



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

POLÜURETAAANVAHUGA TÄIDETUD VUUKIDE ÕHULEKE

AIR LEAKAGE OF JOINTS FILLED WITH POLYURETHANE FOAM

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Heleen Gustavson
/nimi/

Üliõpilaskood: 122421EAEI

Juhendaja: Prof. Targo Kalamees
/nimi, amet/

Tallinn 2018

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“03” juuni 2018

Autor: Heleen Gustavson

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“03” .juuni 2018

Juhendaja: Targo Kalamees

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

TTÜ Inseneriteaduskond
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Heleen Gustavson, 122421EAEI (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: 4- Ehitiste restaureerimine, EAEI02/12Tartu- Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine (kood ja nimetus)

Juhendaja(d): õppejõud, Targo Kalamees (amet, nimi, telefon)

Konsultandid:(nimi, amet)

.....(ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Polüuretaanvahuga täidetud vuukide õhuleke

(inglise keeles) Air leakage of joints filled with polyurethane foam

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Laboratoorsete katsete abil hinnata õhuvooluleket läbi polüuretaan montaaživahuga tihendatud vuukidega katsekehade.
2. Hinnata vuugi laiuse, vuugi pinnaviimistluse ja erinevate montaaživahtude mõju õhulekkele.
- 3.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katsekehade ettevalmistamine	Veebruar
2.	Katsete läbiviimine ja katsetulemuste vormistamine	Mai algus
3.	Lõputöö kirjutamine	28. mai

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "03" juuni 2018a

Üliõpilane: Heleen Gustavson "03" juuni 2018 a

/allkiri/

Juhendaja: Targo Kalamees "03" juuni 2018 a

/allkiri

Konsultant: "....."201....a

SISUKORD

1	EESSÕNA.....	6
2	SISSEJUHATUS	7
3	HOONEPIIRETE ÕHUPIDAVUS	9
3.1	Ülevaade hoonepiirete õhupidavuse arvutustest.....	9
3.2	Kirjanduse ülevaade eelnevatest uuringutest.....	10
4	MEETODID	14
4.1	Katsekehad.....	14
4.2	Uurimistöodes käsitletavat montaaživahud.....	18
4.3	Mõõtmine.....	19
4.4	Mõõteseadmed	20
4.4.1	Hermeetiline lekkekamber	21
4.4.2	Õhurõhkude erinevuse tekitamise ja muutmise seadmed	22
4.4.3	Hermeetilise lekkekambri omalekke määramine	23
4.4.4	Katse käik.....	23
5	TULEMUSED	26
5.1	Tulemused katsekehatüüpide kaupa	26
5.1.1	Lõikamata montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 10 mm	26
5.1.2	Lõikamata montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 30 mm	29
5.1.3	Lõikamata montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 10 mm.....	32
5.1.4	Lõikamata montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 30 mm.....	35
5.1.5	Lõikamata montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 10 mm.....	38
5.1.6	Lõikamata montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 30 mm.....	41
5.1.7	Lõigatud montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 10 mm	44
5.1.8	Lõigatud montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 30 mm	48
5.1.9	Lõigatud montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 10 mm	50
5.1.10	Lõigatud montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 30 mm	53
5.1.11	Lõigatud montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 10 mm.....	56
5.1.12	Lõigatud montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 30 mm.....	60
5.2	Tulemuste kokkuvõte.....	63
6	TULEMUSTE HINDAMINE	65
7	JÄRELDUSED	69
8	SUMMARY	70

8.1	Introduction	70
8.2	Methods	70
8.2.1	Tested specimen	70
8.2.2	Measuring methods	70
8.3	Results	71
8.4	Dicussion	72
8.5	Conclusion	73
9	KASUTATUD KIRJANDUS.....	74

1 EESSÕNA

Käesolev uurimistöö on valminud Tallinn Tehnikaülikoolis professor Targo Kalamehe algatusel ning koostöös kahe montaaživahu müüja ja tootja, Enerest OÜ ja Soudal AS-ga. Töö eesmärgiks on laboratoorsete katsete abil hinnata õhuvooluleket läbi polüuretaan montaaživahuga tihendatud vuukidega katsekehade hermeetilises lekkekambris. Lisaks, hinnata vuugi laiuse, vuugi pinnaviimistluse ja erinevate montaaživahtude mõju õhulekkele. Katsekehad on disainitud eesmärgiga jäljendada vuuki aknalengi ning välisseina vahel. Katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Ehituskonstruksioonide teadus- ja katselaboris. Katsekehad valmisid Toakraam OÜ-s Enerest OÜ ja Soudal AS-i finantseerimisel.

Parimad ehk väikseima õhulekkega tulemused saavutati hõõveldatud puidust pinna viimistlusega vuukide puhul. Saepuidust pinna viimistlusega vuukide õhulekke tulemused olid väga hajuvad, kuid selgelt kehvemad kui hõõveldatud puidust pinna viimistlusega vuukide tulemused. PVC kattega vuukide õhulekke tulemused jäid eespool kirjeldatud vuugitüüpide tulemuste vahele. Tulemuste analüüsimisel järeldus, et suurimat mõju vuugi õhulekkele avaldabki vuugi pinnaviimistlus. Ainult hõõvelpuidust vuukide tulemuste puhul oli vuugi laiuse ja montaaživahu mõju määratletav. Montaaživahu järeltöötuse (vuugist väljapaisunud vaht lõigatakse) mõju vuukide õhulekkele on ebaselge. See võib osaliselt olla põhjustatud asjaolust, et lõigatud montaaživaht on avatud enam õhuniiskusele, mistõttu polüuretaanvahu kõvastumisperiood pikeneb ning vaht saavutab paremad õhupidavuse omadused. Võimalik, et see protsess teatud katsekehade puhul korvab montaaživahu lõikamisel avanevate pooride kaudu suureneva õhulekke.

Uurimistöö autor soovib tänada Peeter Linnast abi ja nõuannete eest katsete läbiviimisel.

Võtmesõnad: polüuretaan montaaživaht, vuukide õhulekke, välisseina- ja akna liitekoht, magistritöö

2 SISSEJUHATUS

Piirdetarindite õhupidavus mängib hoonete energiatõhususe analüüsi juures olulist rolli ning mõjutab otseselt hoone 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 (Kalamees, 2007).

Hoonepiirete ja hoone osade õhulekked väljenduvad planeerimatus ja kontrollimatus õhu voolus läbi pragude ja ebatiheduste hoone piiretes. 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 & Loorits, 2008).

Tavapäraselt moodustuvad õhulekked just piirdetarindite liitekohtadesse (sokkel + välissein, vahelagi + välissein, katus + välissein, välisseina välisnurk ja siseturk, katusehari, välissein + vahesein, avatäite ümbrus jne). Senised uuringud Eesti elamute juures on toonud ühe peamise õhulekke kohana välja välisseina ja akna liitekohta (Pärnalaas, 2015).

Polüuretaan montaaživaht on üks levinuimaid materjale Eesti ehituspraktikas, millega täidetakse vuuke nende õhupidavuse tagamiseks. Enne tänapäevaste pikaajaliselt vastupidavate teipide ehitusturule tulekult oli montaaživaht peamine avatäidete tihendamise materjal. Montaaživaht leiab üsna aktiivset kasutus veel tänagi ja eriti kohtades, kuhu teipi paigaldada ei saa. Üksikute tarindite ja tarindite liitekohtade õhulekke on oluline teave nii hoone projekteerijale, ehitajale kui ka ehitusmaterjalide ja hooneosade tootjatele.

Antud lõputöö eesmärgiks on laboratoorsete katsete abil hinnata õhuvooluleket läbi polüuretaan montaaživahuga tihendatud vuukidega katsekehade hermeetilises lekkekambris ning saadud katsetulemuste põhjal püüda vastata järgmistele küsimustele:

- Milline on erinevate montaaživahtudega tihendatud vuukide õhuvooluleke?
- Kuidas mõjutab vuugilaius montaaživahuga tihendatud vuukide õhuvooluleket?
- Kuidas mõjutavad vuugi pinna omadused montaaživahuga tihendatud õhuvooluleket?
- Kuidas mõjutab montaaživahu järeltöötlus (montaaživahu pealmise pinna äralõikamine) montaaživahuga tihendatud vuukide õhuleket?

Lähtudes eespool välja toodud küsimustest on püstitatud järgnevad tööhüpoteesid:

- laiema vuugi korral on õhuleke suurem (eeldatavalt on montaaživahu „paisumispinge“ väiksem);
- hõõveldatud puidu pinnaga vuugi õhuleke on väiksem, kui saetud puidu pinnaga vuugil ja/või PVC- kattega vuugi pinnal;
- montaaživahu katsekehast väljaulatuva osa äralõikamine suurendab vuugi õhuleket;
- erinevate montaaživahtude õhuleke on erinev.

Katsetes uuriti kolme polüuretaan montaaživahtu, mis pärinevad uurimistöös osalenud montaaživahu müüjatelt ja tootjatelt. Katsed viidi läbi perioodil 22. veebruar 2018 - 3. mai 2018 Tallinna Tehnikaülikooli Ehituskonstruksioonide teadus- ja katselaboris.

Lõputöö jaguneb kolmeks osaks. Esimeses osas antakse ülevaade hoonepiirete õhupidavuse arvutustest. Lisaks antakse ülevaade eelnevatest uuringutest, mis käsitlevad polüuretaanvahuga tihendatud konstruktsiooniliidete õhulekkeid. Teises osas antakse ülevaade katsete läbiviimiseks vajalikest katsekehataüüpidest, mõõteseadmetest ning katsemeetoditest. Kolmas osa sisaldab ülevaadet tulemustest, tulemuste analüüsi ning järeldusi.

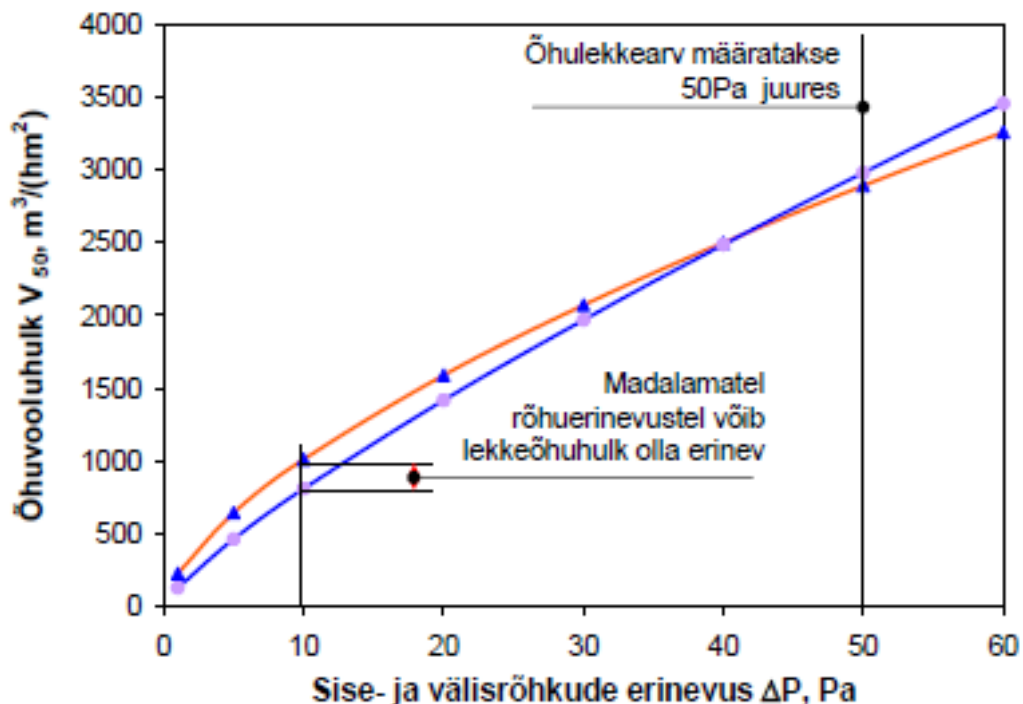
3 HOONEPIIRETE ÕHUPIDAVUS

3.1 Ülevaade hoonepiirete õhupidavuse arvutustest

Hoonepiirete õhupidavust on võimalik esitada kolmel viisil (EVS-EN ISO 9972:2015):

- Õhulekkearv, q_{E50} ($m^3/(h * m^2)$), mis iseloomustab lekkeõhu suurust q_{50} (m^3/h) 50 Pa juures jaotatuna hoone piirdetarindite pindalale A_E (m^2);
- Õhuvahetuskordsus 50 Pa juures n_{50} ($1/h$), mis iseloomustab lekkeõhu suurust q_{50} (m^3/h) 50 Pa juures jaotatuna hoone sisekubatuurile V (m^3);
- Piirdetarindite õhuleke hoone netopidala kohta, q_{F50} ($m^3/(h * m^2)$), mis iseloomustab lekkeõhu suurust q_{50} (m^3/h) 50 Pa juures jaotatuna hoone neto pindalale A_F (m^2).

Hoonepiirete õhupidavus esitatakse üldiselt 50 Pa juures, sest tavaolukorrast suurema õhuerinevuse korral on tuulest ja temperatuuride erinevusest tingitud mõjud mõõtetulemusele piisavalt väikesed. Enamuse ajast liigub lekkeõhk läbi piirde 50 Pa-st madalamate õhurõhkude erinevuse korral (tavaolukord). Sõltuvalt lekete paiknemisest ja iseloomust võib sama õhulekkearvuga hoonete õhuleke tavaolukorras olla erinev (Kalamees & Looirts, 2008).



Joonis 3.1 Sama õhulekkearvuga hoonete erinevad õhulekkegraafikud ((Kalamees & Looirts, 2008)

Lekkeõhuvooluhulk ja õhurõhkude erinevus on omavahelises sõltuvuses:

$$\dot{V} = C * \Delta P^n, \quad (3.1)$$

kus

\dot{V} - õhuvooluhulk, $\frac{m^3}{h} \left(\frac{l}{s}, \frac{m^3}{s} \right)$;

C - õhuvoolukordaja, $m^3 / (h * Pa)^n$;

ΔP - sise- ja välisrõhkude erinevus, Pa ;

n - õhuvoolu eksponent;

õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse suhet iseloomustav eksponent:

$n = 1$ õhu laminaarne voolamine;

$n = 0,5$ õhu turbulentne voolamine.

Õhupidavate hoonete puhul on trend rohkematele ja väiksematele lekkekohtadele ning lekkivamate hoonete korral on trend üksikumatele ja suurematele lekkekohtadele (Kalamees & Loorits, 2008).

3.2 Kirjanduse ülevaade eelnevatest uuringutest

Belgias läbi viidud uuring (Bracke jt, 2014) käsitleb puitkarkassiga välisseina ja akna liitekohta õhulekkeid erinevate tihendusviiside puhul. Uuringust on välja toodud ainult polüuretaanvahuga tihendatud liidete katsetulemused (vt Tabel 3.1).

Uuringus testitavad katsekehad koosnevad seinaelemendist ning mitteavatavast aknast. Akna klaaspaketi ning raami ühendus on teibitud vältimaks akna omaleket.

Polüuretaanvahuga tihendatud liidetega katsekehad jagunevad järgmiselt:

- 1 aken on kinnitatud karkassipostide külge kruvidega ning paigaldusklambritega; vuuk (50 mm) aknalengi ning karkassiposti vahel on täidetud vahuga; kontaktpinnad on veega niisutatud;
- 2 aken paigaldatud vineerist raami (aknapaled); raami ja karkassipostide vahel on rihtimispuulgad; vuuk (35 mm) raami ning karkassipostide vahel on täidetud vahuga; kontaktpinnad on veega niisutatud;
- 3 lisasoojustusega sein, aken on kinnitatud karkassipostide külge kruvidega ning paigaldusklambritega; vuuk (50 mm) aknalengi ning karkassiposti vahel on täidetud vahuga; kontaktpinnad on enne vahu laskmist niisutamata;

- 4 lisasoojustusega sein; aken on kinnitatud karkassipostide külge kruvidega ning paigaldusklambritega; vuuk (50 mm) aknalengi ning karkassiposti vahel on täidetud vahuga, kontaktpinnad on enne vahu laskmist veega niisutatud;
- 5 lisasoojustusega sein; aken paigaldatud vineerist raami (aknapaled), mille rihtimiskiilud ei ulatu vuuki; vuuk (35 mm) raami ning karkassipostide vahel on täidetud vahuga, kontaktpinnad on veega enne vahulaskmist niisutatud.

Tabel 3.1 Katsetulemused viide (Bracke jt, 2014)

Katsekehatüüp	$\dot{V}_{50}, l/(min \cdot m)$		
	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine
1	1,33	2,67	1,33
2	2,17	2,67	2,50
3	6,50	5,83	6,17
4	0,67	0,50	0,50
5	0,17	0,00	0,00

Uuringust selgus, et üheks selgeks õhulekete suurenemise põhjuseks käsitletavates liitekohtades on klambrid ja rihtimiskiilud vuugis, mis takistavad vuugi täitumist terves ulatuses vahuga. Lisaks saab tulemustest järeldada, et kontaktpindade niisutamine vähendab õhuleket oluliselt.

Teine Belgias läbiviidud uuring (Van Den Bossche jt, 2012) käsitleb tellisseina ja akna liitekohta õhulekkeid erinevate tihendusviiside puhul. Uuringust on välja toodud ainult polüuretaanvahuga tihendatud liidete katsetulemused (vt Tabel 3.2).

Polüuretaanvahuga täidetud liidetega katsekehade puhul on aken asetatud seinaelemendis vineerist raami (aknapaled). Vuukides vineerist raami ning seinaelemendi vahel on rihtimiskiilud. Vuugilaius on 25 mm.

Polüuretaanvahuga tihendatud liidetega katsekehad jagunevad järgmiselt:

- 1 osaliselt vahuga väljastpoolt tihendatud vuuk; vuugi katteks siseküljel aknaliist; aknapale ja aknalengi vaheline vuuk tihendatud;
- 2 osaliselt vahuga seestpoolt vahuga tihendatud vuuk; vuugi katteks siseküljel aknaliist; aknapale ja aknalengi vuuk tihendatud;
- 3 täielikult vahuga tihendatud vuuk; vuugi katteks siseküljel aknaliist; aknapale ja aknalengi vuuk tihendatud;
- 4 täielikult vahuga tihendatud vuuk; vuugi katteks siseküljel aknaliist; aknapale ja aknalengi vuuk pole tihendatud;
- 5 täielikult vahuga tihendatud vuuk; vuuk kaetud siseküljel krohviga (pragunemine krohvi ja aknapale liitepunktis); aknapale ja aknalengi vuuk tihendatud;

- 6 täielikult vahuga tihendatud vuuk; vuuk kaetud siseküljel krohviga; krohvi ja aknapale liitepunkt tihendatud (pragunemine antud punktis puudub); aknapale ja aknalengi vuuk tihendatud.

Tabel 3.2 Katsetulemused viide (Van Den Bossche jt, 2012)

Katsekehatüüp	$\dot{V}_{50}, l/(min \cdot m)$		
	Ülerõhk	Alarõhk	Keskmine
1	20,50	15,00	17,67
2	27,83	31,00	29,50
3	29,83	15,67	22,67
4	0,00	-0,17	0,00
5	-0,50	4,00	1,67
6	0,17	1,00	0,50

Uuringu tulemustest võib järeldada, et erineval viisil polüuretaanvahuga tihendamine ning lisatoodete kasutamine (või mittekasutamine) mõjutab õhulekke tulemusi suurel määral.

Tallinna Tehnikaülikoolis läbi viidud uuring (Alev, Uus, & Kalamees, 2017) palkmaja õhuleketest testis erinevaid palkseina ja akna liitekohta tihendamiseviiside mõju õhuleketele. Ühe tüübina testiti tihendamiseviisi, mille puhul palgiotsad ning aknaraami sise- ja väliskülg olid teibitud. Lisaks oli tendriposti soonde palgi otstes liimitud polüuretaanvahuga tuuletõkkemembraan, mis ulatus aknaraami siseküljele. Lisatihendusmaterjalina kasutati tendriposti soones lambavilla. Antud tihendamiseviis andis 78% parema tulemuse õhuleketestis kui tihendamiseviis, mille puhul ainult aknaraami sise- ja väliskülg olid teibitud ning tendriposti soon täidetud lambavillaga. Uuringus toodi eraldi välja, et polüuretaanvaht täitis õõnsused ning praod palkides paremini kui tihendusvorst tendriposti soones.

Tallinna Tehnikaülikoolis (Alev, Antsov, & Kalamees, 2015) läbi viidud uuringus testiti paekivist sokliseina ning vundamendiplaadi liitekohta tihendamiseviiside mõju õhuleketele. Ühe tihendamiseviisina uuriti akrüül-dispersiooniga töödeldud isepaisuvat polüuretaanteipi. Antud tihendusviisi uuriti kahe variandina: teip on liite nurkades kahest ribast jätkatud ning teise variandina on teip paigaldatud liite nurkadesse lihtsalt painutatuna. Lisaks testiti eelkompresseeritud ning tulekindla dispersiooniga töödeldud PUR teipi. Saadud tulemusi (vt Tabel 3.3) võrreldi tihendamiseviisiga, mille puhul vuuk sokliseina ning vundamendiplaadi vahel on ainult täidetud mineraalvillaga.

Tabel 3.3 Katsetulemused (Alev, Antsov, & Kalamees, 2015)

Tihendamisviis	$\dot{V}_{10}, l/(min*m)$	$\dot{V}_{50}, l/(min*m)$	Vähene mine kordades 10 Pa juures
Mineraalvill	546	1260	-
Isepaisuv polüuretaanteip	56,4	126	9,7
Eel-kompressseeritud PUR teip	72	168	7,6

Uuringus toodi välja, et liite nurkades polüuretaanteibi painutamine andis 19% kehvema tulemuse kui teibi jätkamine kahest ribast.

Tallinna Tehnikaülikoolis läbi viidud uuringus (Kalamees, Alev, & Pärnalaas, 2017) testiti puitkarkassiga elementmajade piirdetarindite liitekohtade õhupidavust. Uuringust selgus, et kõige väiksemate õhuleketega oli välisseina- ja (puitalu miinium) akna liitekoht. Antud liitekohta puhul testiti kahte tüüpi tuuletõkkekanga teipimisviisi:

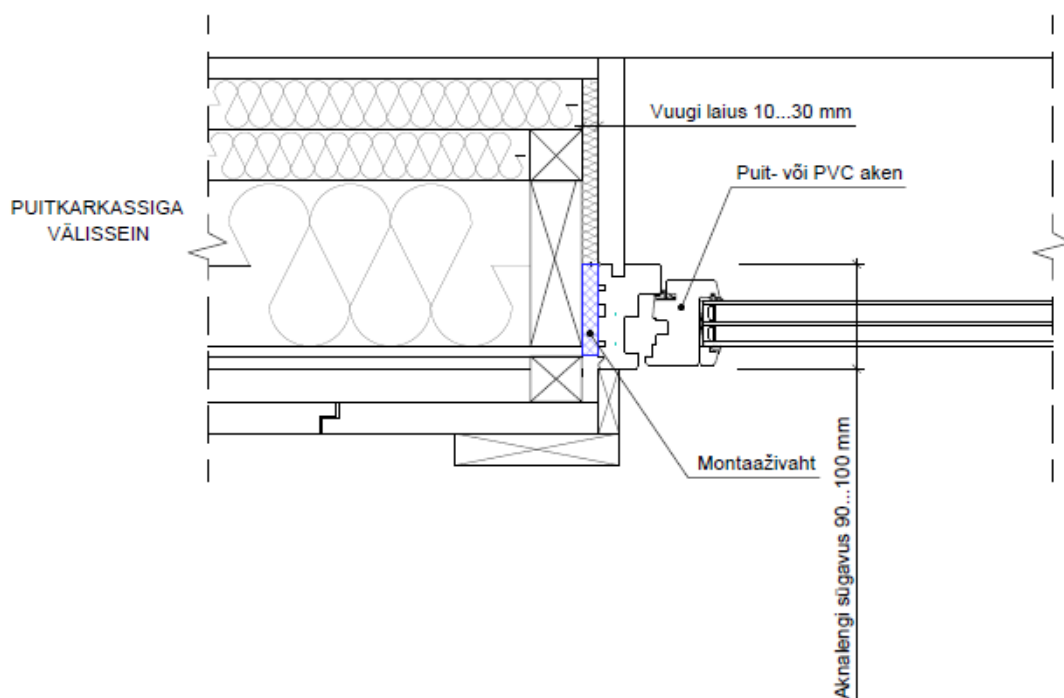
- 1 tuuletõkkekangas on korrektselt teibitud aknalengi puitosa külge;
- 2 tuuletõkkekangas on tehases ebakorrektselt teibitud aknalengi alumiiniumprofiili külge (jäljendamaks kehva kutsemeisterlikkust või projekteerimist).

