0,13 \cdot 50^{0,84} + 10,0/2,19 \cdot 1,71 \cdot 50^{0,60} + 41,4/2,19 \cdot 1,01 \cdot 50^{0,74} + \\ &+ 3,2/2,19 \cdot 0,62 \cdot 57^{0,77} + 398,5/(2,19 \cdot 1,32) \cdot 0,34 \cdot 50^{0,71} = 2266l/min \Rightarrow 136,0m^3/h \end{aligned}$$

$$q_{50} = 153,3/398,5 = 0,38m^3/(h \cdot m^2)$$

$$n_{50} = 153,3/488,2 = 0,31h^{-1}$$

$$q_{-50} = 136,0/398,5 = 0,34m^3/(h \cdot m^2)$$

$$n_{-50} = 136,0/488,2 = 0,30h^{-1}$$

7.4 Discussion

From eight tested connections, the air leakage of two test specimens show a higher leakage rate at negative pressure difference compared to a positive pressure difference. There was only one case where the flow at negative pressure was significantly larger than the air flow at positive pressure (VSKE), and only one case where the flow at positive pressure was noticeably larger than the air flow at negative pressure (VSVU).

As the main reason of this, one could point out different positions of the airtight membranes compared to other materials in the construction. If an air or wind barrier is situated next to the sheeting then according to the air flow direction airtight membrane is blown away from or pressed against the sheeting. Airtight membrane pressing against the sheeting was helping to close leakage paths. In this study almost all leakages

measurement results were higher at positive pressure when the airtight barrier was blown away from board. Effect of air barrier (PE-folio) to this case is negligible because PE-folio has no sheeting material next to it.

Unlike in other connections, the leakages through roof ridge (KEKE) were smaller when the air barrier was blown away from the board. With this junction, negative pressure induced ballooning the PE-folio away from OSB board. That suggests leakage paths in the PE-folio connections next to the ridge beam.

It was found that in two test specimens (VSVL, VSTS), the effect of connecting a vapour-barrier was negligible, but in the exterior wall-foundation joint, the effect was notable. Unlike in the study conducted in Norway (Relander, Bauwens et al., 2011), where no tightening was provided between the ceiling beams on the interior side (VSVL-1), the air leakages were almost the same when tightening vapour-barrier was connected (VSVL-2). Connecting the vapour-barrier is still important to reduce the risk of moisture convection damages. It should be mentioned that the tightening of the PE-folio between ceiling beams is very labour-intensive.

Laboratory measurements reveal that the the wind barrier influences the connection's airtightness significantly. When the wind-barrier was disconnected (VSVL-3/4, VSTS-2/3), the air leakages were considerable, especially at positive pressure difference.

The experiment with exterior wall-foundation joint was executed similarly to Relander (Relander, Heiskel et al., 2011). Although it was impossible in the current study to apply additional load to the wall, the measurement results overlap quite well with reference results (Relander, Heiskel et al., 2011) when sill membrane and sealant were used.

During the experiments, leakage paths could be found. For that, smoke machine HQ Power (<http://www.hqpower.eu>) and air flow indicator Dragon Puffer (<http://www.zerotoys.com>) were used, and some air gaps could be found by groping. Typical leakage paths were under the battens that connect airtight membranes with the main frame. That could be caused by the crook of the timber materials or too much distance between fasteners, wherefore the fasteners are unable to tighten the gap between the battens and the main frame. Additionally, air leakages were found in the connection between the external wall and the foundation (VSVU), in the corners of the junction between the external wall and the window (VSA) and from gypsum board junctions when airtight membranes were unconnected (VSVL, VSTS).

According to the calculation in the previous chapter (7.3), when tested connection solutions are used in a real building, it is possible to assure very high overall airtightness. Theoretical air leakage fulfils the requirements of nearly zero energy buildings ($q_{50} < 1\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; VV decree nr 68) and even the passive house standard ($n_{50} < 0,6\text{h}^{-1}$; <http://helioest.ee/passiivmaja/>). That leads to the necessity of high quality workmanship and appropriate materials to assure low air leakage rate.

7.5 Conclusion

Airtightness is a key factor in the overall thermal performance of buildings. As building energy codes become more demanding, the relative importance of airtightness in achieving the requirements set out in the codes increases, airtightness becomes a crucial parameter.

The airtightness was highest in the connections between timberframe external wall and window with $\dot{V}_{50} = 0,71/(\text{min} \cdot \text{m})$ and the external corner junction was the leakiest with $\dot{V}_{50} = 13,71/(\text{min} \cdot \text{m})$.