Tulemused toodi välja õhulekkarvudena ($l/(min*m)$) 4 Pa, -4Pa, 10 Pa, -10 Pa, 50 Pa, -50 Pa juures. Esimese teipimisviisi tulemused olid keskmiselt 3,7 korda paremad teise teipimisviisi tulemustest. Suurim erinevus oli 6-kordne (10 Pa juures). Antud uuringu tulemuste põhjal võib järeldada, et tuuletõkkekanga teipimisviisil on väga suur mõju liitekohta õhuleketetele.

4 MEETODID

4.1 Katsekehad

Katsekehad on disainitud eesmärgiga jäljendada puidust välisseina karkassi ning aknalengi vahelist vuuki (vt Joonis 4.1), mille hetkel ehituspraktikas enimlevinud laiuks on 10 - 30 mm ning sügavuseks 95 mm. Vuugi sügavus tuleneb tüüpilisest tänapäeva puitakna sügavusest, 90 mm, ja vuugi laius tuleneb tüüpilisest akna ja seina vahelisest mõõdust. Aknalengid on kas puidu pinna viimistlusega või PVC pinna viimistlusega ning aknaava moodustav karkass hõõveldatud puidust või saepuidust. Need ääritingimused põhjustasid kolm erinevat pinnaviimistlust (vt Tabel 4.1 .



Joonis 4.1 Näide: puitkarkassiga välisseina ja akna liitekoht

Vuukide erinevad variandid on esitatud tabelis Tabel 4.1.

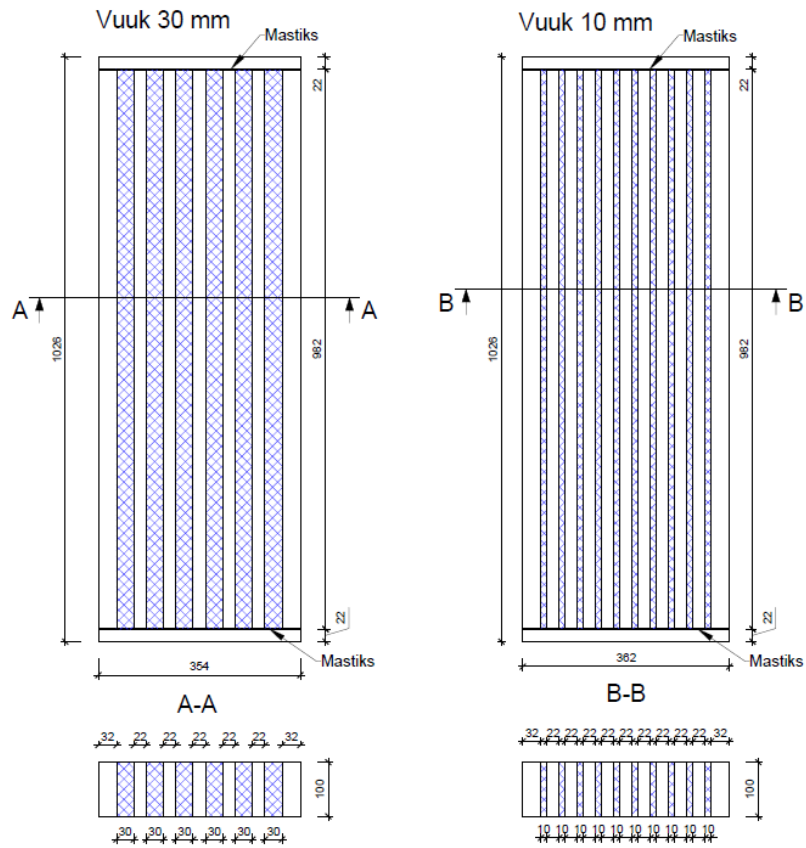
Tabel 4.1 Katsekehatüübid ja nende koodid

Montaaživaht	Vuugilaius, mm	Katsekeha nr	Saetud puiduga vuugi pind	Hööveldatud puiduga vuugi pind	PVC teibiga kaetud vuugi pind
"lilla"	10	1	1L10SL	1L10HL	1L10PVC
		2	2L10SL	2L10HL	2L10PVC
		3	3L10SL	3L10HL	3L10PVC
	30	1	1L30SL	1L30HL	1L30PVC
		2	2L30SL	2L30HL	2L30PVC
		3	3L30SL	3L30HL	3L30PVC
"sinine"	10	1	1S10SL	1S10HL	1S10PVC
		2	2S10SL	2S10HL	2S10PVC
		3	3S10SL	3S10HL	3S10PVC
	30	1	1S30SL	1S30HL	1S30PVC
		2	2S30SL	2S30HL	2S30PVC
		3	3S30SL	3S30HL	3S30PVC
"kollane"	10	1	1K10SL	1K10HL	1K10PVC
		2	2K10SL	2K10HL	2K10PVC
		3	3K10SL	3K10HL	3K10PVC
	30	1	1K30SL	1K30HL	1K30PVC
		2	2K30SL	2K30HL	2K30PVC
		3	3K30SL	3K30HL	3K30PVC

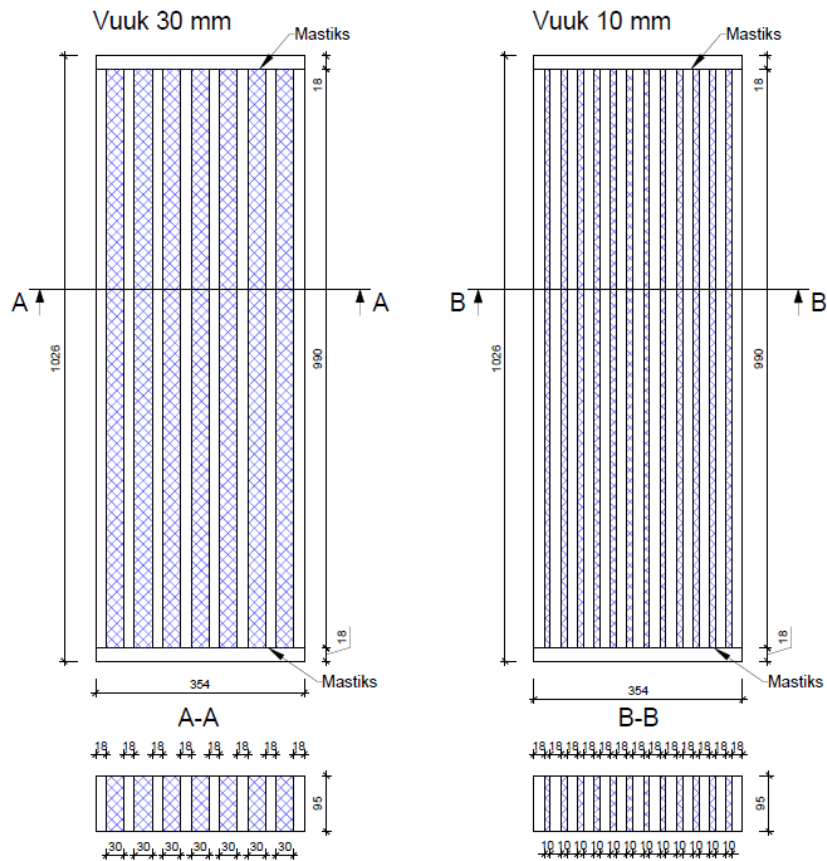
Katsekehadeks (vt Joonis 4.2 ja Joonis 4.3) on puitraamid, mille vuugid on täidetud montaaživahuga.

Puitraamid jagunevad järgmiselt:

- vuugilaiusega 10 mm ja 30 mm;
- raamide materjalina on kasutatud hööveldatud puitlaudu (SH: 18x95 mm), saelaudu (22x100 mm abc) ja hööveldatud puitlaudu (SH: 18x95 mm) PVC teibiga (PVC akende pinnaomaduste imiteerimiseks).



Joonis 4.2 Saelauast katsekehad



Joonis 4.3 Hõõveldatud lauast ning hõõveldatud lauast + PVC-kattega katsekehad

Puitraamide otsalaudade ning vertikaalsete laudade vahele on lisatud võõbatav mastiksikiht katsekehade õhupidavuse parandamiseks. Otsalauad ning vertikaalsed laudad on ühendatud omavahel kruvidega. PVC akende pinna omaduste imiteerimiseks liimiti raamide vertikaalsetele laudadele PVC teip.



Joonis 4.4 Katsekehade ettevalmistamine ja montaaživahuga täitmine



Joonis 4.5 Katsekehade montaaživahuga täitmine

Katseraamidesse lasti kolme tüüpi polüuretaan montaaživahtu, mida edaspidi nimetatakse nende värvuse järgi vastavalt „lillaks“, „siniseks“ ja „kollaseks“ montaaživahuks (vt Tabel 4.1 Katsekehatüübid ja nende koodid). Antud montaaživahte käsitletakse täpsemalt järgmises alapeatükis (vt ptk 4.2). Montaaživahud lasksid raamidesse katses osalenud tootjate esindajad,

järgides vastava toote paigaldusjuhiseid ning tagades sellega montaaživahu paigaldamise ühtlase ja kõrge kvaliteedi. Kõikidesse raamidesse lasti montaaživaht kahekihiliselt: üks kiht ühel pool raami ning teine kiht teisel pool raami.

Raamid tihendati montaaživahuga kolme päeva jooksul jaanuaris 2018 Tallinna Tehnikaülikooli Ehituskonstruksioonide teadus- ja katselaboris. Antud perioodil oli laboris sisetemperatuur +17,1...+18,5 °C ning suhteline õhuniiskus 35%...43%, mis on suhteliselt soodsad tingimused antud montaaživahtude kõvastumiseks (vt Tabel 4.2).

Iga katsekehatüüpi valmistati kolm tükki, et vähendada statistilist viga. Kokku valmistati 54 katsekeha. Iga katsekehale anti oma unikaalne kood kiireks katsekeha tuvastamiseks (vt Tabel 3.1):

Nt 1L10SL,

kus

- 1 - tähistab, mitmenda katsekehaga kolmest sama tüüpi katsekehast on tegemist, antud juhul esimene katsekeha; „X“ numbri asemel tähistab kolme sama tüüpi katsekeha katsetulemuste aritmeetilist keskmist;
- L - montaaživaht, antud juhul „lilla“;
- 10 - vuugi laius, antud juhul 10 mm;
- SL - raami puitmaterjal, antud juhul saelaud.

4.2 Uurimistöodes käsitletavat montaaživahud

Soudal Flexifoam Gum (<https://www.soudal.ee>) on ühekomponentne isepaisuv ja kasutusvalmis polüuretaan püstolivaht. Antud vaht on kolm korda elastsem kui tavaline ehitusvaht, mistõttu on see sobiv kasutamiseks liikuvates ühenduskohtades ehitustöodel. Teisteks positiivseteks omadusteks on õhukindlus, kõrge soojus- ja heliisolatsioon ning väga hea vormistabiilsus ning head täiteomadused. Vaht nakkub enamike ehitusmaterjalidega (v.a PE, PP ja PTFE). Kasutusalaudeks on staatilised ning mittestaatilised ühenduskohad ehitustöodel ning akna- ja ukseraamide paigaldamine.

Soudal kollane püstolivaht (<https://www.soudal.ee>) on ühekomponentne isepaisuv ja kasutusvalmis polüuretaanvaht. Antud vahtu iseloomustab hea soojus- ja heliisolatsioon ning väga head täite- ja vormistabiilsuse omadused. Antud vaht nakkub enamike ehitusmaterjalidega (v.a PE, PP ja PTFE). Kasutusalaudeks on akna- ja ukseraamide paigaldamine, tühimike täitmine, isolatsioonimaterjalide kinnitamine jne.

Enerest Poroloon Gunfoam (<http://www.enerest.ee>) on ühekomponentne polüuretaan püstolivaht. Antud vahtu iseloomustavad head elastsusomad ja madal paisumissurve, lisaks hea soojus- ja heliisolatsioon. Lisaks on vahul väga head liimivad omadused ning see nakkub hästi enamike ehitusmaterjalidega (v.a PE, silikoonpinnad ja PTFE). Elastsusest tingituna on vahu fikseerivad omadused võrreldes tavavahtudega väiksemad. Sobib hästi kasutuskohtadesse nagu puit- ja palkmajade vuugid, kus on oluline ehitusvahu elastsed omadused ning minimaalne paisumissurve.

Kõigi käsitletavate montaaživahtude puhul peab tihendatava vuugi pind olema vaba tolmust, lahtistest osakestest ning õlist. Vuugipinda tuleb enne vahulaskmist veega niisutada, et vaht kiiremini kõvastuks, paremini nakuks ühendatava pinnaga ning omandaks tihedama struktuuri. Õhutemperatuur töö teostamisel peab olema -10 °C (Soudal Flexifoami puhul +5 °C)... +30 °C (<https://www.soudal.ee>, <http://www.enerest.ee>).

Tabel 4.2 Montaaživahtude omadused (<https://www.soudal.ee>, <http://www.enerest.ee>)

Toode	Sideaine	Struktuur	Kõvenemis-süsteem	Tihedus $\frac{kg}{m^3}$	Mahukahanemine %	Järelpaisumine %	Pindkuivamine/kiletekkimine min	Tardumine vuugis
Enerest Poroloon	Polüuretaan	-	Niiskuse toimel	15 - 20	< 5	< 40	10 – 14	≤18 h (+23 °C) ≤24 h (+5 °C)
Soudal kollane vaht	Polüuretaan	70% .80% suletud poore, keskmiselt peen	Niiskuse toimel	Umbes 24	Puudub	Puudub	7	1 h 20 mm riba (+20 °C, suhetline niiskus 65%)
Soudal Flexifoam	Polüuretaan	Peen	Niiskuse toimel	Umbes 25	< 5	< 5	7	40 min

4.3 Mõõtmine

Katsekehade õhulekke testimisel on lähtutud standardist EVS-EN 12114:2000.

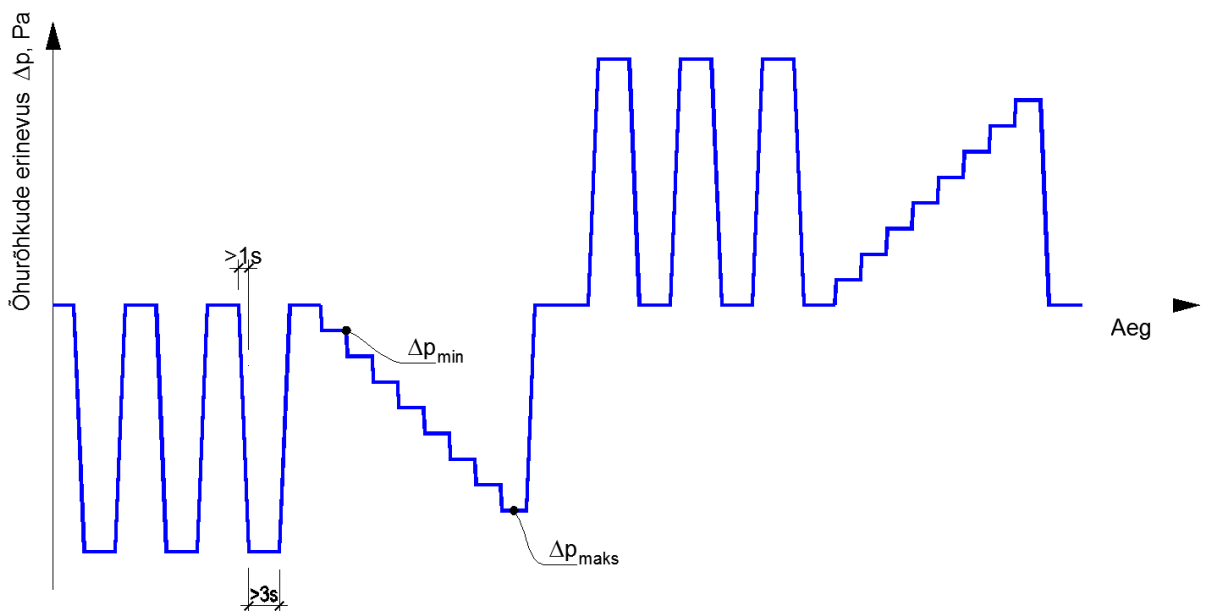
Standard näeb ette, et katsekehale rakendatav positiivne (või negatiivne) rõhk suureneb (või väheneb) astmete kaupa. Maksimaalne lubatav rõhuastme suurus (kui katsetavale tootele puuduvad täpsemad juhised) Δp_{max} võib olla järgnev: 50 Pa, 100 Pa, 200 Pa, 500 Pa, 1000 Pa. Δp_{max} rakendamisel ei tohi tekkida katsekehale pöördumatuid kahjustusi.

Väikseim õhurõhu erinevus Δp_{max} peab olema selline, mida on võimalik mõõta täpsusega <5 %. Väikseim õhurõhu erinevus ei või siiski olla <1/5 Δp_{max} .

Astmete arv Δp_{max} ja Δp_{max} väärtuste vahel (Δp_{max} ja Δp_{max} kaasarvatud) valitakse nii, et astmete minimaalne arv oleks $N \geq 6$ (≥ 7 mõõtepunkti).

Rõhuastmete seeriale eelnevad kolm rõhuimpulssi, mille maksimaalne väärtus peab olema 10-15 % suurem Δp_{max} väärtusest. Õhurõhu tõusu kestvus peab olema vähemalt üks sekund ning õhurõhu kestvus impulsi ajal peab olema vähemalt kolm sekundit.

Δp_{min} ja Δp_{max} väärtused valiti vastavalt antud katsekeha õhutihedusele. Sammuks liikumisel väärtusest Δp_{min} kuni väärtuseni Δp_{max} valiti 50 Pa. Rõhuastmete seeriale eelneva kolme rõhuimpulsi maksimaalsed väärtused valiti 10-15 % suuremad Δp_{max} väärtusest. Iga rõhuastme- ja impulsi ajaline kestvus oli 30 sek.

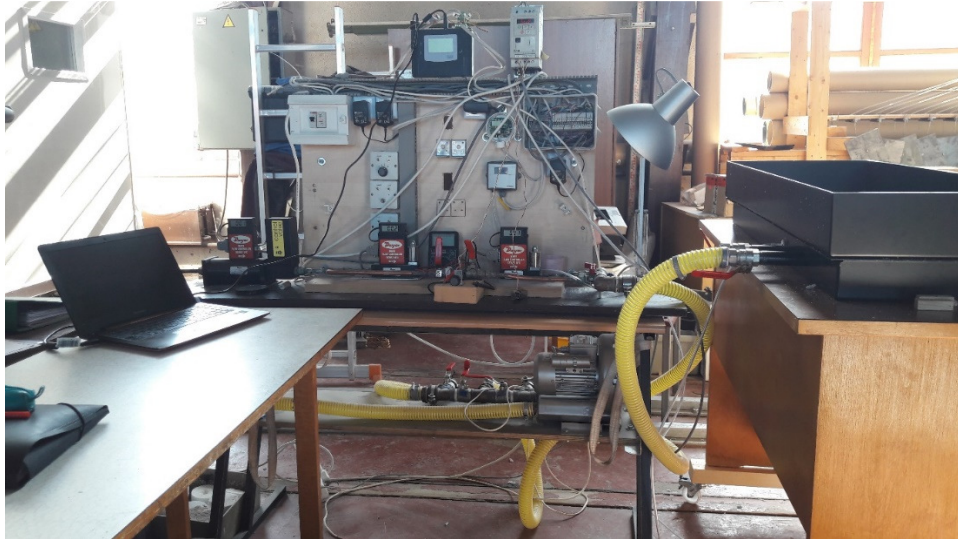


Joonis 4.6 Õhurõhkude idealiseeritud muutus ajas (EVS-EN 12114:2000)

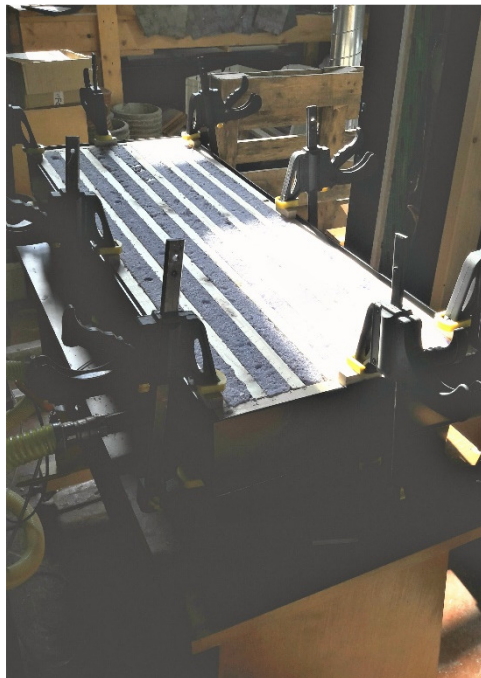
4.4 Mõõteseadmed

Mõõtestendi osad jaotuvad funktsiooni järgi kolme rühma:

- hermeetiline lekkekamber, kuhu paigutatakse katsekeha;
- õhurõhkude erinevuse tekitamise ja muutmise seadmed;
- õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse mõõtmise seade (täpsus < 5%, EVS-EN 12114:2000).



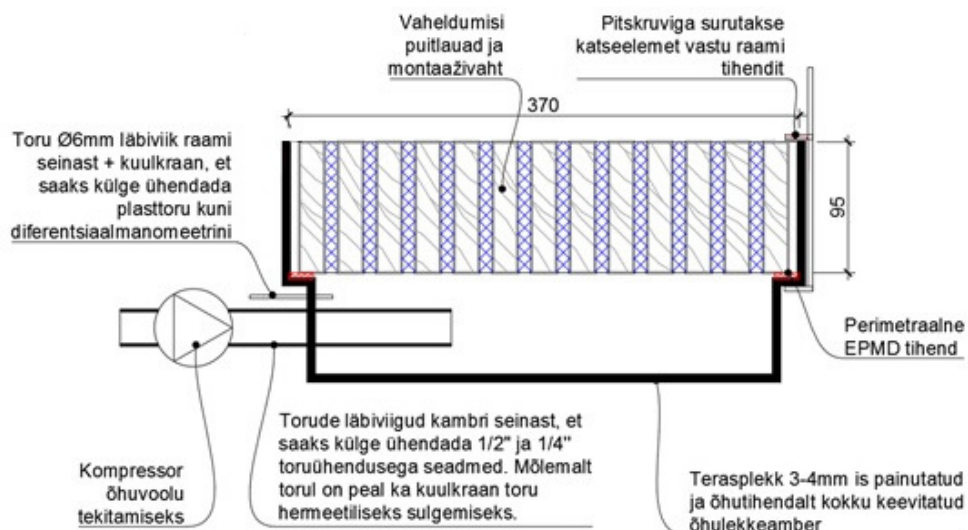
Joonis 4.7 Katsestend ja lekkekamber TTÜ laboris



Joonis 4.8 Katsekeha lekkekambrisse sängitatult ja pitskruvidega tihendatult

4.4.1 Hermeetiline lekkekamber

Katsekamber on 3-4 mm paksusest plekist (vat Joonis 3.7), mis on painutatud ning kokku keevitatud. Katsekambri suhteliselt väikesed mõõtmed (kambri ülemine ja suurem osa 1042 mm x 376 mm ning alumine väiksem kambriosa 1000 mm x 334 mm) tagavad suletud kambris õhurõhu piisavalt kiire leviku.



Joonis 4.9 Hermeetiline lekkekamber

4.4.2 Õhurõhkude erinevuse tekitamise ja muutmise seadmed

Külgkanalpuhur Elmo Rietschle G-BH1 (<http://www.gd-elmorietschle.com>) suudab tekitada õhuvoolu $50-2450 \text{ m}^3/\text{h}$ ning diferentsiaalrõhku kuni 78 kPa. Seadme positiivseteks omadusteks on madalad hoolduskulud ja madal müratase.

Kompaktne sagedusmuundur EATON DC1-S24DNN-A20N (<http://www.eaton.eu>) võimsusega 0,37kW kuni 22kW sobib just ventilaatorite, pumpade ja konveierite käivitamiseks tänu seadme lihtsale paigaldamisele, ühendamisele ja seadistamisele. Lõputöös käsitletavates katsetes kasutati seadet külgkanalpuhuri Elmo Rietschle käivitamiseks ja juhtimiseks.

Dwyer GFC vooluhulkade mõõtja (<http://www.dwyer-inst.com>) on varustatud torusensoriga, tänu millele on võimalik seadet läbivaid õhuvooluhulkasid täpselt reguleerida. Lõputöös käsitletavates katsetes kasutati kolme Dwyer vooluhulga mõõtjat: GFC 1109 - mõõtepiirkond 0-5l/min, täpsus $\pm 1,5\%$ mõõtepiirkonnast; GFC 1131 – mõõtepiirkond 0-30l/min, täpsus $\pm 1,5\%$ mõõtepiirkonnast; GFC 1144 – mõõtepiirkond 0-500l/min, täpsus mõõtepiirkonna vahemikus 0-20% $\pm 3\%$, 20-100% vahemikus $\pm 1,5\%$ mõõtepiirkonnast.

Diferentsiaalmanomeetrit Produal PEL-DK-d (<http://www.produal.com>) kasutatakse rõhuerinevuste mõõtmiseks ventilatsioonisüsteemides. Lõputöös käsitletavates katsetes kasutati seadet rõhuerinevuste mõõtmiseks vahemikus 0-1000Pa, täpsus $\pm 1\%$ mõõtepiirkonnast. Õhuvoolu ja õhurõhu erinevuse mõõtmise seade.

Grant Squirrel SQ 2010 (<http://www.grantinstruments.com>) on 4 kuni 8 analoogkanaliga ja 8 digitaalkanaliga üldkasutatav andmeloger. Seadme täpsus on 0,1% ning võimaldab lugeda kuni 10

näitu ühel kanalil. Kõiki kanaleid on võimalik kasutada näitude lugemise automaatselt alustamiseks kui ka lõpetamiseks.

Seadme kasutamiseks tuleb arvutisse alla laadida Squirrel View programm, mis on Internetis saadaval ka tasuta versioonina. Squirrel View programmi kaudu on võimalik käivitada ja lõpetada loggeri näitude lugemine ning jälgida reaajas graafiliselt näitude väärtusi. Liskaks võimaldab programm salvestatud näidud laadida Exceli failina arvutisse.

4.4.3 Hermeetilise lekkekambri omalekke määramine

Katsete seeriale eelnevalt tuleb määrata lekkekambri omalekke. Selleks tuleb katta lekkekamber õhukindla kaanega, kaas fikseerida ning sulgeda lekkekambri tühjenduskraan. Järgmisena tuleb mõõta rõhk lekkekambri küljkanalipuhuri minimaalse tootlikkuse juures ja mõõta sellele vastav õhuvooluhulk. Kui lekkekambri rõhk on $< 1,2$ - kordsest soovitatavast Δp_{max} -st, tuleb tõsta küljkanalipuhuri tootlikkus sellisele tasemele, et vajalik rõhk oleks saavutatud.

Kui kanda kahe saadud küljkanalipuhuri tootlikkuse punkti väärtused (l/min) graafikule ja ühendada sirgega, siis saab määrata piisava täpsusega lekkekambri omalekke. Kui õhulekke vooluhulk nominaalrõhu juures on $< 0,05$ l/min, võib lekkekambri omalekke arvestamata jätta.

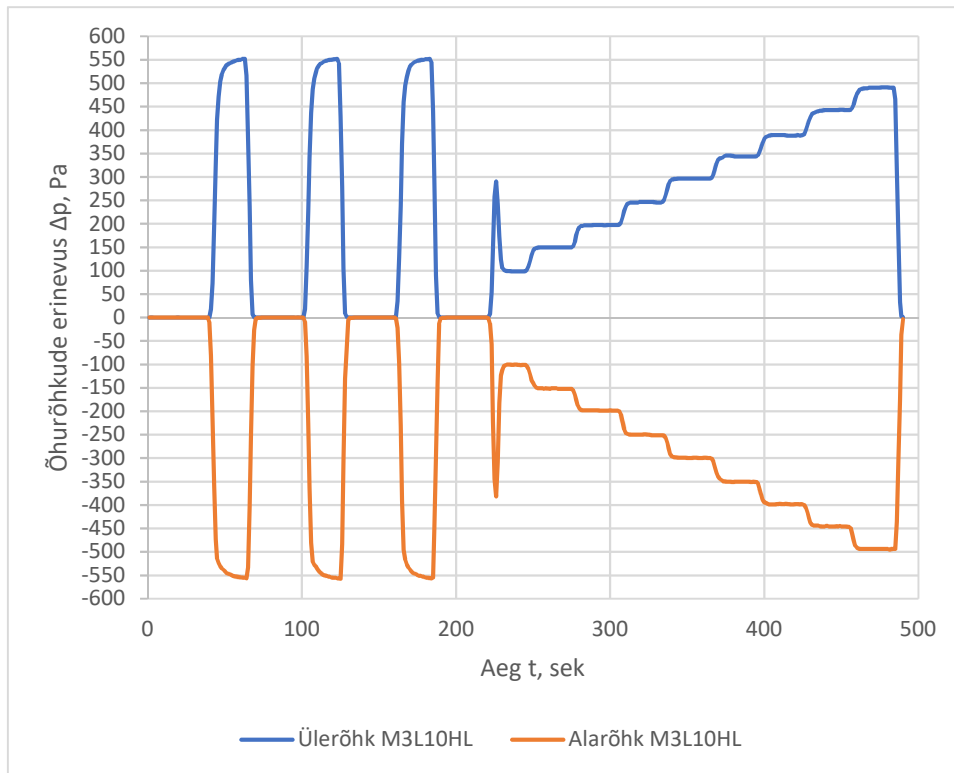
Antud uurimisprogrammi katsetes kasutatava lekkekambri omalekke väärtus nominaalrõhu juures oli $< 0,05$ l/min. Seega katsete tulemuste korrigeerimisel lekkekambri omaleket ei arvestatud.

4.4.4 Katse käik

Katsestend tuleb sisse lülitada minimaalselt 30 minutit enne esimese katse algust, et katsestendi elektroonikablokid stabiliseeruksid normaalsesse tööolekusse. Järgnevalt tuleb arvutiga ühendada andmeloger ning avada arvutis programm Squirrel View, et kontrollida üle loggeri seadistused. Järgmise sammuna tuleb seadistada paika õhuvooluhulga mõõtjate nullpunktid. Järgnevalt kontrollida katseseade kraanide vastavust vastavalt üle- või alarõhu tekitamiseks lekkekambri ning kontrollida õhuvooluhulga mõõtjate kraanide asendit, et need vastaks eeldatavale mõõdetavale õhuvooluhulgale. Järgmisena tuleb asetada katsekeha lekkekambri ja fikseerida pitskruvidega. Sulgeda lekkekambri tühjenduskraan.

Esmalt tekitatakse lekkekambri ülerõhk ning järgnevalt alarõhk. Ülerõhk tekib, kui õhuvool juhitakse mõõtmeseadmete kaudu lekkekambri ja alarõhk tekib, kui õhuvool juhitakse lekkekambri mõõtmeseadmete kaudu välja. Andmeloger loeb nii õhuvooluhulga (l/min) kui ka õhurõhkude erinevuse (Pa) näitusid. Peale näitude alla laadimist Exceli failina arvutisse koostatakse näitudest õhurõhkude erinevuste graafik (vat Joonis 3.8) ja õhulekke graafik (vat ptk 4.1). Õhurõhkude erinevuste graafik väljendab õhurõhkude erinevuste (Pa) muutust ajas (sek). Antud

graafikutüübi põhjal saab hinnata katse õnnestumist (kas rõhuimpulsid ning rõhuastmete seeria joonistuvad graafikul piisavalt selgelt välja).



Joonis 4.10 Näidis õhurõhkude erinevuse graafikust

Õhulekke graafik näitab õhuvooluhulga (l/min) suurust vastava stabiliseerunud õhurõhkude erinevuse juures (Pa). Eraldi koostatakse graafikud ülerõhukatses ning alarõhukatses saadud tulemustele.

Õhulekke graafikule koondatakse sama tüüpi katsekehade tulemused. Keskmise tulemuse trendijoon (ülerõhu graafikutel roheline joon, alarõhu graafikutel kollane joon) koostatakse graafikul näidatud katsete aritmeetiliste keskmiste põhjal. Saadud trendijoonete valemite põhjal arvutatakse õhuvooluhulk (l/min) (EVS-EN 16798-7:2018).

Kõik katsekehad läbisid kaks katsefaasi. Esimene faas viidi läbi nii, et puitraamist väljaulatuv montaaživaht oli lõikamata. Teine faas viidi läbi pärast puitraamist välja ulatuva montaaživahu lõikamist puidupinnaga tasa (vat Joonis 3.9). Esimese faasi katse tulemuse presenteerimisel on katsekeha koodi algusesse lisatud „M“ (nt M3L10HL) ja teise faasi katse tulemuse presenteerimisel on katsekeha koodi algusesse lisatud „L“ (nt L3L10HL).



Joonis 4.11 Katsekehast väljaulatuva vahu lõikamine

Igale katsekehale märgiti nool näitamaks, mispidi katsekeha lekkekambrisse sängitada. Selle meetodiga prooviti minimeerida sängitamisest tulenevate katsetulemuste erinevust.

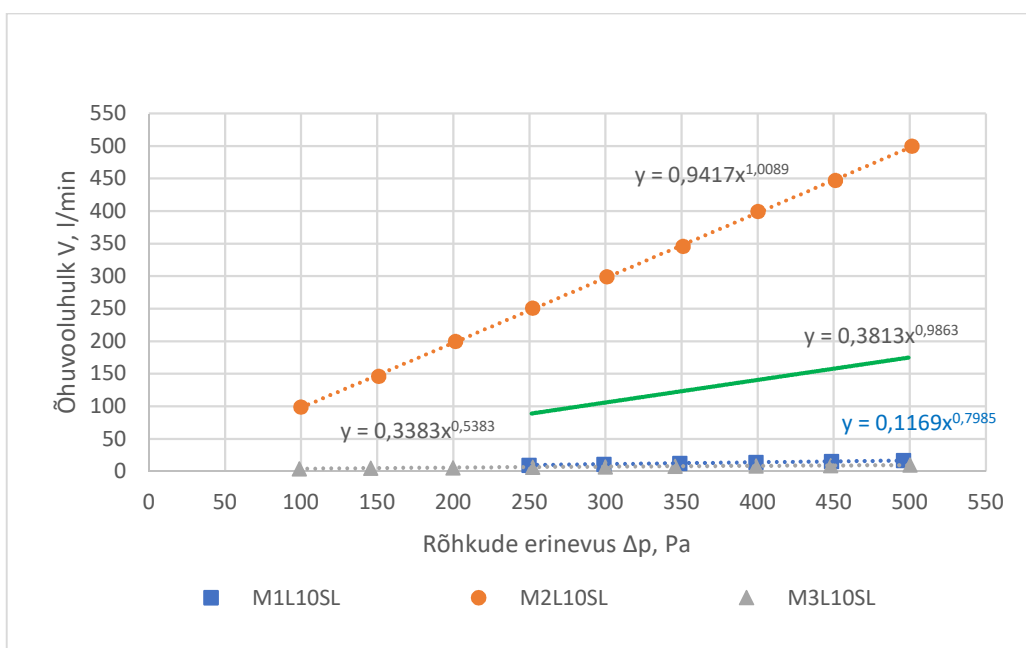
Iga päev enne uue katsete seeria alustamist märgiti üles labori sisetemperatuur ning suhteline niiskus seinal asuvalt hügro-termomeetrilt. Katsete teostamise perioodil 22. veebruar - 3. mail 2018 varieerus sisetemperatuur $+18,9^{\circ}\text{C}$... $+23,5^{\circ}\text{C}$ ning suhteline niiskus 21%...35%, mis oli nõuete (EVS-EN 12114:2000) järgi kohati liiga madal.

5 TULEMUSED

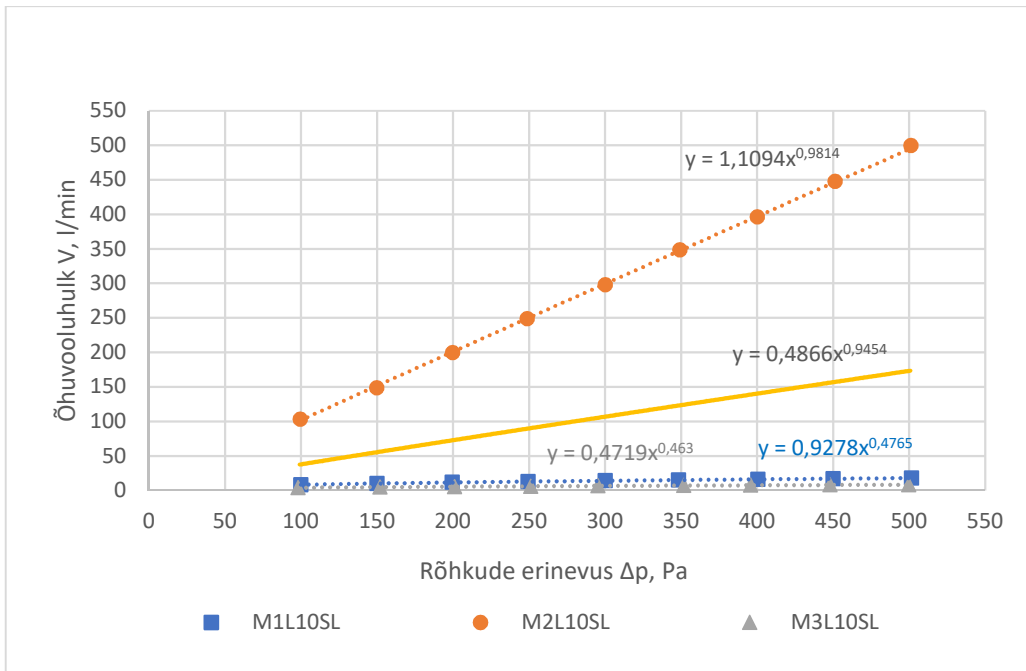
5.1 Tulemused katsekehatüüpide kaupa

5.1.1 Lõikamata montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 10 mm

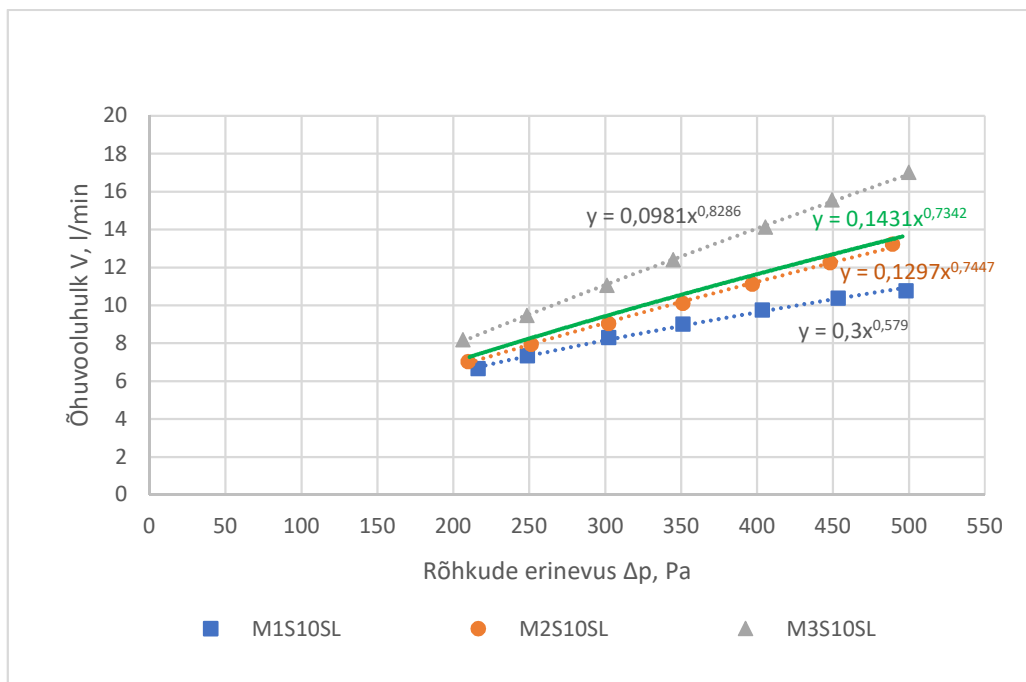
9-st antud tüüpi katsekehast 5 katsekeha (56%) (vt Joonis 5.1, Joonis 5.3, Joonis 5.4) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik tekitada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses. Kahe katsekeha (22%) (vt Joonis 5.1, Joonis 5.4) puhul ei saavutatud nõutavat 7-t mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