Based on the laboratory measurements it seems possible to construct very airtight timberframe external wall connections with other constructions with negligible contribution to the total airtightness of a timber frame house. Although during the experiments leakage paths could be found, the leakage rates of all measured junctions may be evaluated as low.

It should be mentioned that the measurements were done under laboratory conditions. Therefore the air leakages for the measured junctions might be in the lower range. It is an incontestable fact that without very conscious craftsmen, laboratory conditions are more ideal than in situ. The increasing airtightness requirements, however lead to more thorough workmanship and there is reason to believe that the discrepancy between laboratory and field conditions will decrease in the future.

8 Kasutatud kirjandus

- Alev, U. Uus, A., Teder, M., Miljan, M.-J., Kalamees, T. Air leakage and hygrothermal performance of an internally insulated log house. Proceedings from the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden, June 2014.
- Andmelooger Grant Squirrel SQ2010. Grant Instruments Ltd.
[\[http://www.grantinstruments.com/squirrel-sq2010-data-logger/\]](http://www.grantinstruments.com/squirrel-sq2010-data-logger/) (23.04.2015).
- Diferentsiaalmanomeeter Dwyer Magnesense MS. Dwyer Instruments Ltd.
[\[http://www.dwyer-inst.com/Product/Pressure/DifferentialPressure/Transmitters/SeriesMS#specs\]](http://www.dwyer-inst.com/Product/Pressure/DifferentialPressure/Transmitters/SeriesMS#specs) (23.04.2015).
- Diferentsiaalmanomeeter Pro dual PEL-DK. Pro dual Oy.
[\[http://www.produal.com/EN/Products/Transmitters/Differential%20pressure%20transmitters/PEL%20dash-%20PEL-N\]](http://www.produal.com/EN/Products/Transmitters/Differential%20pressure%20transmitters/PEL%20dash-%20PEL-N) (23.04.2015).
- Dwyer vooluhulga mõõtjad. Dwyer Instruments Ltd. [\[http://www.dwyer-inst.com/Product/Flow/MassFlowmetersandControllers/SeriesGFC\]](http://www.dwyer-inst.com/Product/Flow/MassFlowmetersandControllers/SeriesGFC) (23.04.2015).
- EVS EN 12114. Thermal performance of buildings - Air permeability of building components and building elements - Laboratory test method. Eesti Standardikeskus, 2000.
- EVS EN 13829. Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhupidavuse määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod. Eesti Standardikeskus, 2001.
- EVS EN 15242. Hoonete ventilatsioon. Hoonetes õhuhulkade, sh. infiltratsiooni määramise meetodid. Eesti Standardikeskus, 2007.
- Hagentoft, C., E. Introduction to building physics. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden. 2012.
- ISO 6589. Joints in building - Laboratory method of test for air permeability of joints. 1983.
- Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., Vinha, J. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. Building and Environment 44, 377-387, 2008.
- Kalamees, T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. Building and Environment 42, 2369-2377, 2007.
- Kalamees, T. Elamupiirete õhupidavus : Uurimistöo „Elamute õhulekkearvu baasväärtuse väljaselgitamine ja õhulekkearvu muul viisil tõendamise meetodika väljatöötamine“ raport. Tallinna Tehnikaülikool, 2008.
- Kalamees, T. Kurnitski, J. Moisture convection performance of wall and attic floor joint. 2008.
- Kalamees, T., Pärnalaas, M., Alev, Ü., Linnas, P. Puitsõrestik välisseina liitekohtade õhulekke analüüs. Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- Kalamees, T. Seade piirdetarindite ja hooneosade õhulekete mõõtmiseks laboritingimustes. Vajaduse kirjeldus – lähteülesanne. 2012.
- Kalamees, T., Tark, T. Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine. Juhend väikeelamute projekteerijale, ehitajale ja tellijale. Tallinn, 2012.
- Langemans, J., Klein, R., De Paepe, M., Roels, S., Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions. Energy and Buildings 42, 2376-2385, 2010.