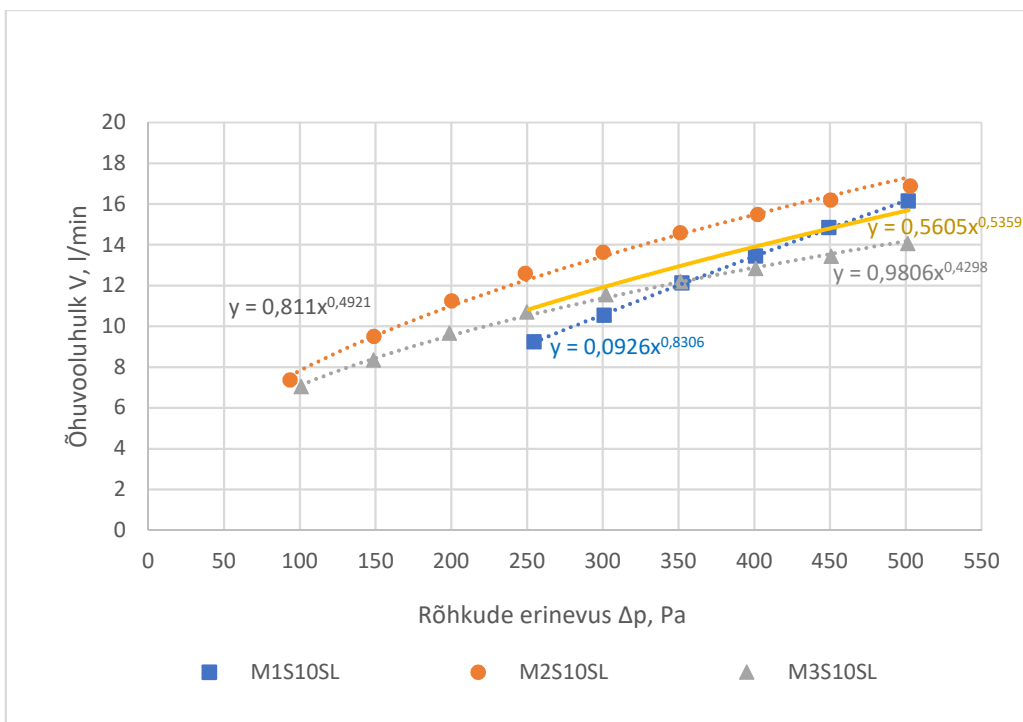
Joonis 5.1 MXL10SL, ülerõhk



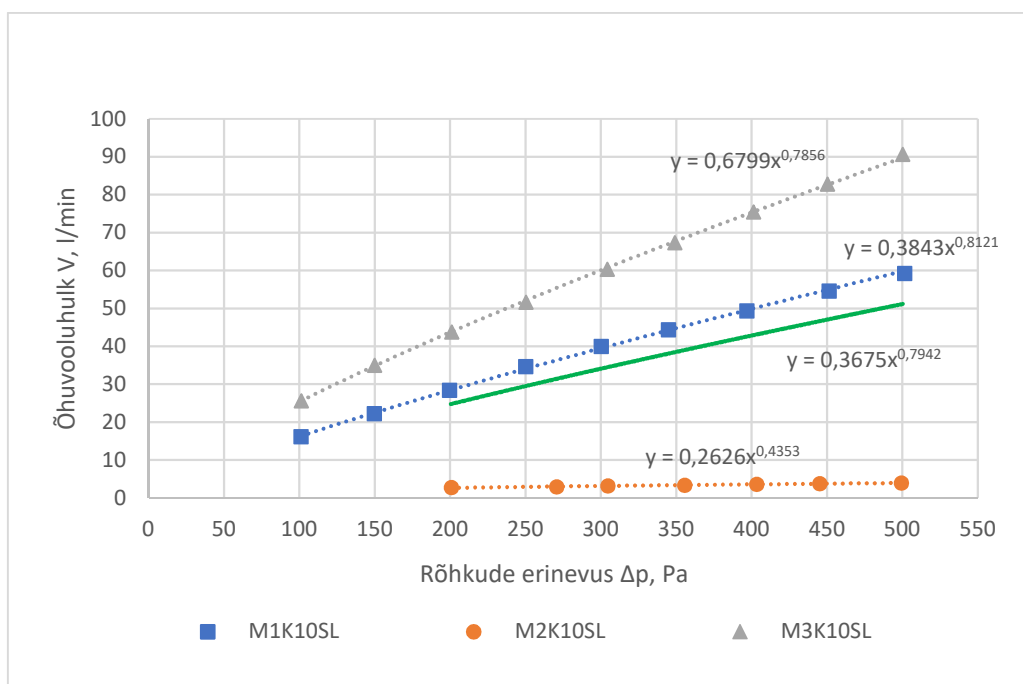
Joonis 5.2 MXL10SL, alarõhk



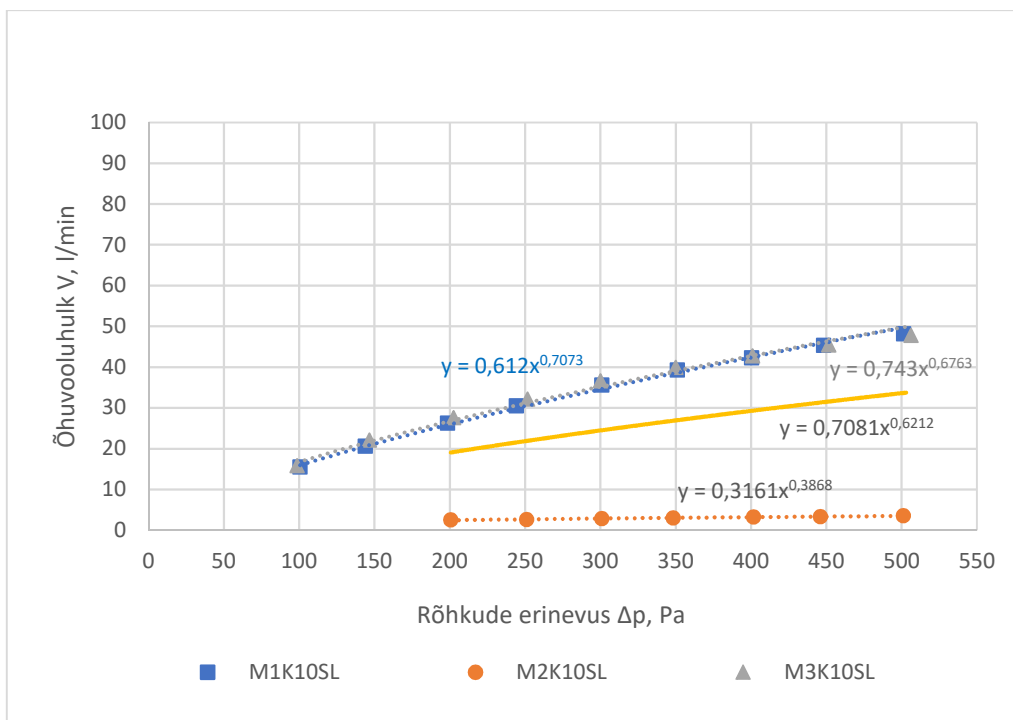
Joonis 5.3 MXS10SL, ülerõhk



Joonis 5.4 MXS10SL



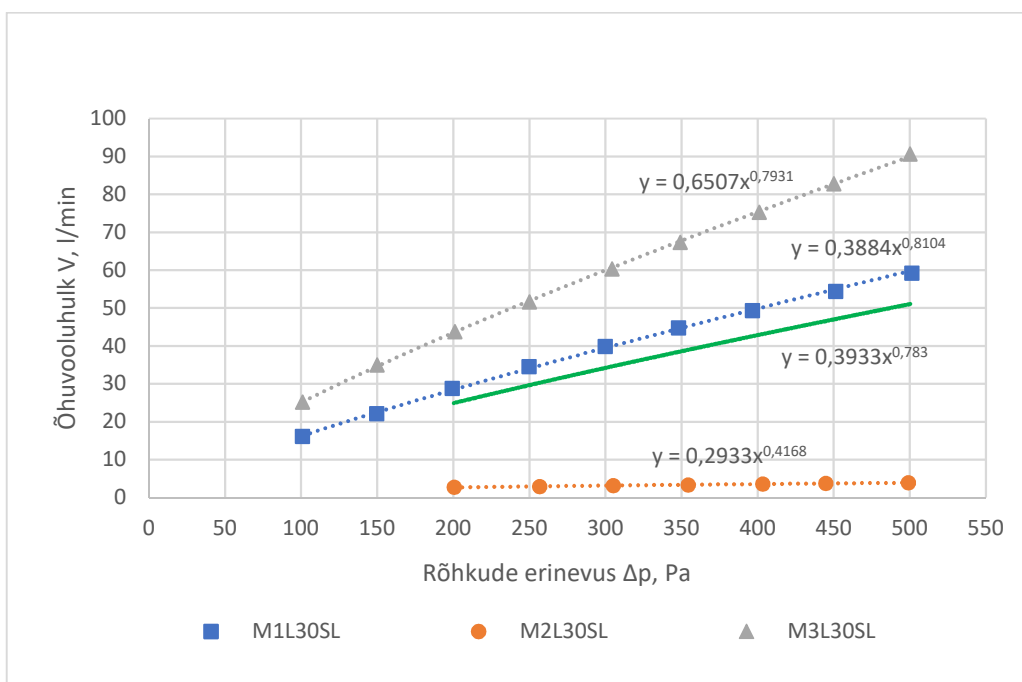
Joonis 5.5 MXK10SL, ülerõhk



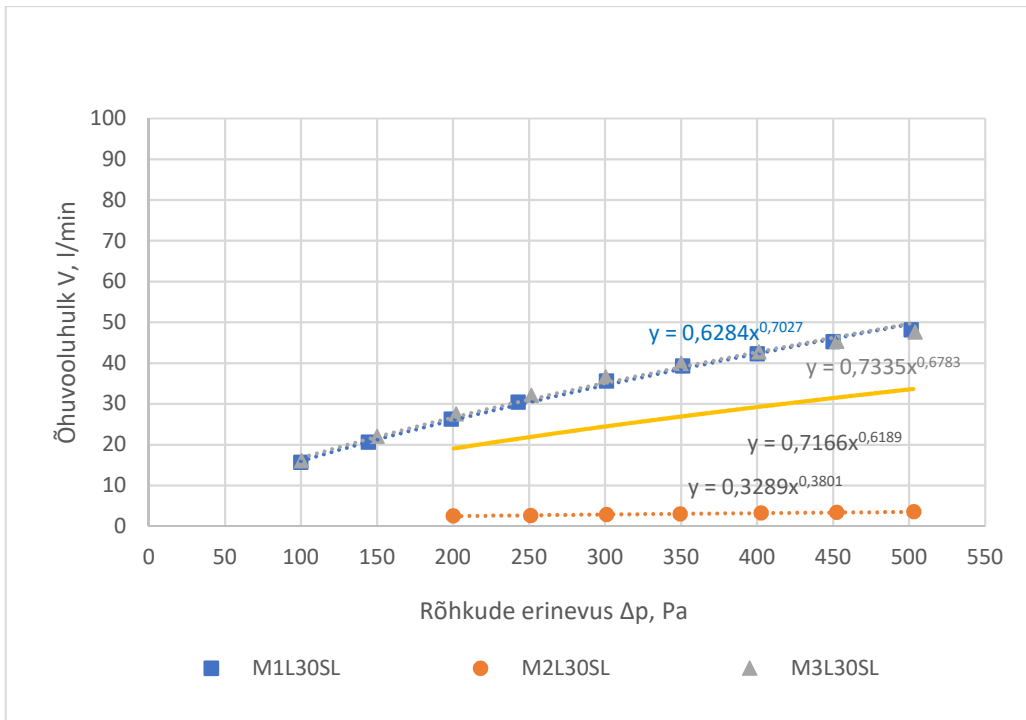
Joonis 5.6 MXK10SL, alarõhk

5.1.2 Lõikamata montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 30 mm

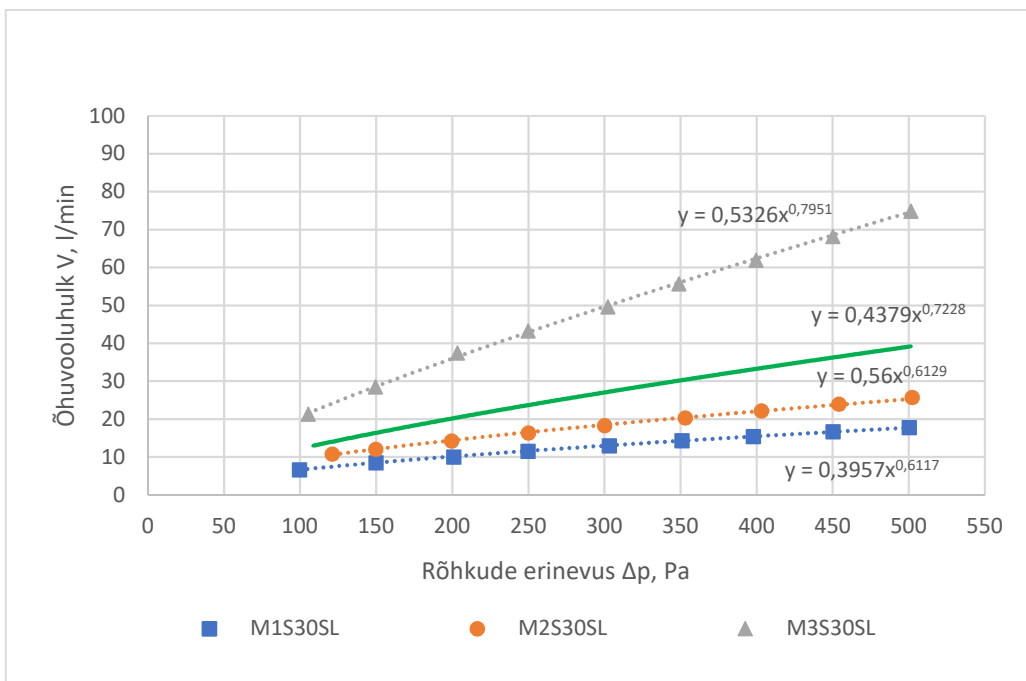
9-st antud tüüpi katsekehad kaks katsekeha (22%) (Joonis 5.7, Joonis 5.8, Joonis 5.10) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses (EVS-EN 12114:2000).



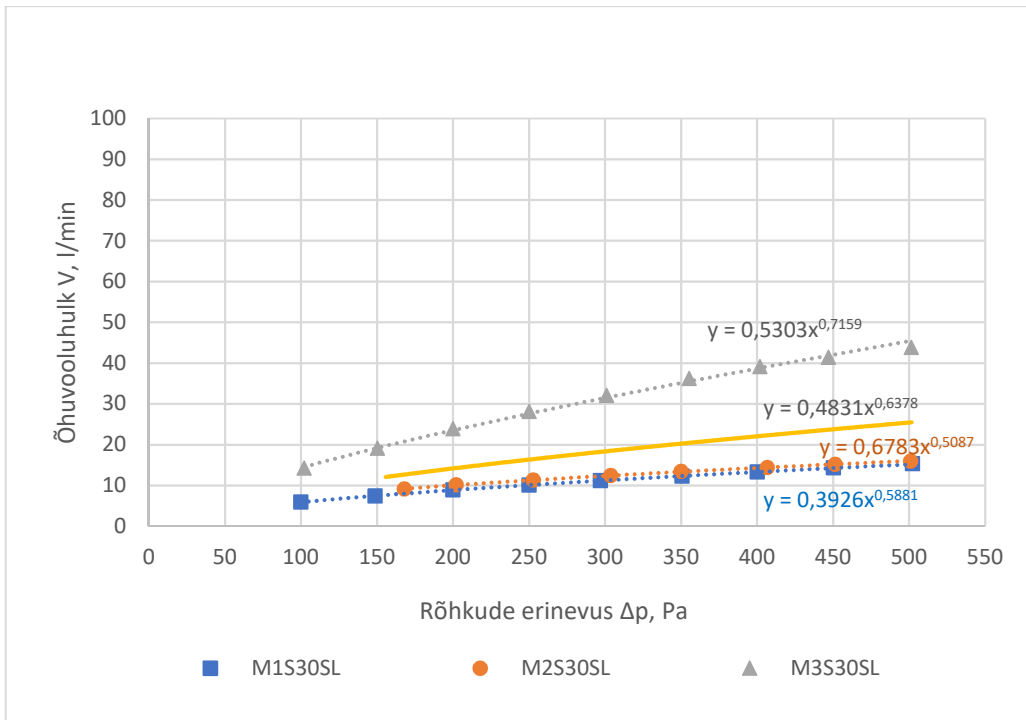
Joonis 5.7 MXL30SL, ülerõhk



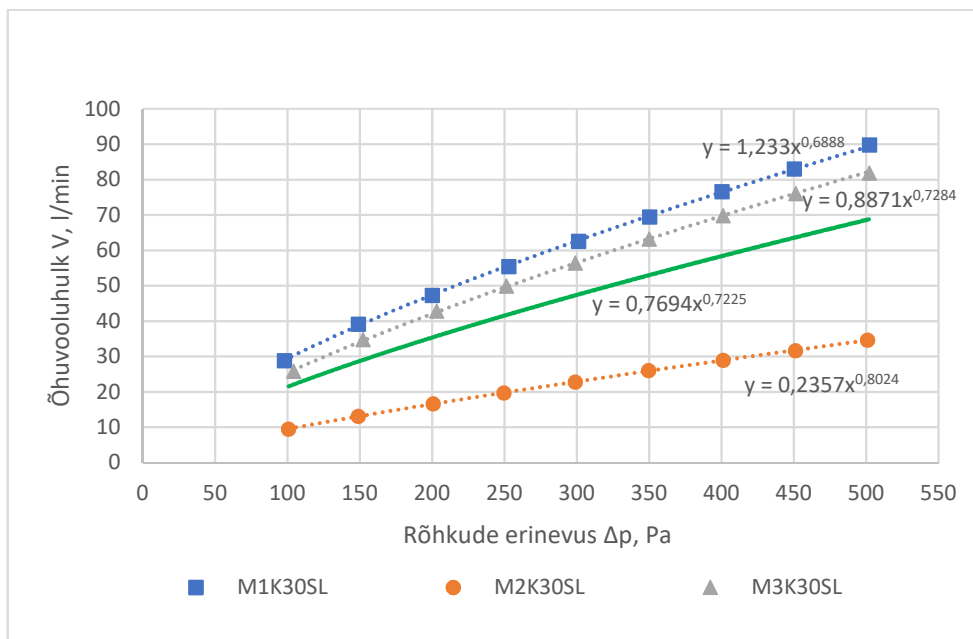
Joonis 5.8 MXL30SL, alarõhk



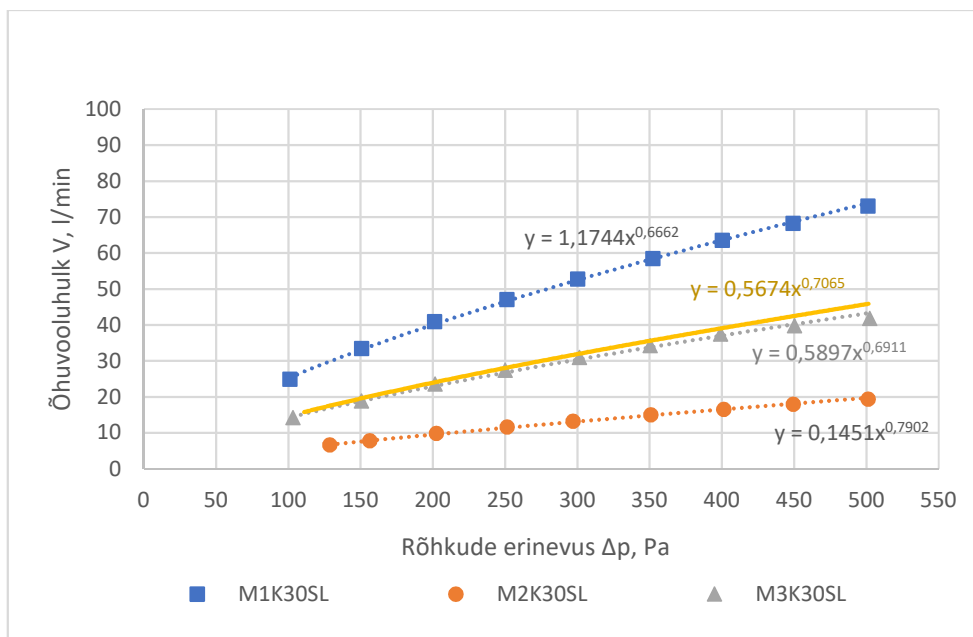
Joonis 5.9 MXS30SL, ülerõhk



Joonis 5.10 MXS30SL, alarõhk



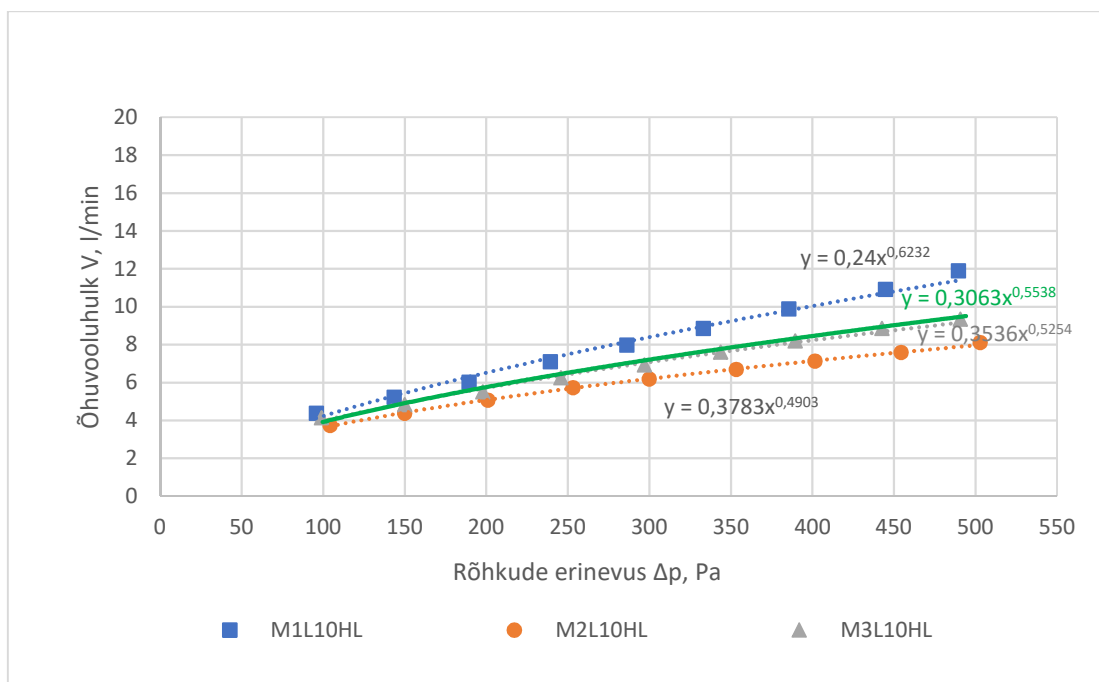
Joonis 5.11 MXK30SL, ülerõhk



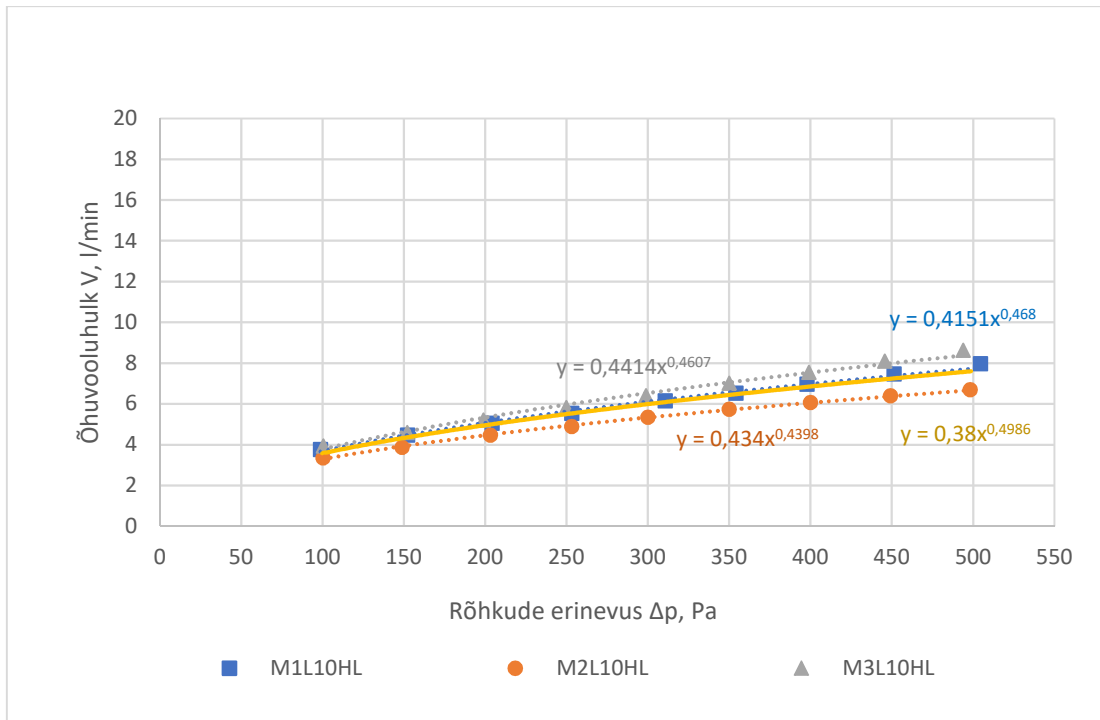
Joonis 5.12 MXK30SL, alarõhk

5.1.3 Lõikamata montaaživahuga hõvellaust katsekehad vuugiga 10 mm

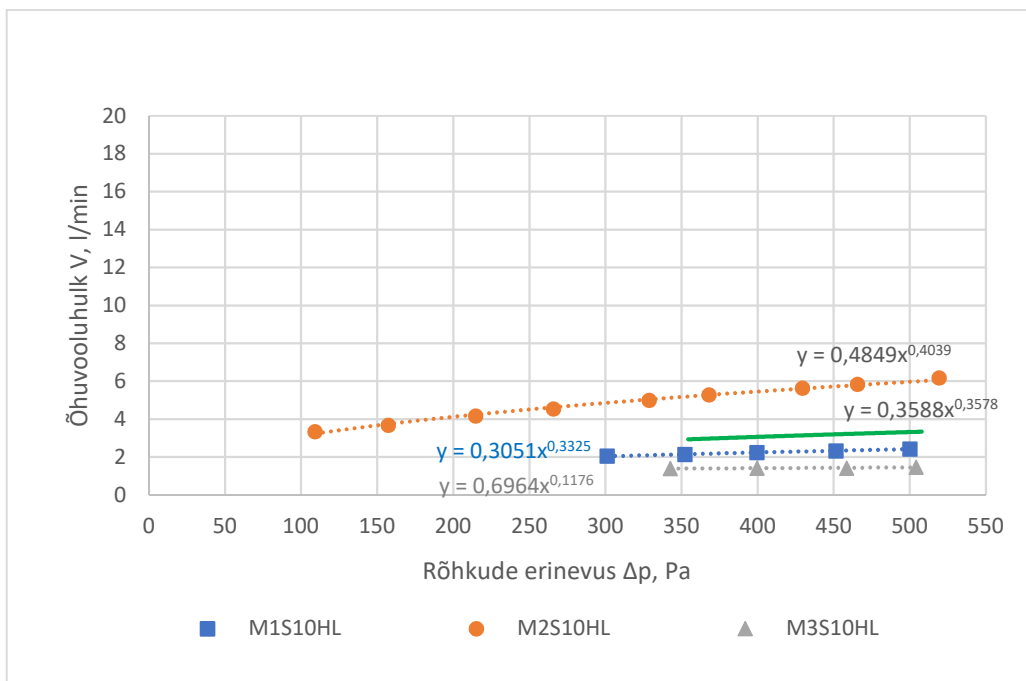
9-st antud tüüpi katsekehast 5 katsekeha (56%) (vt Joonis 5.15, Joonis 5.16, Joonis 5.17, Joonis 5.18) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses. Nende katsekehade puhul ei saavutatud ka nõutavat 7-t mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



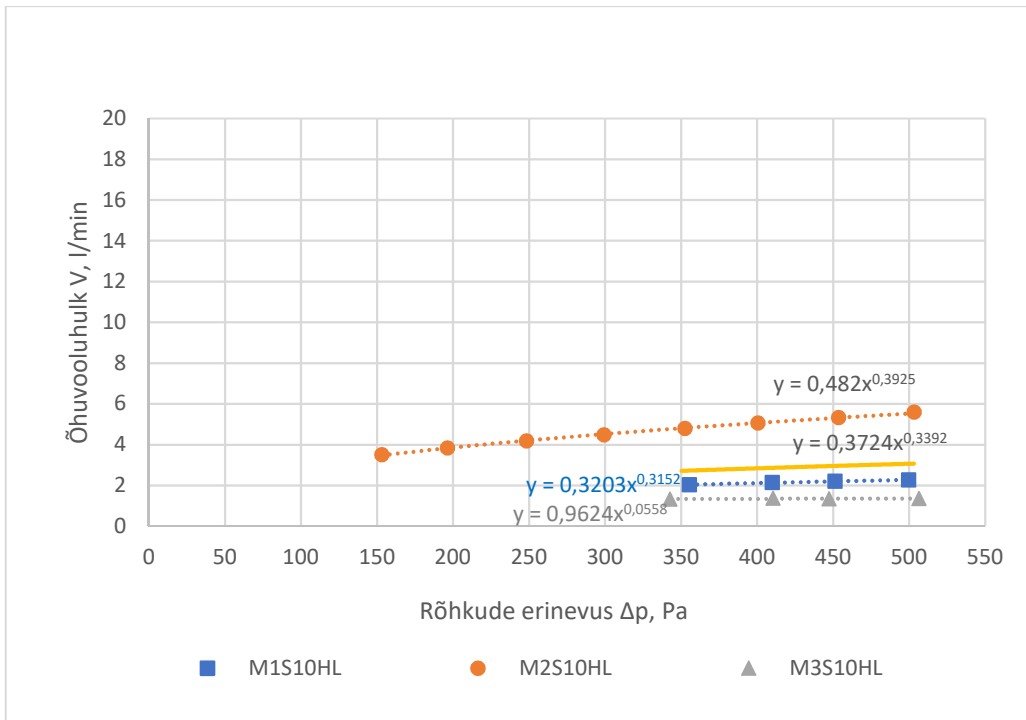
Joonis 5.13 MXL10HL, ülerõhk



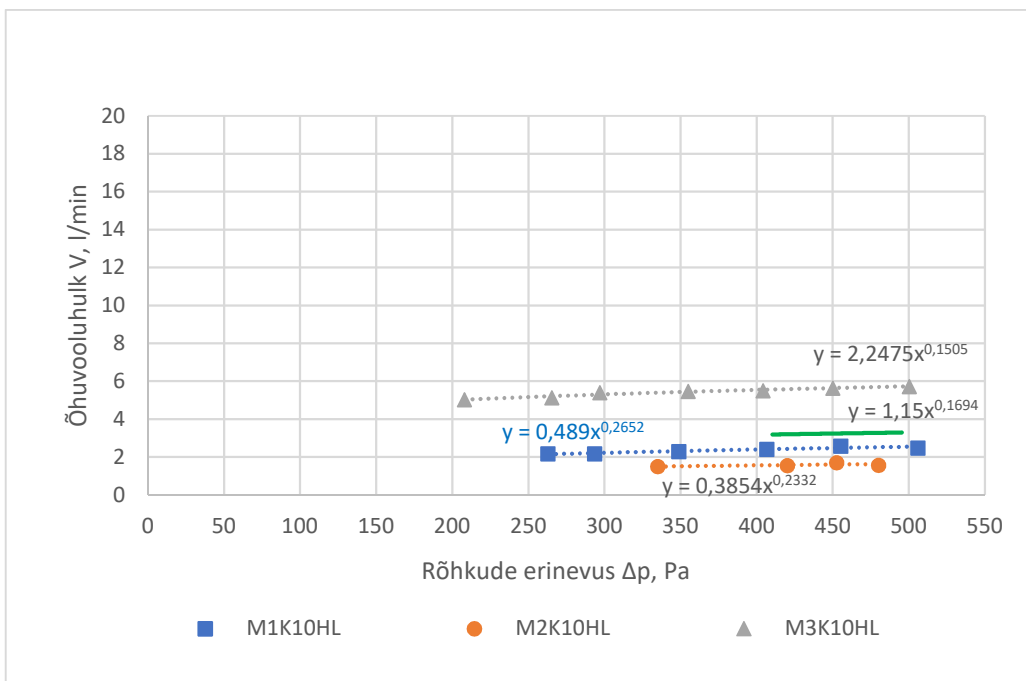
Joonis 5.14 MXL10HL, alarõhk



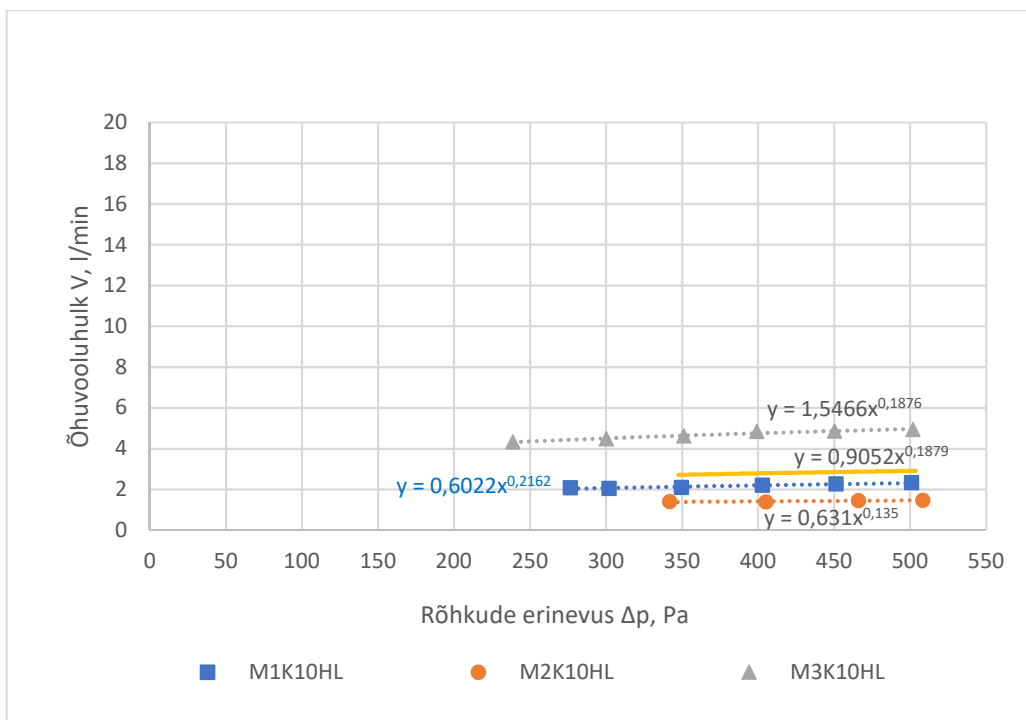
Joonis 5.15 MXS10HL, ülerõhk



Joonis 5.16 MXS10HL, alarõhk



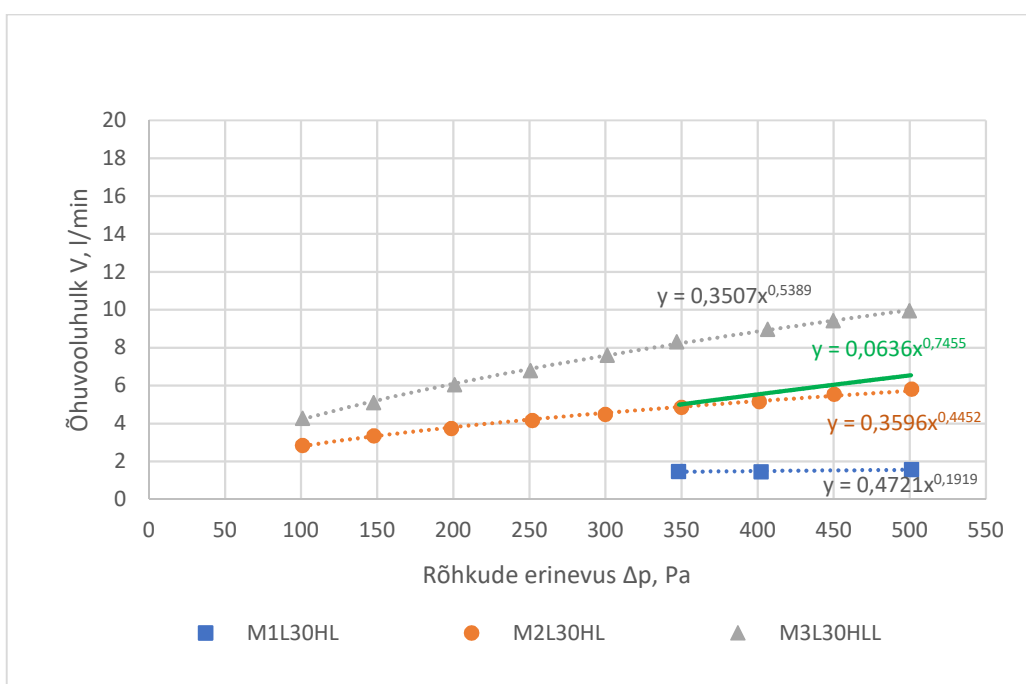
Joonis 5.17 MXK10HL, ülerõhk



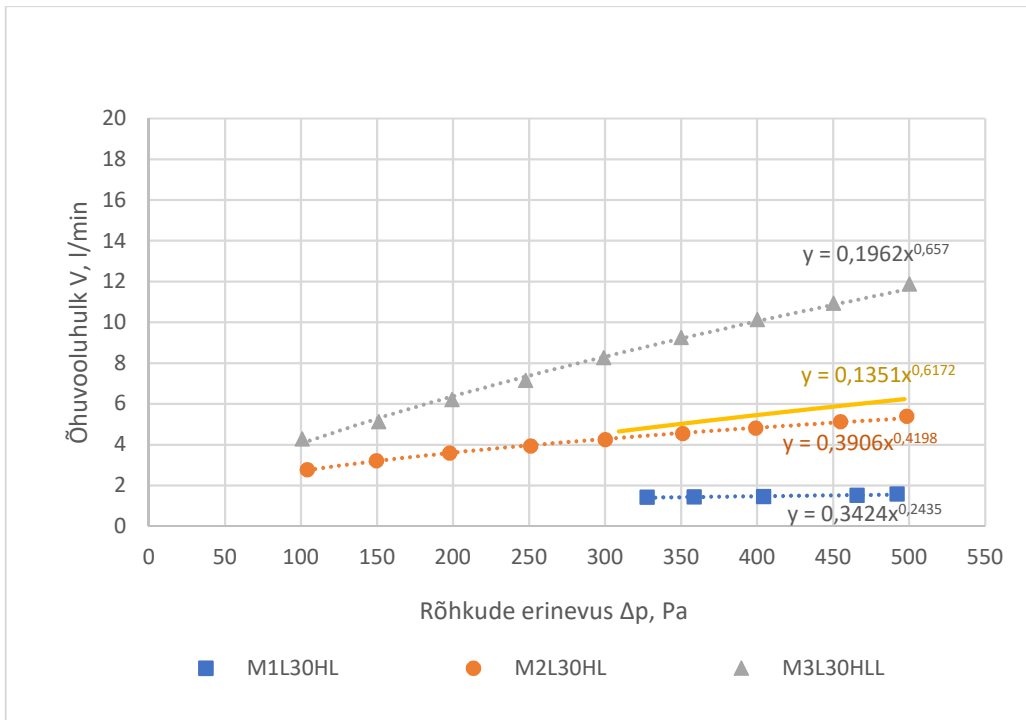
Joonis 5.18 MXK10HL, alarõhk

5.1.4 Lõikamata montaaživahuga hõvellaust katsekehad vuugiga 30 mm

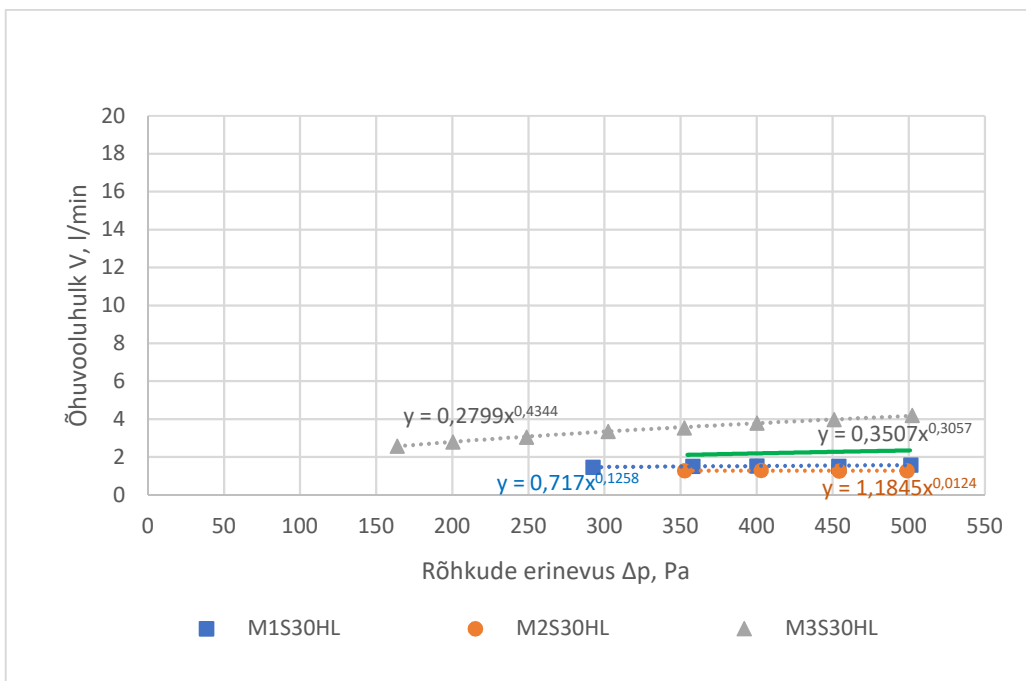
9-st antud tüüpi katsekehast 5 katsekeha (56%) (vt Joonis 5.19, Joonis 5.20, Joonis 5.21, Joonis 5.22, Joonis 5.23, Joonis 5.24) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik tekitada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses. Nende katsekehade puhul ei saavutatud ka nõutavat 7-t mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



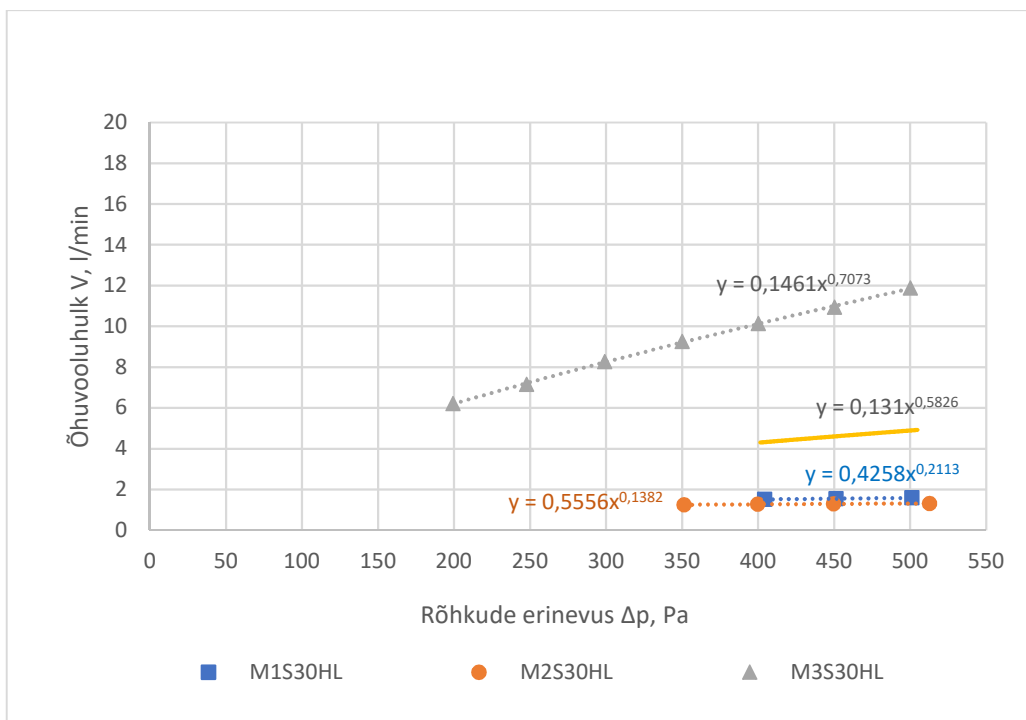
Joonis 5.19 MXL30HL, ülerõhk



Joonis 5.20 ML30HL, alarõhk

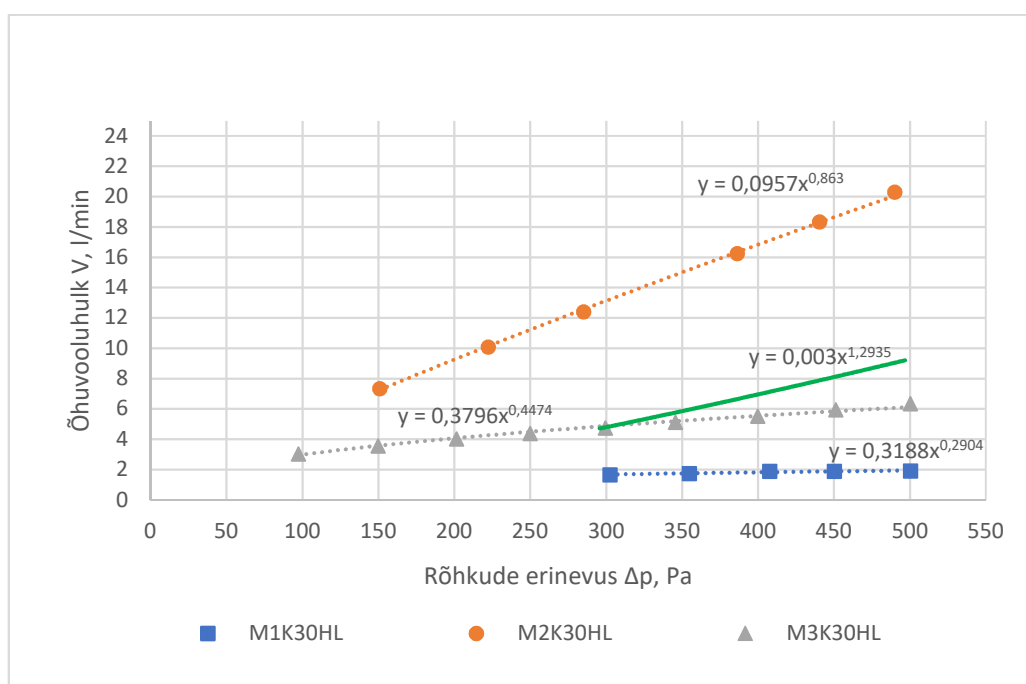


Joonis 5.21 MXS30HL, ülerõhk

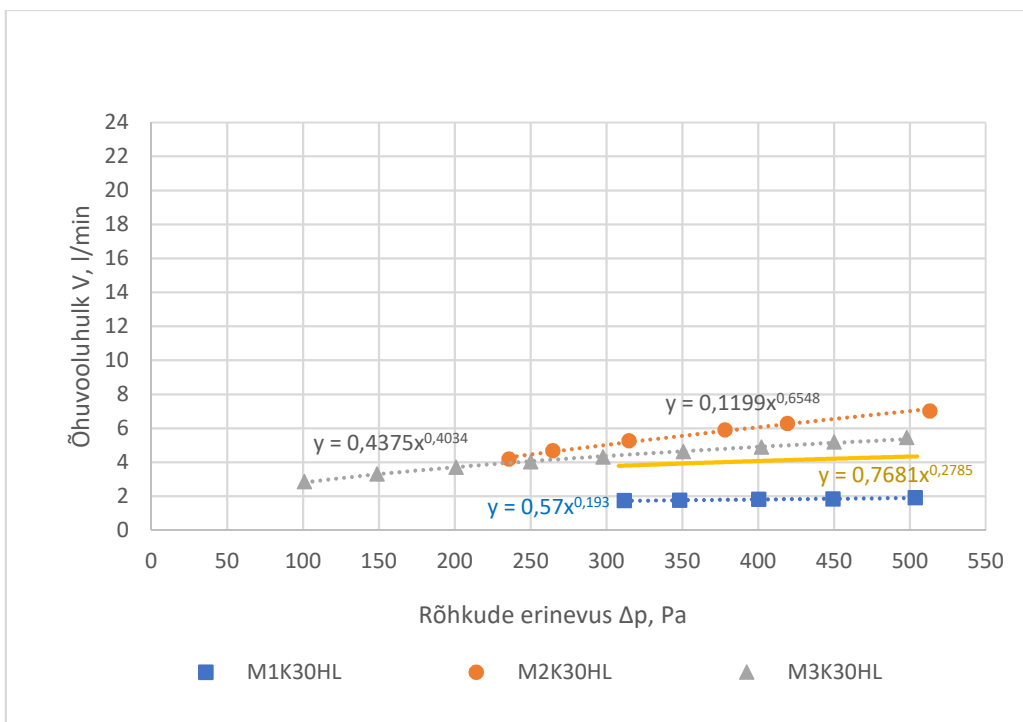


Joonis 5.22 MXS30HL, alarõhk

Katsekeha 2K30HL (vt Joonis 5.23 ja Joonis 5.24) kuju deformeerus (väändus) pärast montaaživahuga tihendamist, mistõttu oli seda keeruline katsekambris (vt Joonis 4.9) pitskruidesga suruda ühtlaselt vastu tihendit. Katsekeha deformeerumine võis olla põhjustatud hõvellaude deformeerumisest kuivamise tõttu kui ka montaaživahu mahukahanemisest, mis põhjustasid katsekehas pingeid.



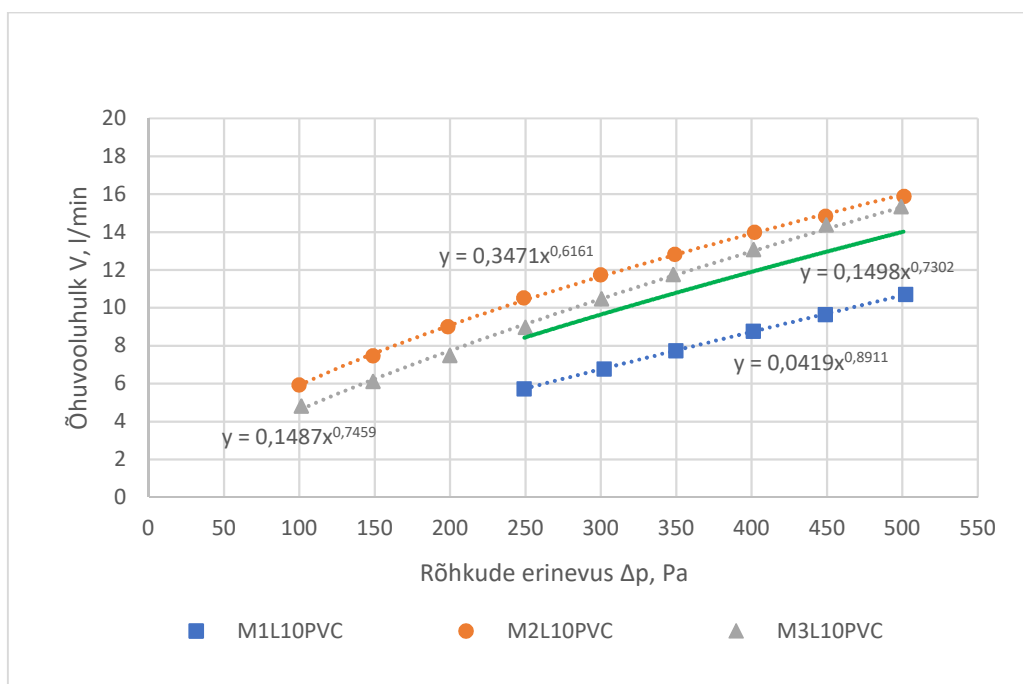
Joonis 5.23 MXK30HL, ülerõhk



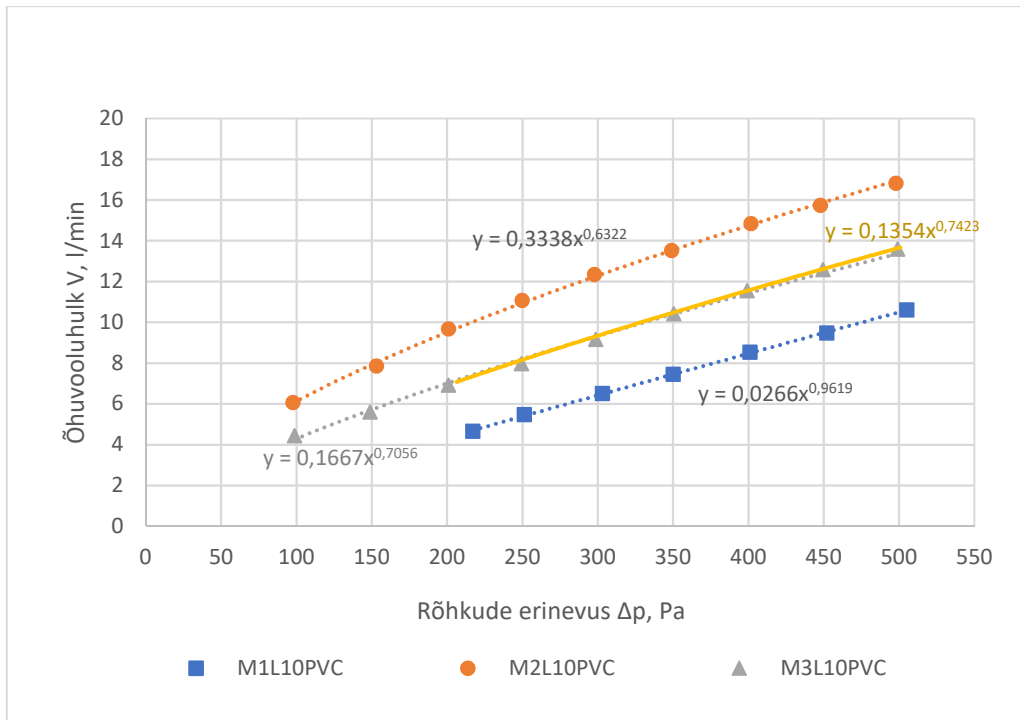
Joonis 5.24 MXK30HL, alarõhk

5.1.5 Lõikamata montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 10 mm

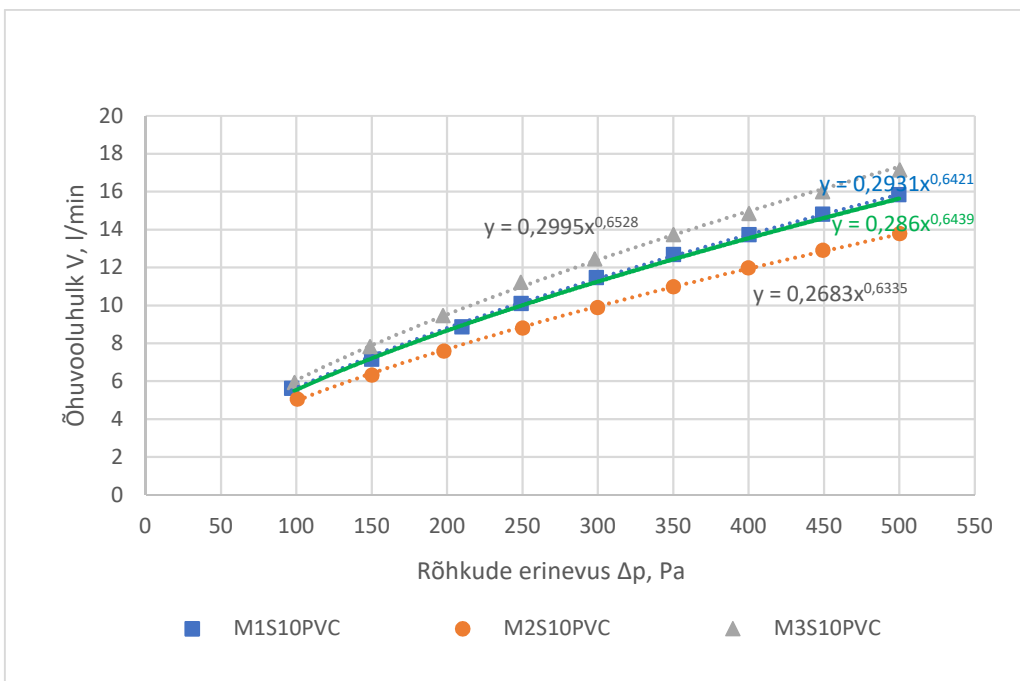
9-st antud tüüp katsekehast kolm katsekeha (33%) (vt Joonis 5.25, Joonis 5.26, Joonis 5.29, Joonis 5.30) olid liiga õhutihedad ning üks katsekeha (11%) (vt Joonis 5.29, Joonis 5.30) liiga õhuhõre, mistõttu polnud võimalik tekitada rõhuastmestikku 100...500 Pa. Neist kolme katsekeha puhul ei saavutatud nõutavat 7-t mõõtepunkti (vt Joonis 5.25, Joonis 5.29, Joonis 5.30) (EVS-EN 12114:2000).