- Myhre, L., Aurlien, T., Measured air-tightness in low-energy houses. 2004.
- NS 3420-1. Specification texts for building, construction and installations - Part 1: General conditions. Standards Norway, 2009.
- Passiivmaja kriteeriumid. [<http://heloest.ee/passiivmaja/>] (31.05.2015).
- Relander, T.O., Bauwens, G., Roels, S., Thue, J.V., Uvsløkk, S., The influence of structural floors on the airtightness of wood-frame houses. Energy and Buildings 34, 639-652, 2011.
- Relander, T.O., Heiskel, B., Tyssedal, J.S. The influence of the joint between the basement wall and the wood-frame wall on the airtightness of wood-frame houses. Energy and Buildings 43, 1304–1314, 2011.
- Relander, T.O., Thue, J.V., Gustavsen, A. Air tightness performance of different sealing methods for windows in wood-frame buildings. 2008.
- Relander, T.O., Thue, J.V., Gustavsen, A. The influence of different sealing methods of window and door joints on the total air leakage of wood-frame buildings. 2008.
- Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaanisoo, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Öiger, K., Just, E., Just, A., Hartšuk, V. Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn, 2012.
- Sagedusmuundur EATON DC1. Eaton Corporation.
[<http://www.eaton.ee/public/ee/main/dc1%20sagedusmuundur.html>] (23.04.2015).
- Sandberg, P.I., Sikander, E. Lufttätthetsfrågorna i byggprocessen – Kunskapsinventering, laboratoriemätningar och simuleringar för att kartlägga behov av tekniska lösningar och utbildning. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, Sverige, 2004.
- Sandberg, P.I., Sikander, E., Wahlgren, P., Larsson, B. Lufttätthetsfrågorna i byggprocessen - Etapp B. Tekniska konsekvenser och lönsamhetskalkyler. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, Sverige 2007.
- Sidepuumembraan Svillemembran. Isola.
[http://www.isola.no/assets/Norway/Installation%20instruction/Isola%20Svillemembran_mon.pdf] (12.05.2015).
- Siga Corvum, Wigluv. Siga. [<http://www.siga.ch/en/product-overview.html>] (23.04.2015).
- Soudal Flexifoam. Soudal NV. [<http://www.soudal.ee/index.php/pu-foams/item/28-soudafoam-flexifoam>] (23.04.2015).
- Squirrel View tarkvara. Grant Instruments Ltd.
[<http://www.grantinstruments.com/squirrelview/>] (23.04.2015).
- Suitsumasin HQ Power VDP700SM. Velleman NV.
[<http://www.hqpower.eu/products/view/?country=be&lang=en&id=344239>] (23.04.2015).
- Temperatuuri- ja niiskusandur Rotronic HygroClip SC05. Rotronic AG.
[<http://www.rotronic.com/hc2-c04-hc2-c05.html>] (23.04.2015).
- Tuleohutud puitmajad. Põhja- ja Baltimaade teadmisi koondav juhendmaterjal. ET INFOkeskuse AS, Tallinn, 2014.
- Tuuletõkkekangas Tyvek Soft. DuPont. [<http://www.dupont.co.uk/products-and-services/construction-materials/tyvek-building-envelope/brands/tyvek-breather-membrane/products/tyvek-soft-breather-membrane-for-walls.html>] (23.04.2015).

- Vaakumpump Elmo Rietschle. Gardner Denver Inc. [<http://www.gd-elmoietschle.com/productfinderlist.aspx?id=18482&mi=692&smi=714>] (23.04.2015).
- Van Den Bossche, N., Huyghea, W., Moensa, J., Janssens, A., Depaepe, M. Airtightness of the window–wall interface in cavity brick walls. Energy and Buildings 45, 32–42, 2012.
- Viking Window SW11 aken. Viking Window AS. [<http://www.viking.ee/et/aknad/valjapoole-avatavad-aknad/kolme-klaasiga-aknad-sw11>] (23.04.2015).
- Villasukk Isover TK. Saint-Gobain Ehitustooted AS. [<http://www.isover.ee/tooted/ehitusisolatsioon/tihendusvillad/4859/isover-tk>] (12.05.2015).
- VV määrus nr. 68. Energiatõhususe miinimumnõuded. 30.08.2012 (RT I, 05.09.2012, 4).
- Õhuvooluindikaator Dragon Puffer. Zero Toys. [<http://www.zerotoys.com/product-p/dragonpuffer.htm>] (23.04.2015).
- Ylmén, P., Hansén, M., Romild, J. Durability of air tightness solutions for buildings. 2014. Proceedings of the Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance Conference 24-25 September, Poznań, Poland, 277-287.

9 Lisad

Lisa 1 – Välisnurk (VSVS)

Lisa 2 - Välisseina ja sokli liitekoht (VSVU)

Lisa 3 – Välisseina ja vahelae liitekoht (VSVL)

Lisa 4 – Välisseina ja akna liitekoht (VSA)

Lisa 5 – Välissein vannitoa kohal (VSVA)

Lisa 6 - Välisseina ja korterite vahelise seina liitekoht (VSTS)

Lisa 7 – Välisseina ja katuse liitekoht

Lisa 8 – Katusehari (KEKE)