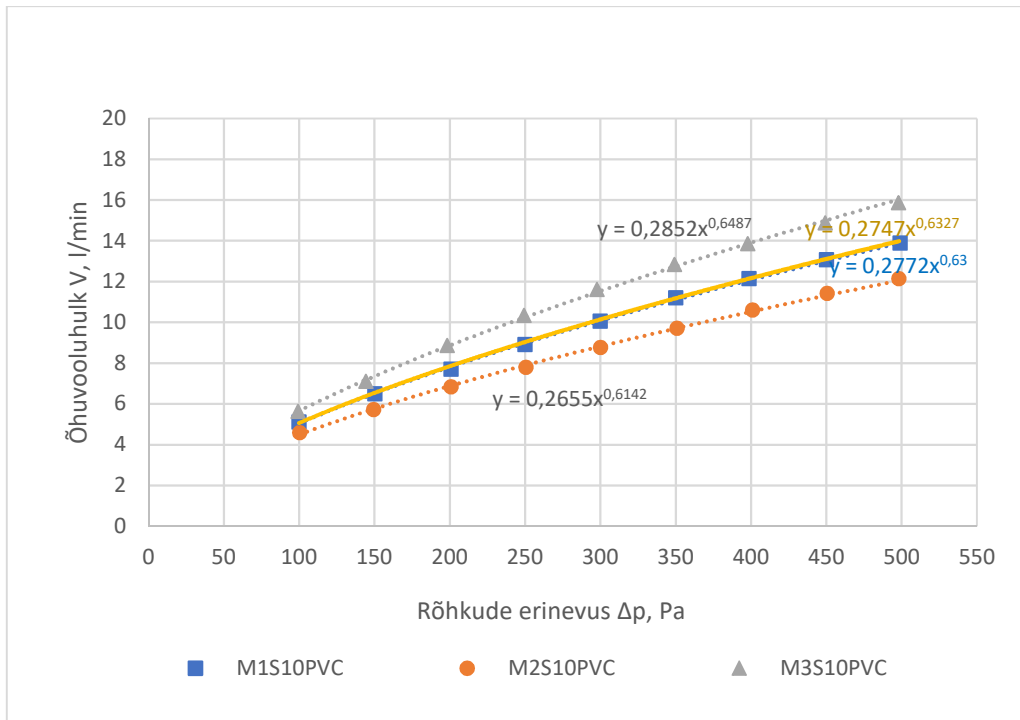
Joonis 5.25 MXL10PVC, ülerõhk



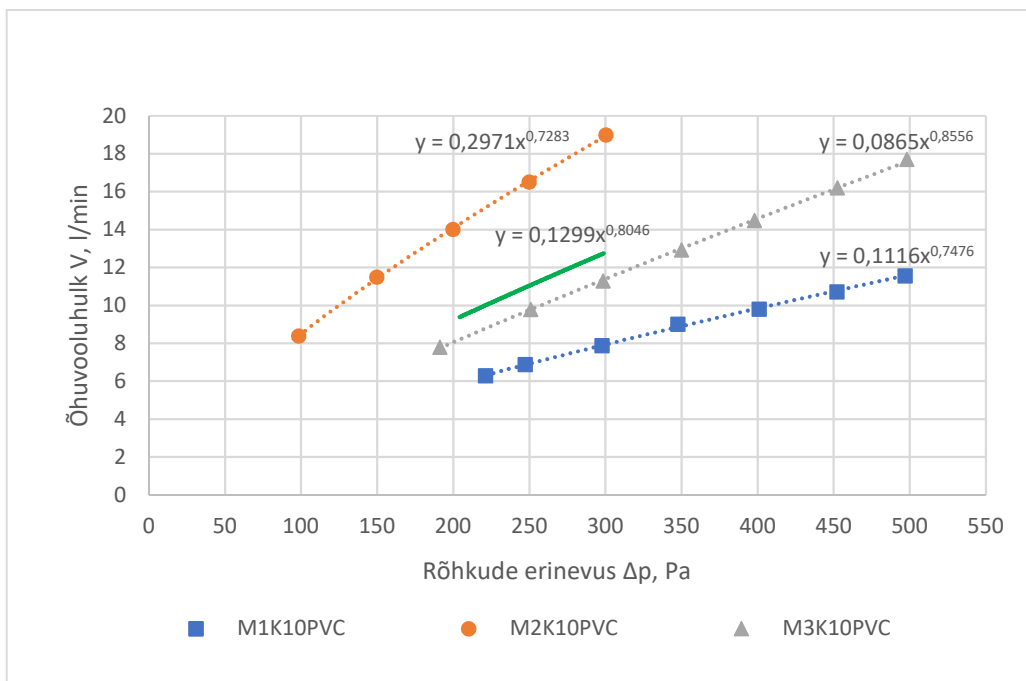
Joonis 5.26 MXL10PVC, alarõhk



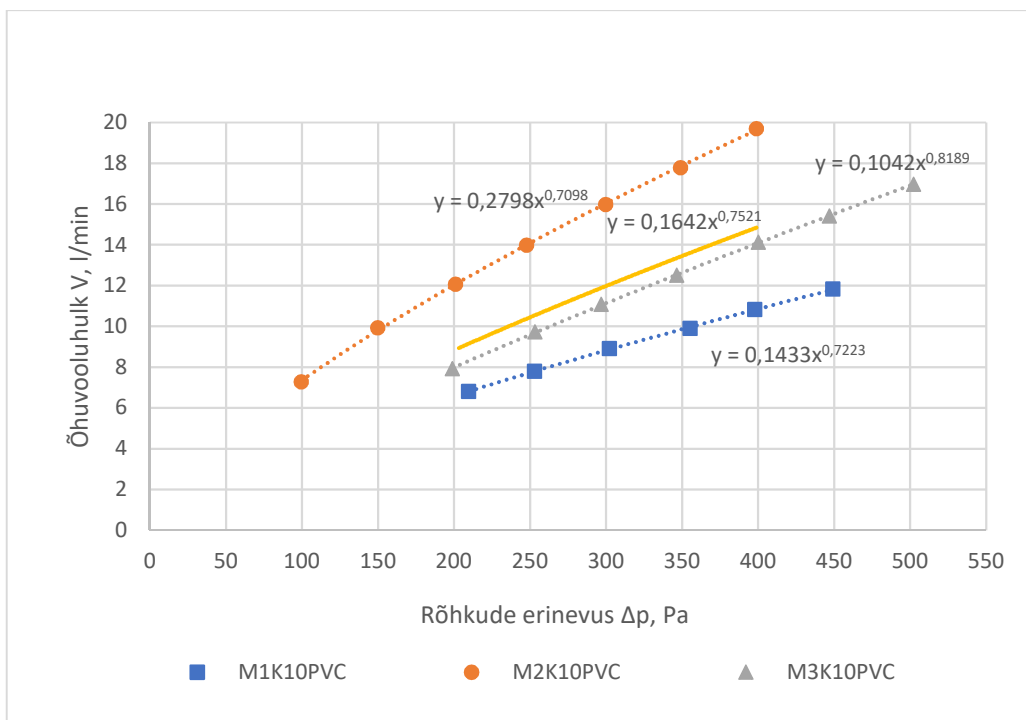
Joonis 5.27 MXS10PVC, ülerõhk



Joonis 5.28 MXS10PVC, alarõhk



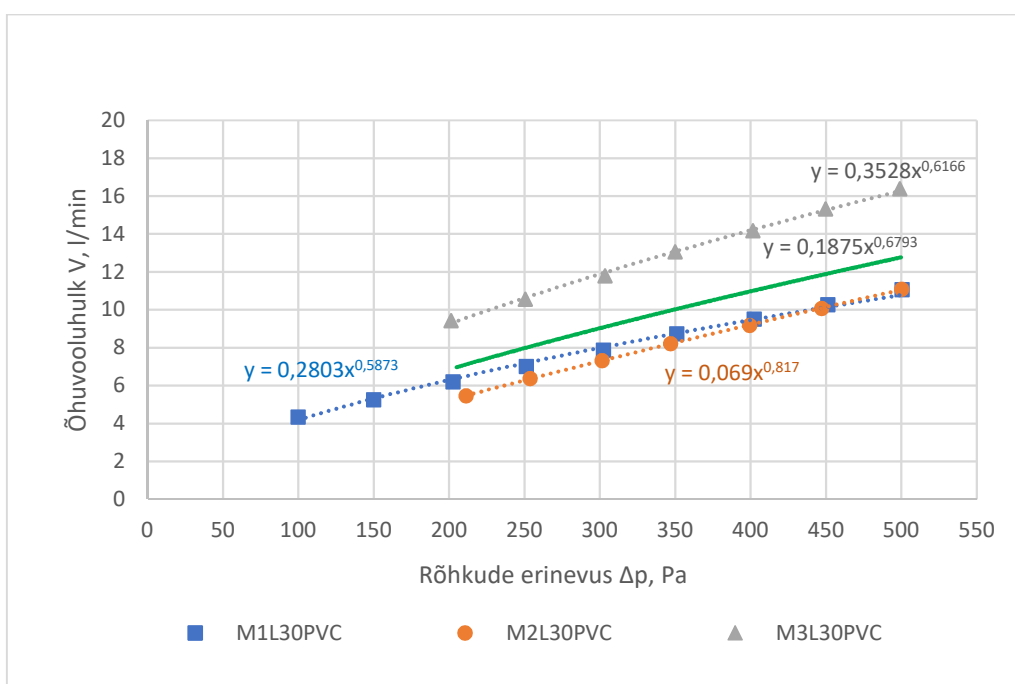
Joonis 5.29 MXK10PVC, ülerõhk



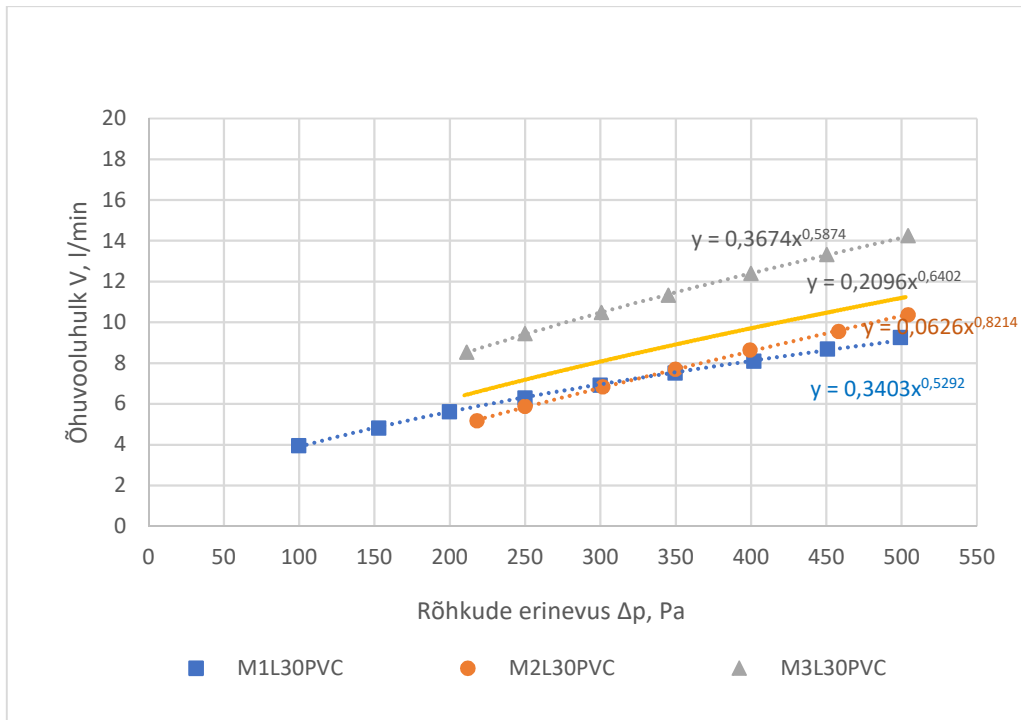
Joonis 5.30 MXK10PVC, alarõhk

5.1.6 Lõikamata montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 30 mm

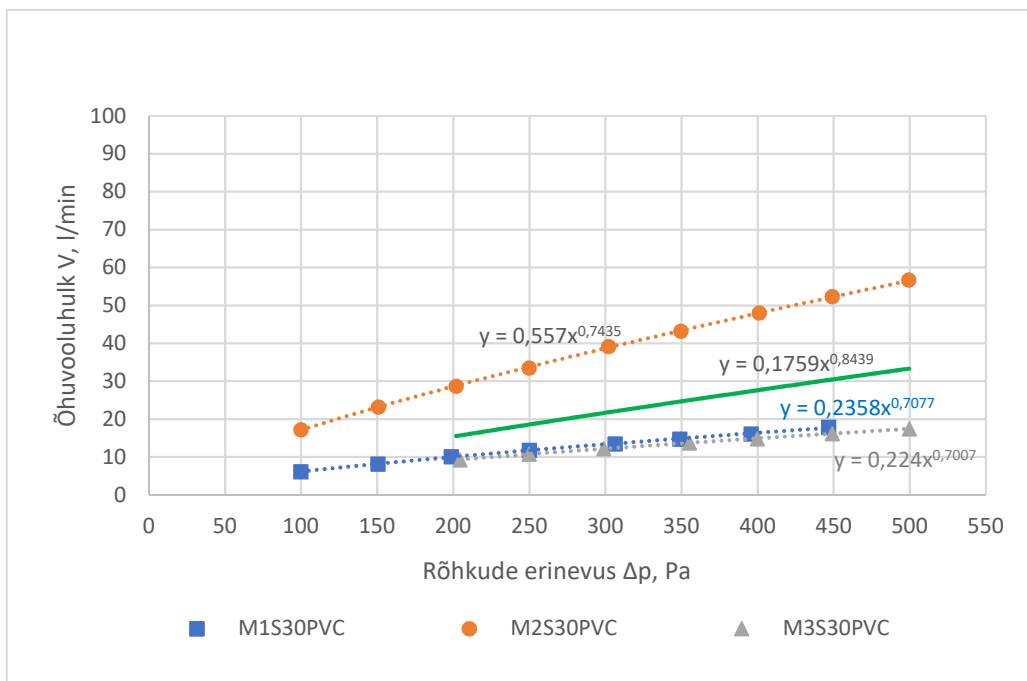
9-st antud tüüp katsekehast 5 katsekeha (56%) (vt Joonis 5.31, Joonis 5.32, Joonis 5.33, Joonis 5.34, Joonis 5.35, Joonis 5.36) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik tekitada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses. Neist ühe katsekeha (11%) (vt Joonis 5.35, Joonis 5.36) puhul ei saavutatud nõutavat 7-t mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



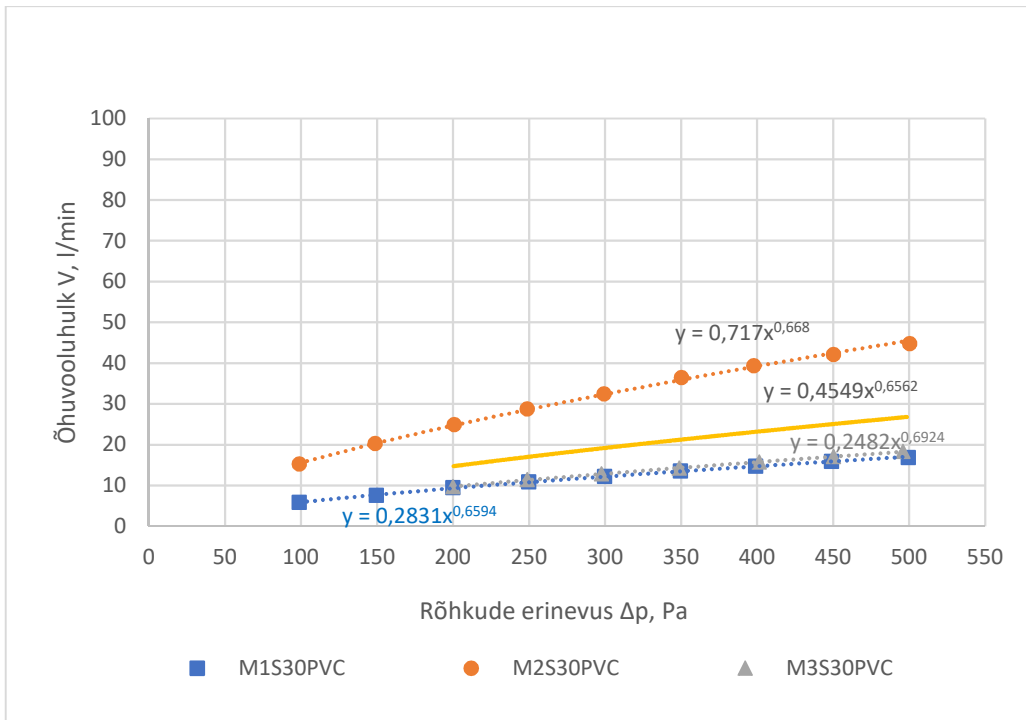
Joonis 5.31 MXL30PVC, ülerõhk



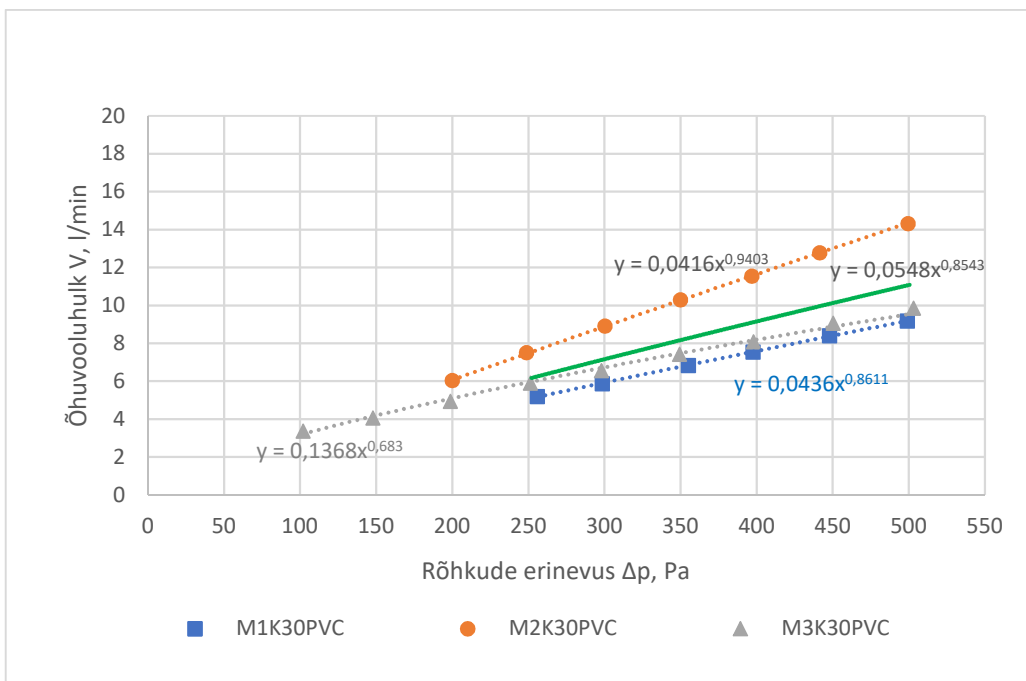
Joonis 5.32 MXL30PVC, alarõhk



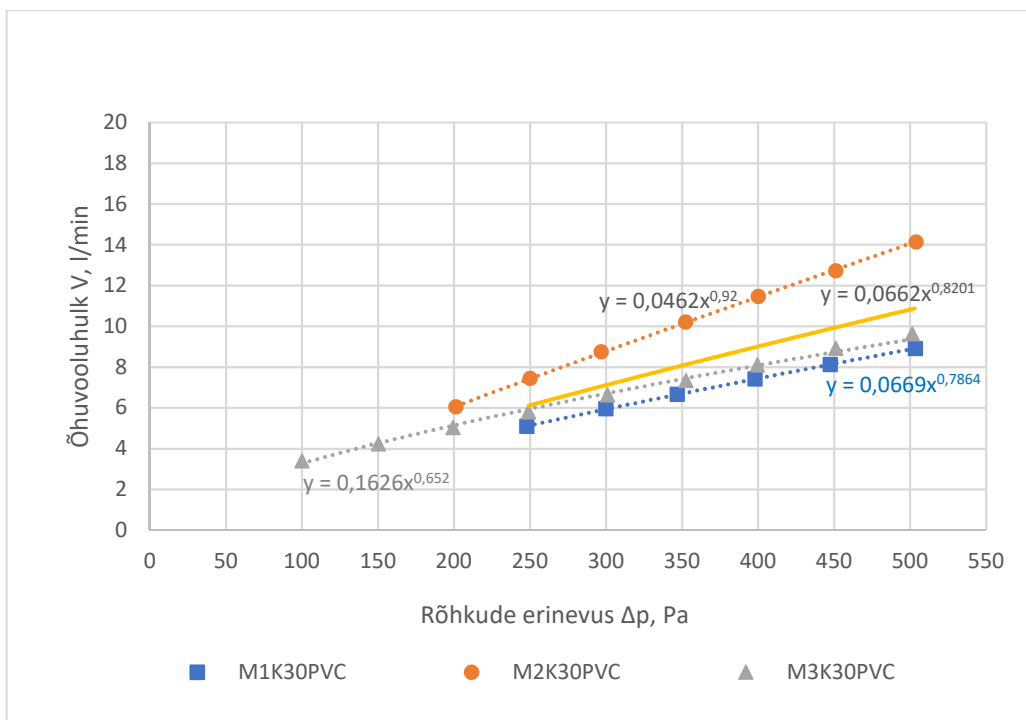
Joonis 5.33 MXS30PVC, ülerõhk



Joonis 5.34 MXS30PVC, alarõhk



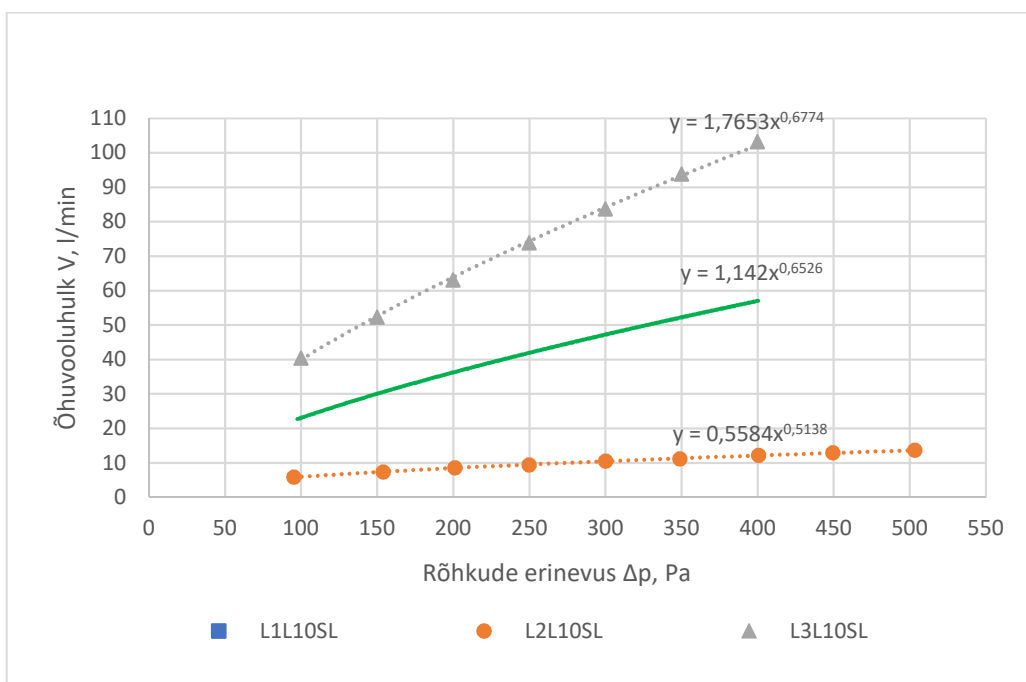
Joonis 5.35 MXK30PVC, ülerõhk



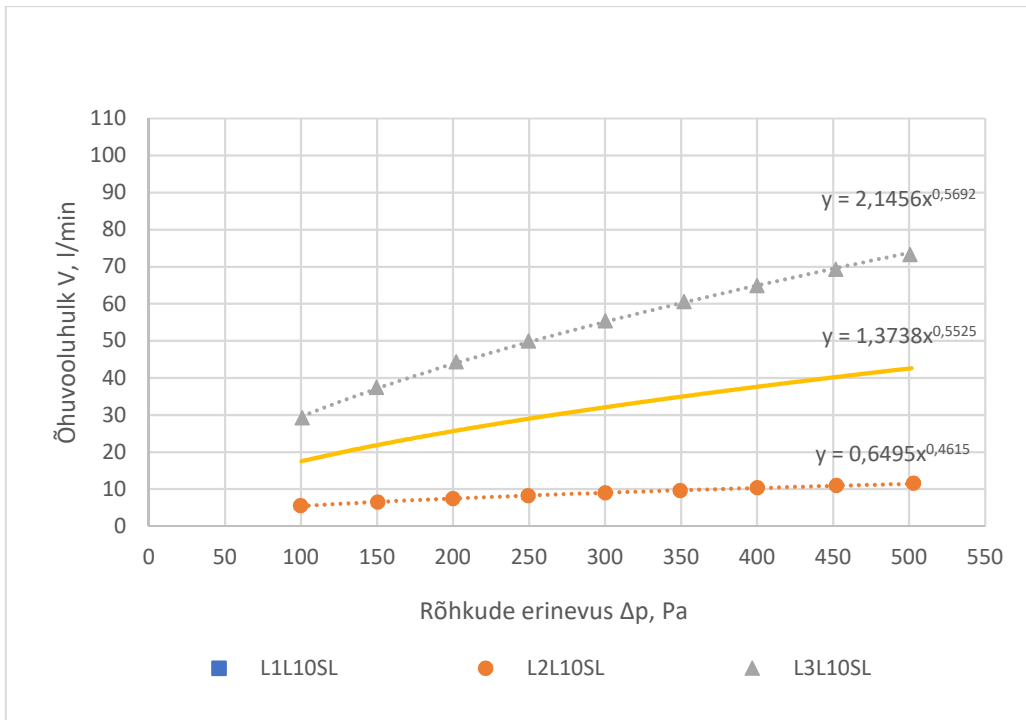
Joonis 5.36 MXK30PVC, alarõhk

5.1.7 Lõigatud montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 10 mm

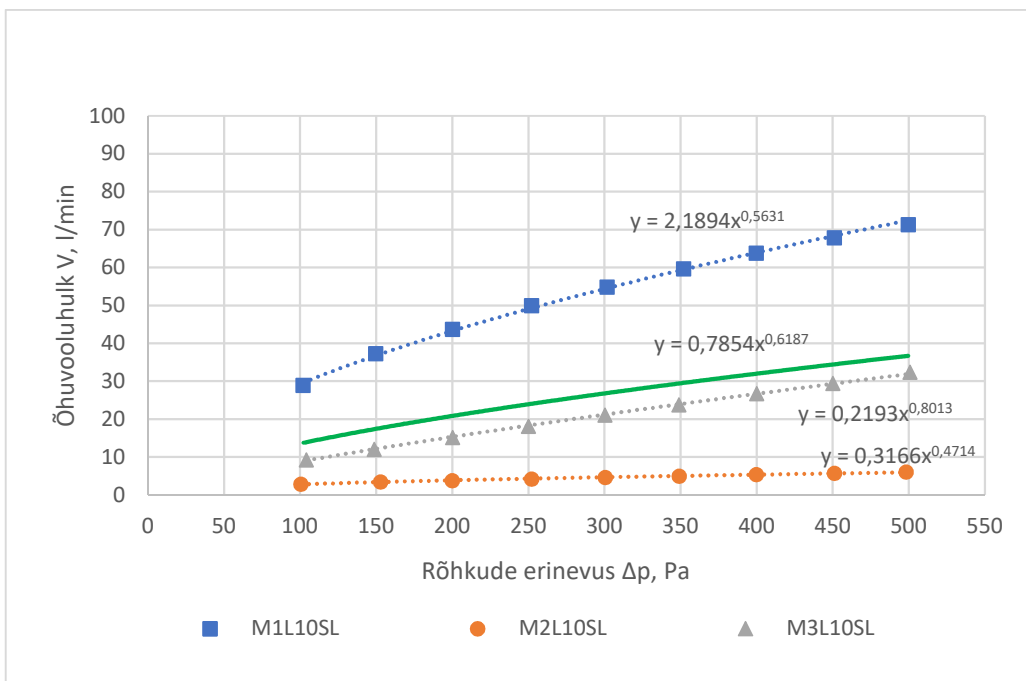
9-st antud tüüp katsekehast kolm katsekeha (56%) (vt Joonis 5.37, Joonis 5.38, Joonis 5.39, Joonis 5.40, Joonis 5.41) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses ja 7-t nõutavat mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000). Katsekeha 1L10SL (vt Joonis 4.37 ja Joonis 4.38) oli liiga õhuhõre, mistõttu polnud võimalik katseid läbi viia. Põhjuseks võivad olla suuremad lokaalsed õhulekked montaaživahu ja puitpinna liitumiskohas.



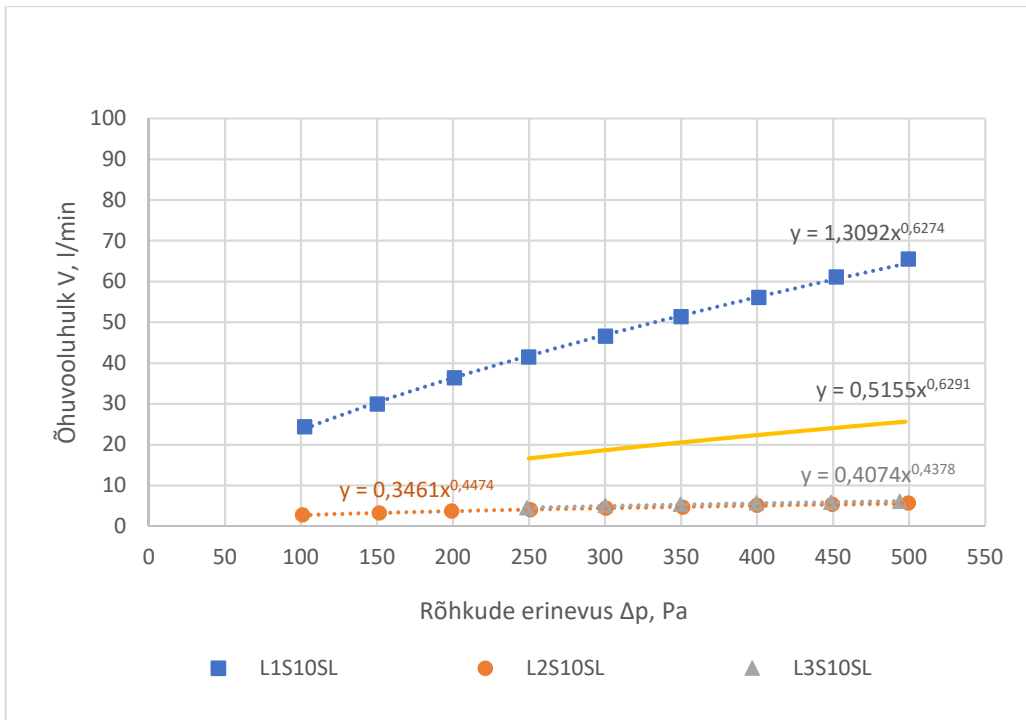
Joonis 5.37 LXL10SL, ülerõhk



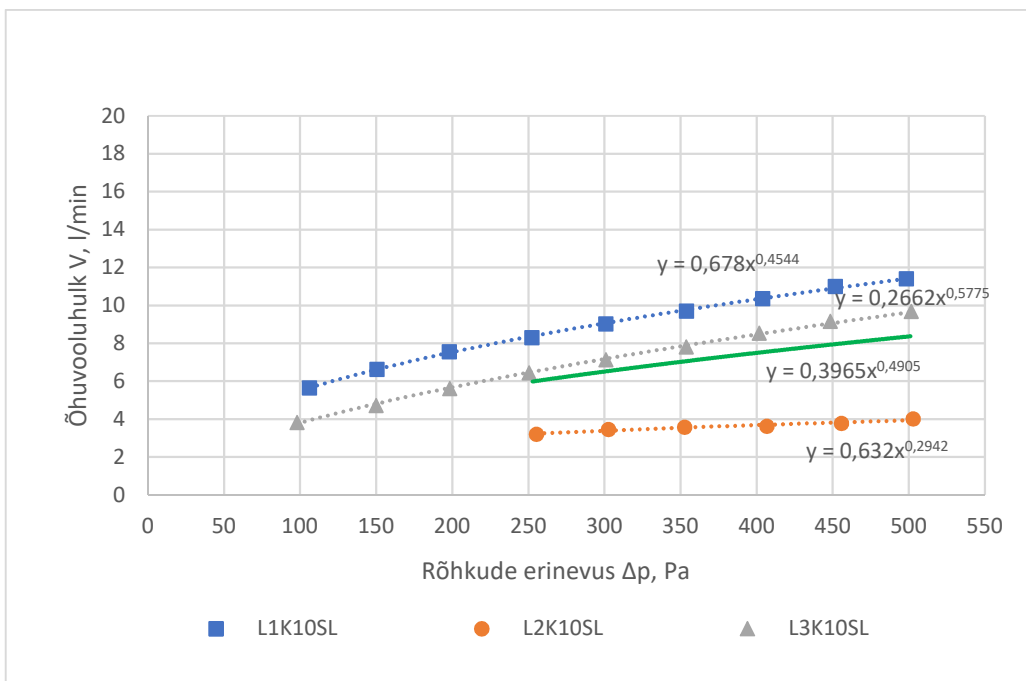
Joonis 5.38 LXL10SL, alarõhk



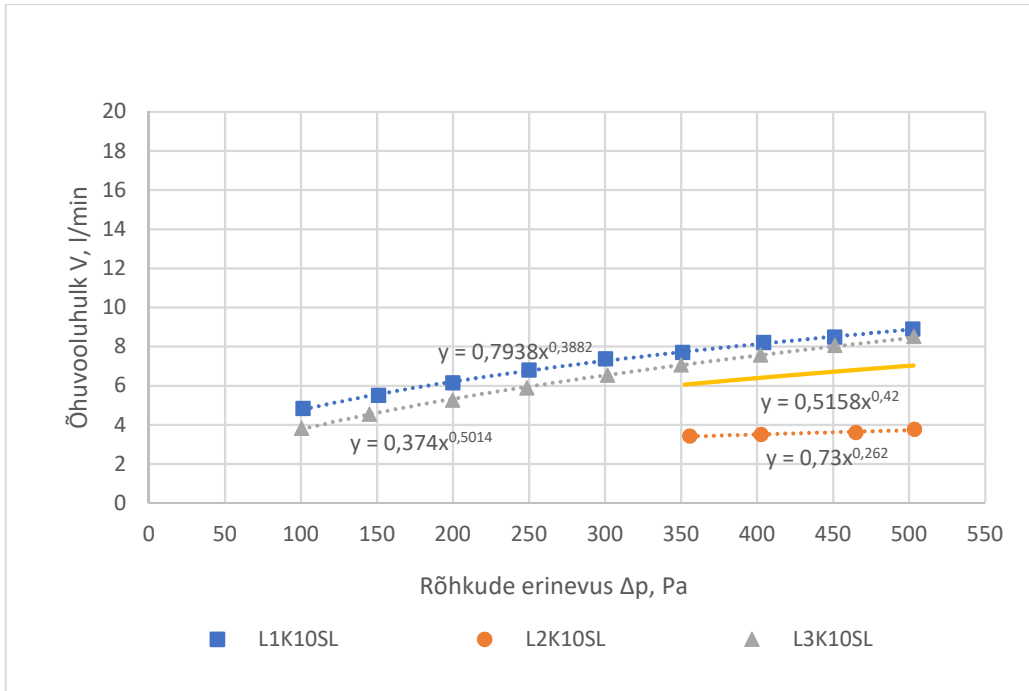
Joonis 5.39 LXS10SL, ülerõhk



Joonis 5.40 LXS10SL, alarõhk



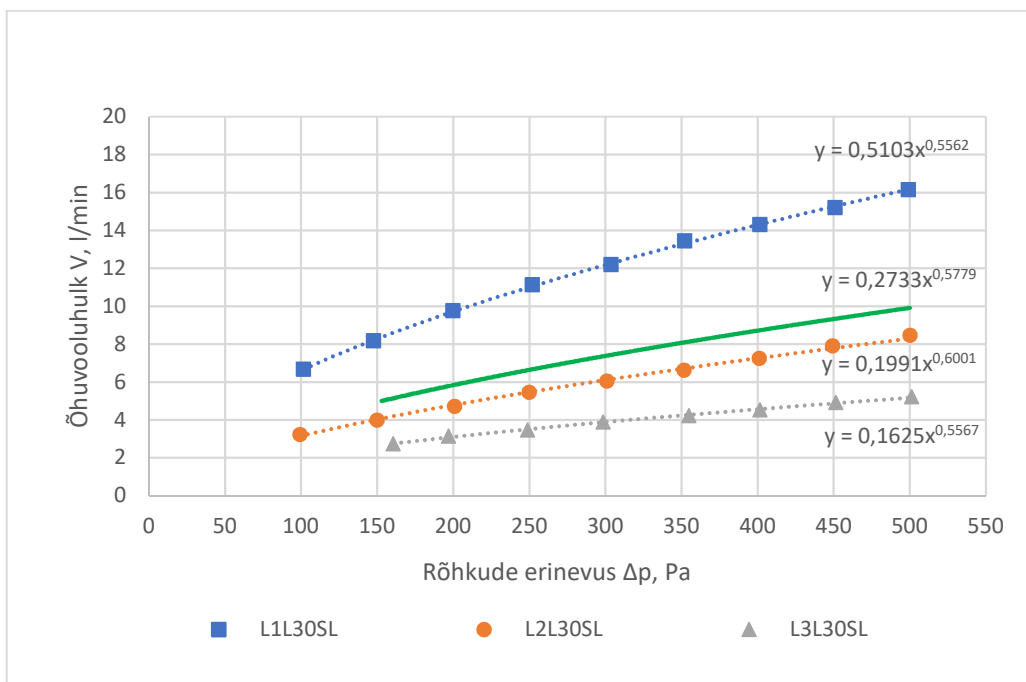
Joonis 5.41 LKX10SL, ülerõhk



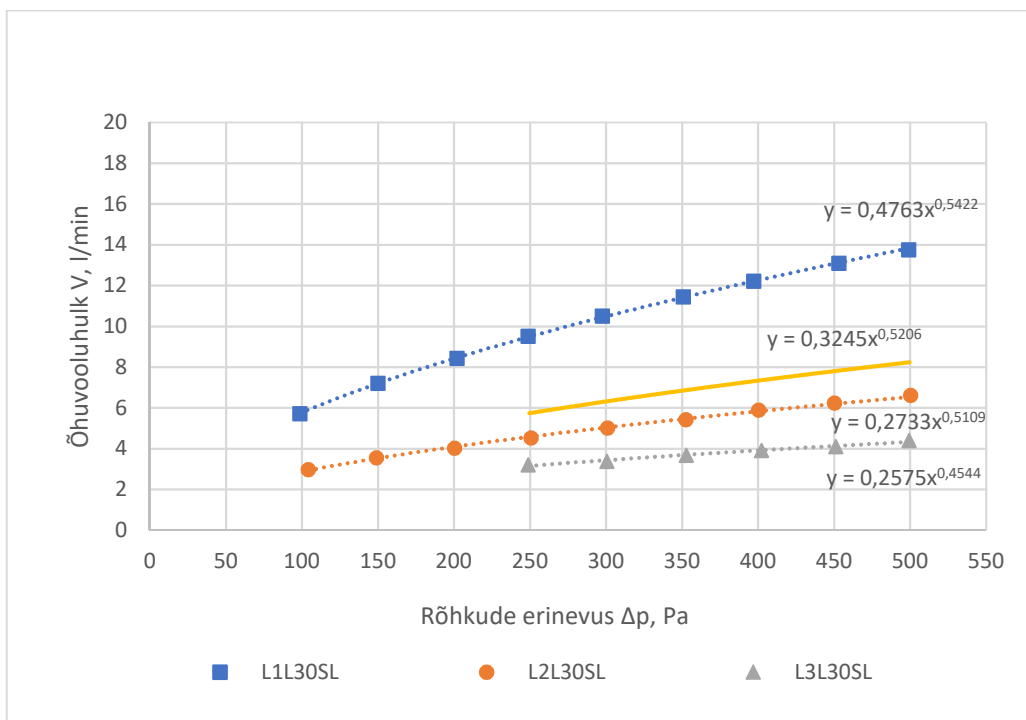
Joonis 5.42 LK10SL, alarõhk

5.1.8 Lõigatud montaaživahuga saelauast katsekehad vuugiga 30 mm

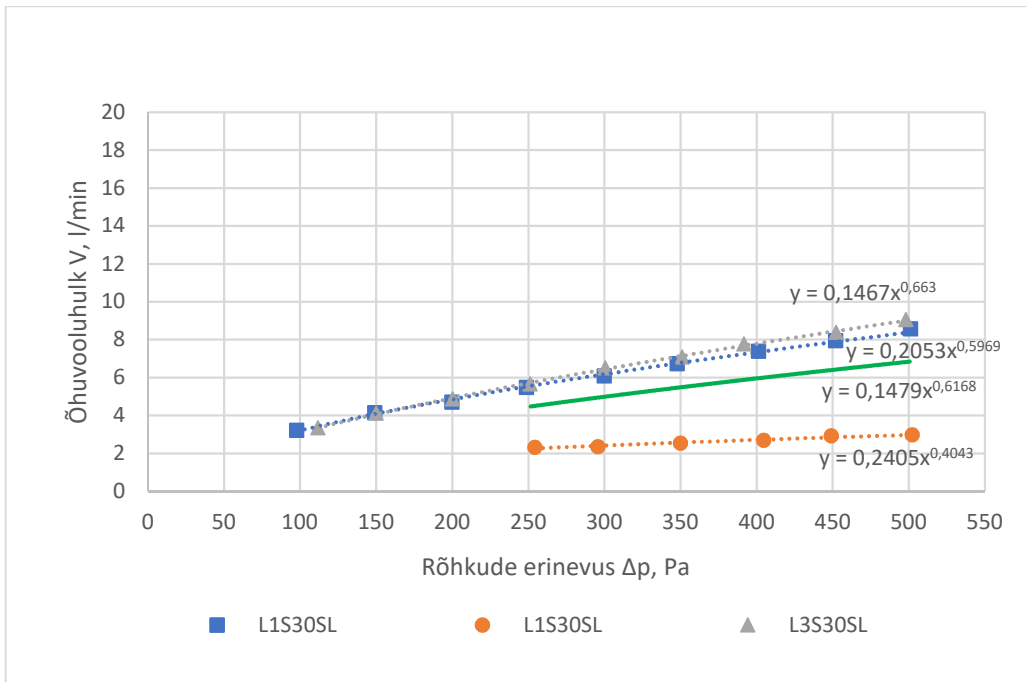
9-st antud tüüp katsekehad kaks katsekeha (22%) (vt Joonis 5.43, Joonis 5.44, Joonis 5.45, Joonis 5.46) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses ja 7-t nõutavat mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000). Katsekeha 1K30SL (vt Joonis 4.47 ja Joonis 4.48) oli liiga õhuhõre, mistõttu polnud võimalik katseid läbi viia. Põhjuseks võivad olla suuremad lokaalsed õhulekked montaaživahu ja puitpinna liitekohas.



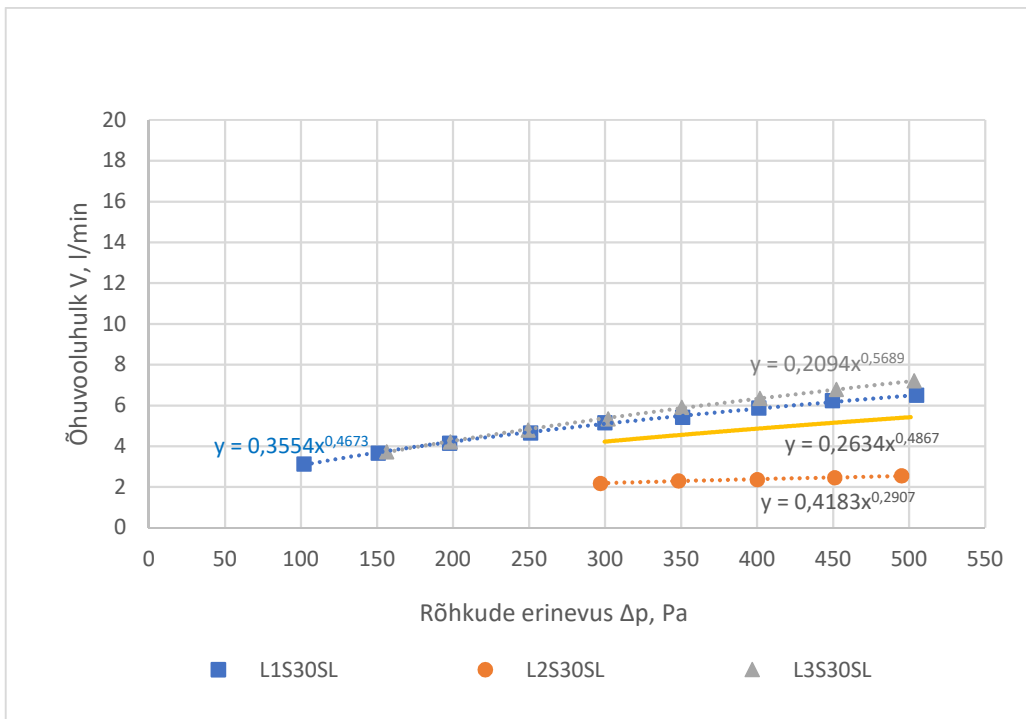
Joonis 5.43 LXL30SL, ülerõhk



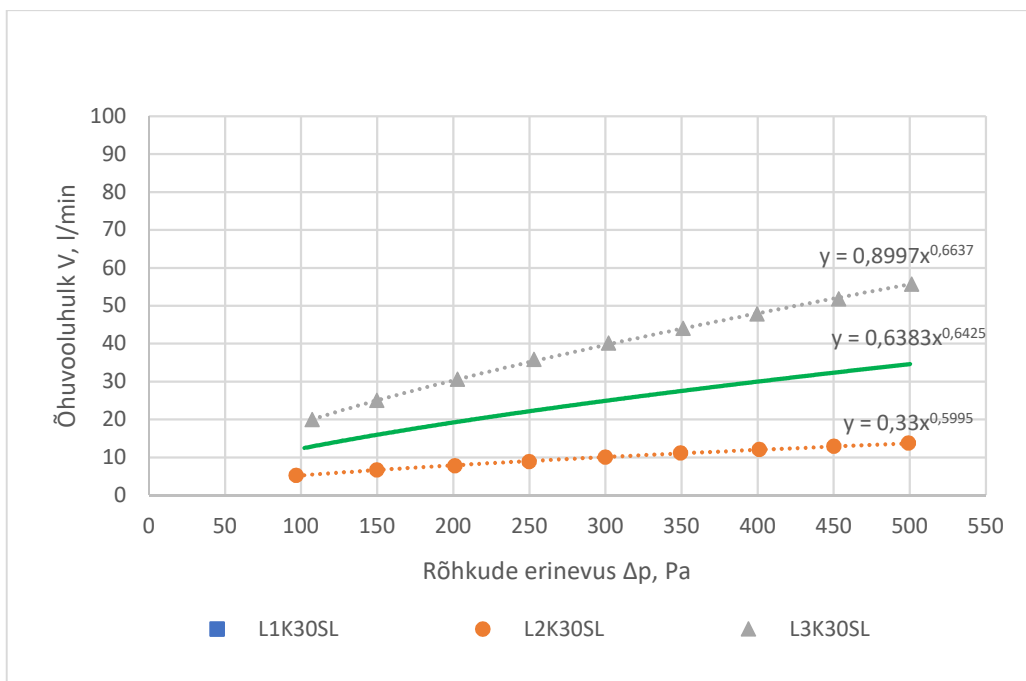
Joonis 5.44 LXL30SL, alarõhk



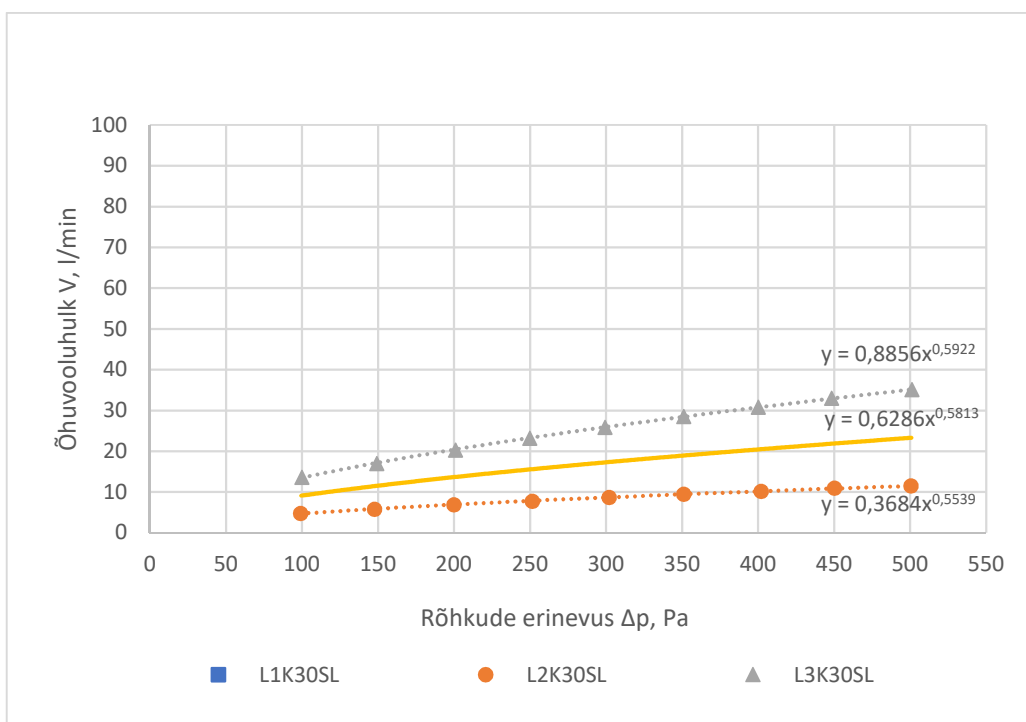
Joonis 5.45 LXS30SL, ülerõhk



Joonis 5.46 LXS30SL, alarõhk



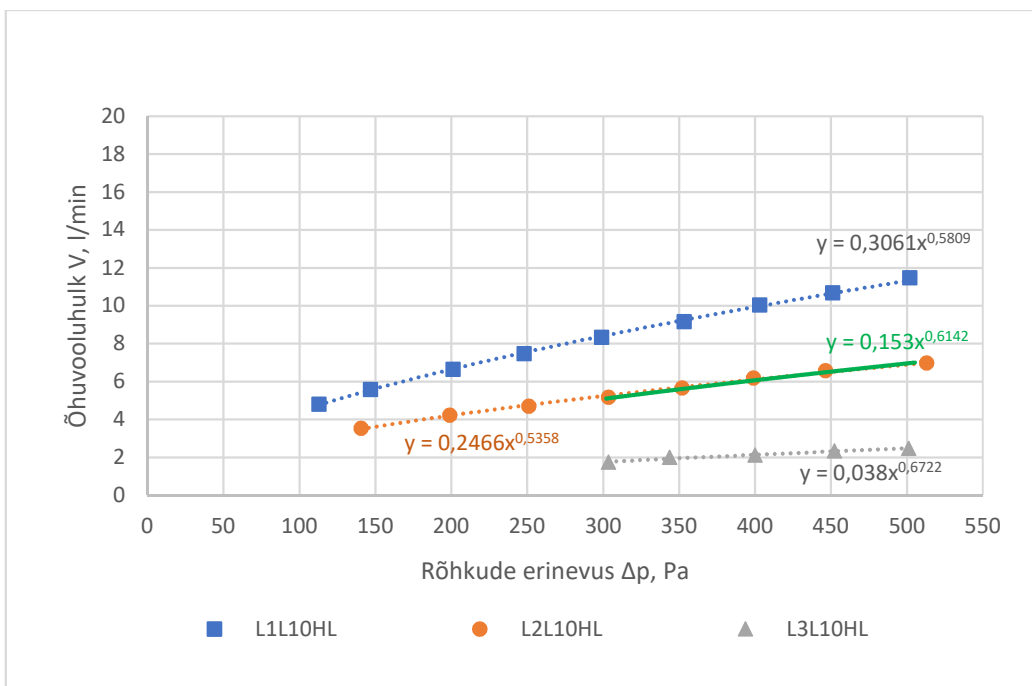
Joonis 5.47 LK30SL, ülerõhk



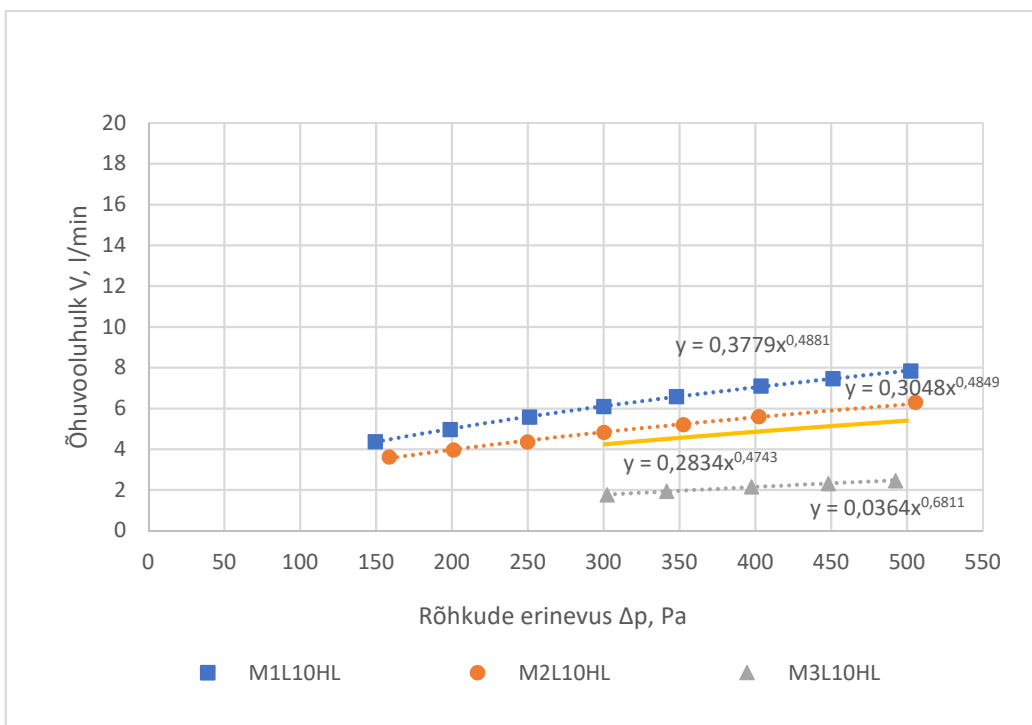
Joonis 5.48 LK30SL, alarõhk

5.1.9 Lõigatud montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 10 mm

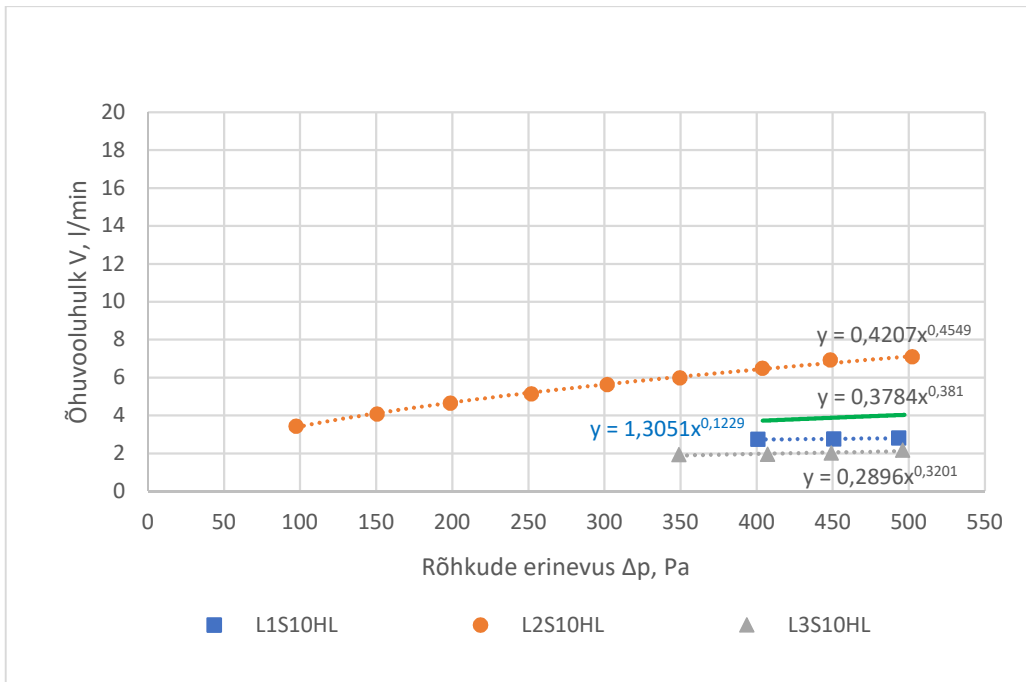
9-st antud tüüp katsekehast 6 katsekeha (67%) (vt Joonis 5.49, Joonis 5.50, Joonis 5.51, Joonis 5.52, Joonis 5.53, Joonis 5.54) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses ja 7-t nõutavat mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



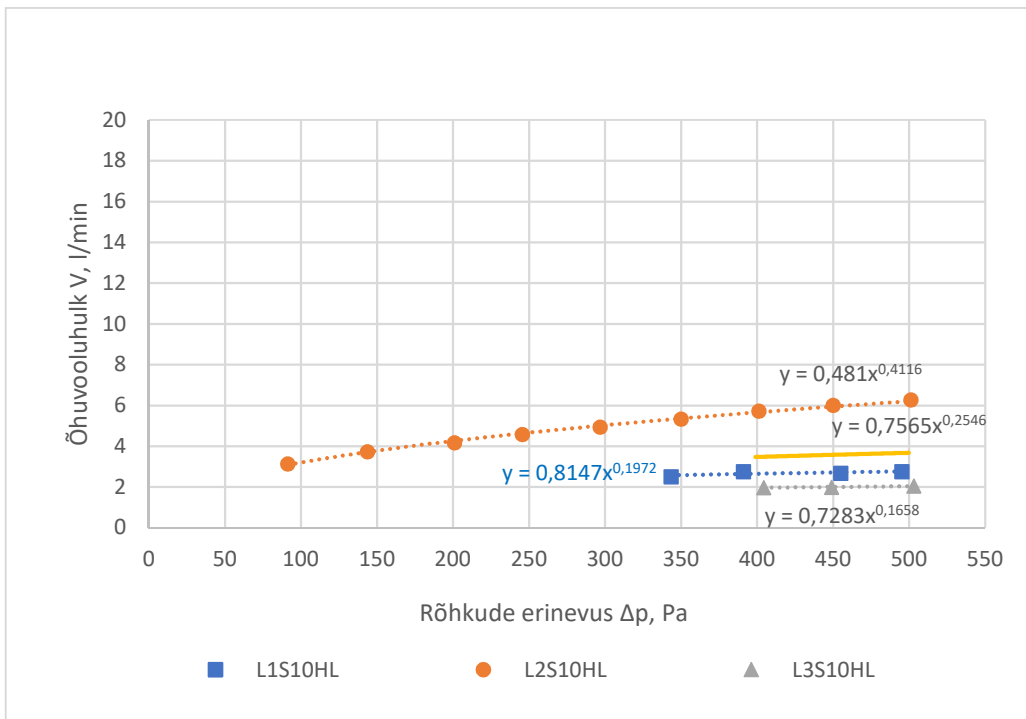
Joonis 5.49 LXL10HL, ülerõhk



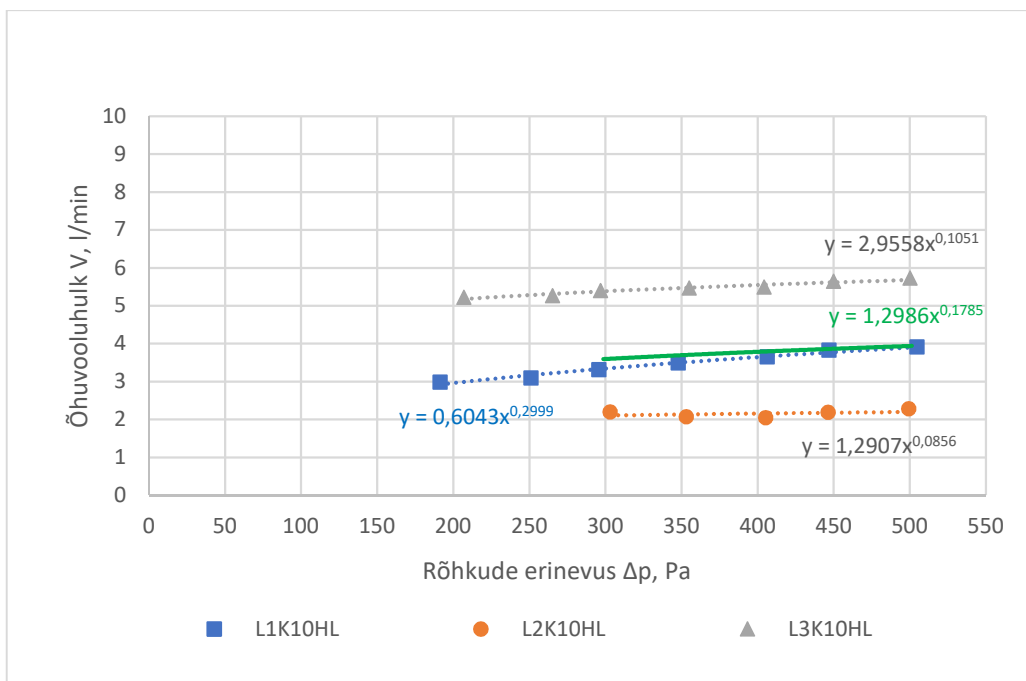
Joonis 5.50 LXL10HL, alarõhk



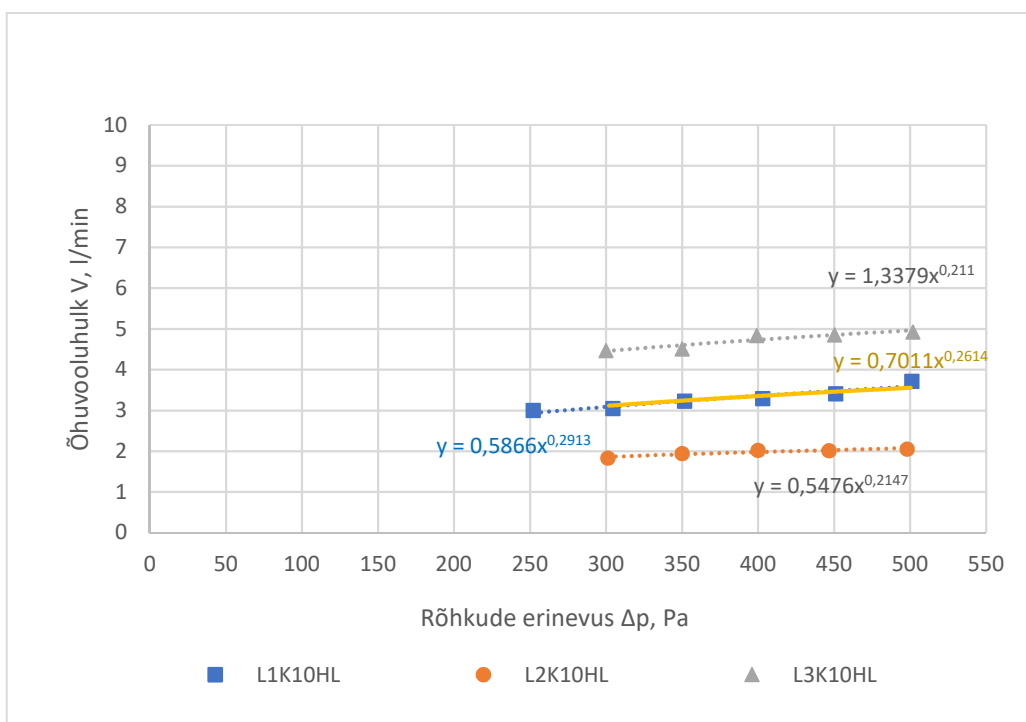
Joonis 5.51 LXS10HL, ülerõhk



Joonis 5.52 LXS10HL, alarõhk



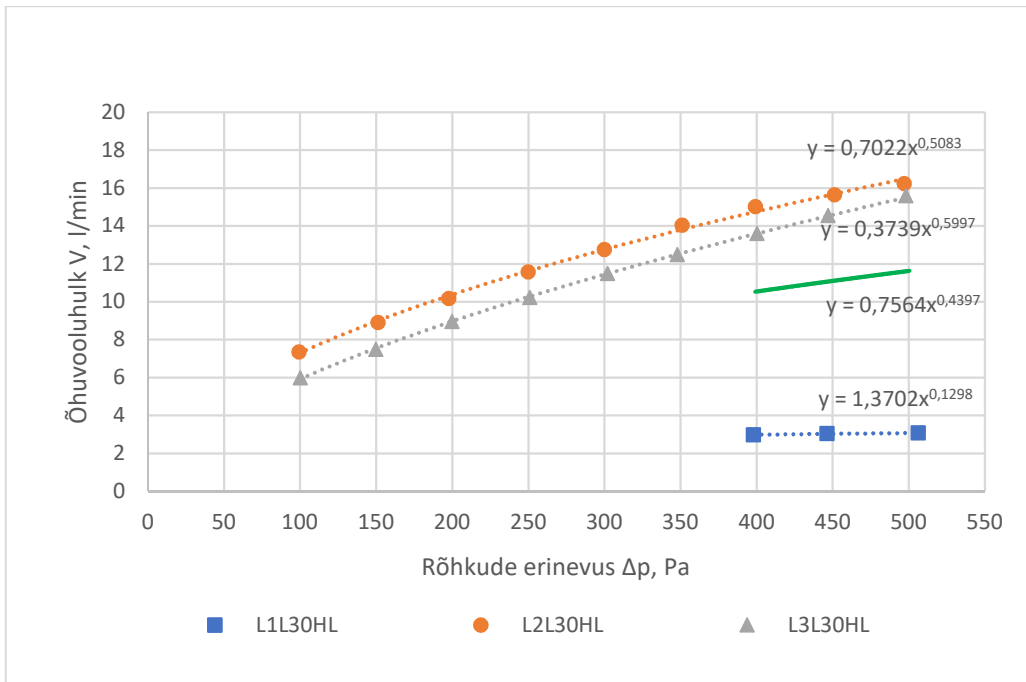
Joonis 5.53 LK10HL, ülerõhk



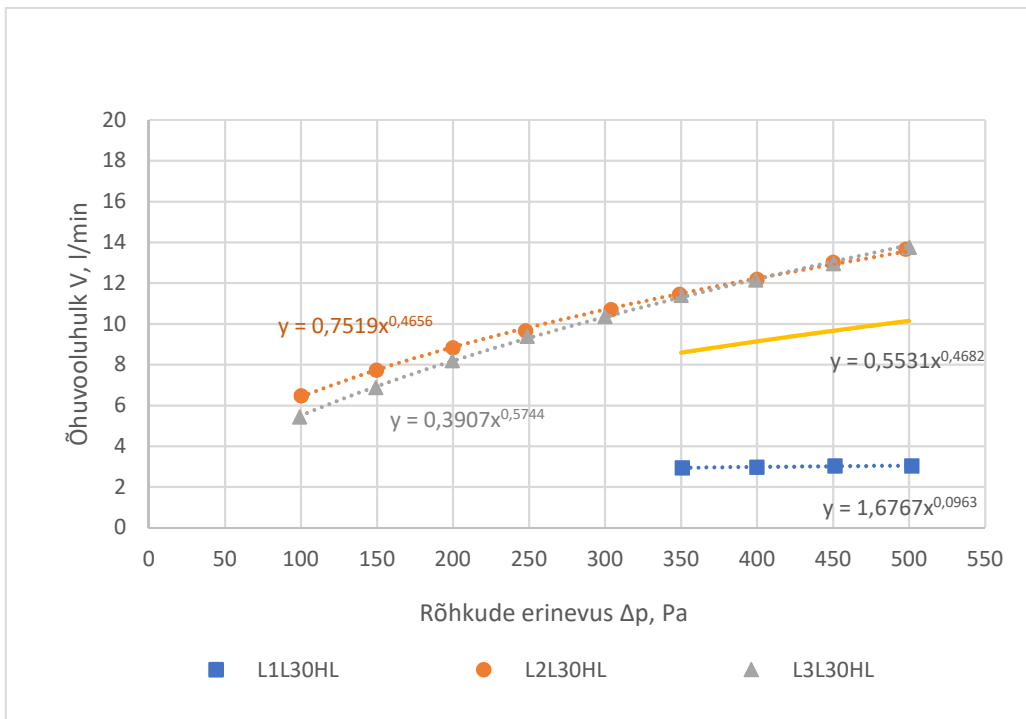
Joonis 5.54 LK10HL, alarõhk

5.1.10 Lõigatud montaaživahuga hõövellauast katsekehad vuugiga 30 mm

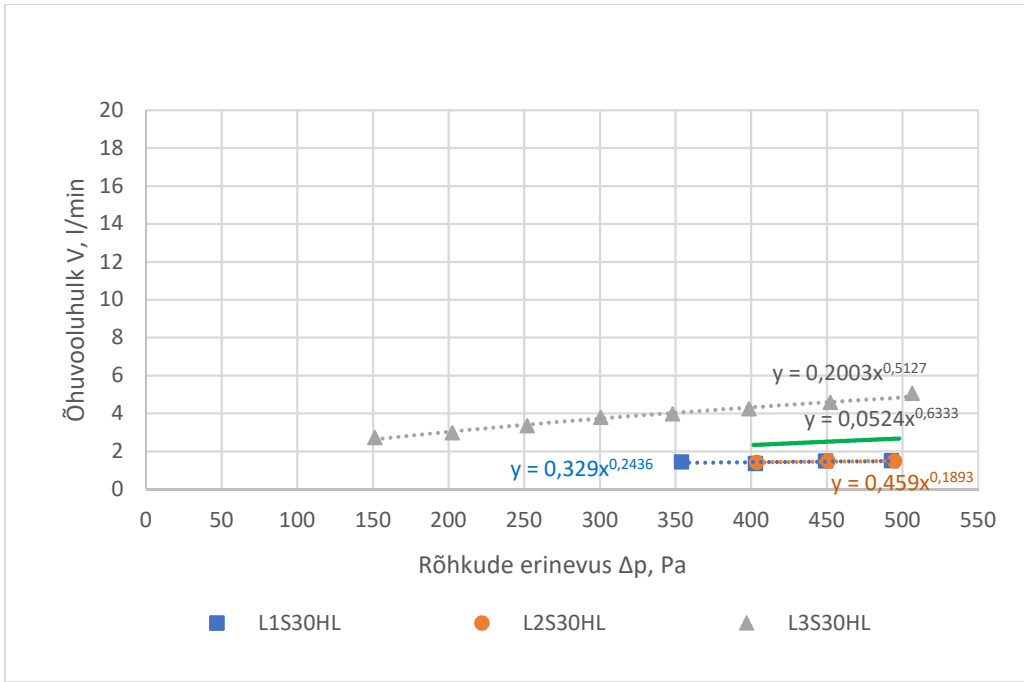
9-st antud tüüpi katsekehast 6 katsekeha (67%) (vt Joonis 5.43, Joonis 5.44, Joonis 5.45, Joonis 5.46, Joonis 5.47, Joonis 5.48) olid liiga õhutihedad, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses ja 7-t nõutavat mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).



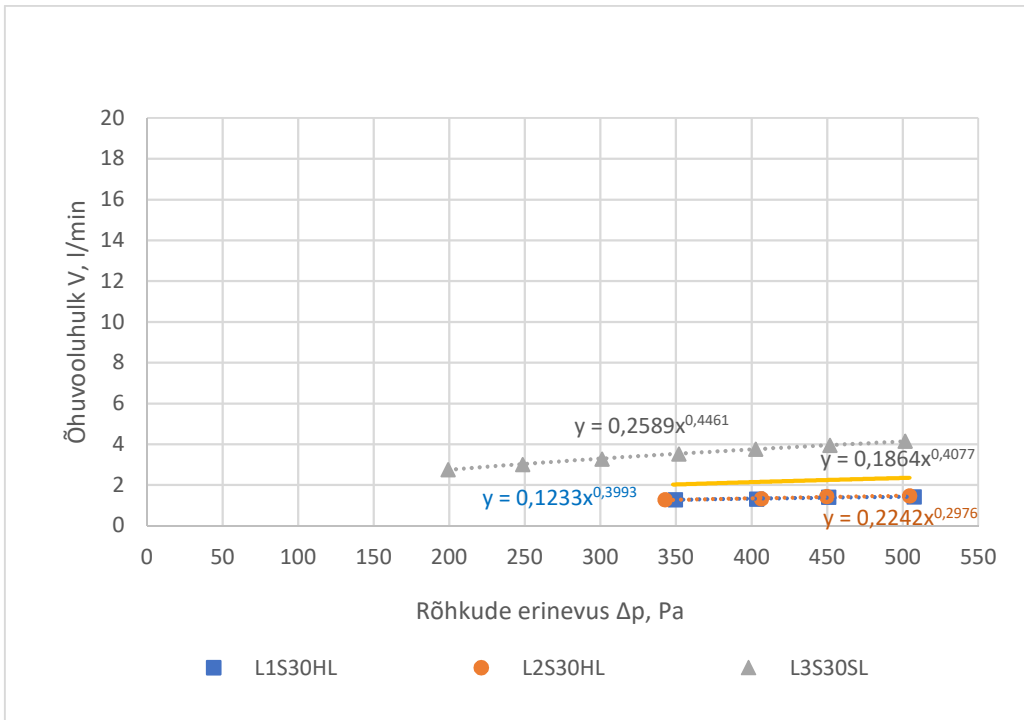
Joonis 5.55 LXL30HL, ülerõhk



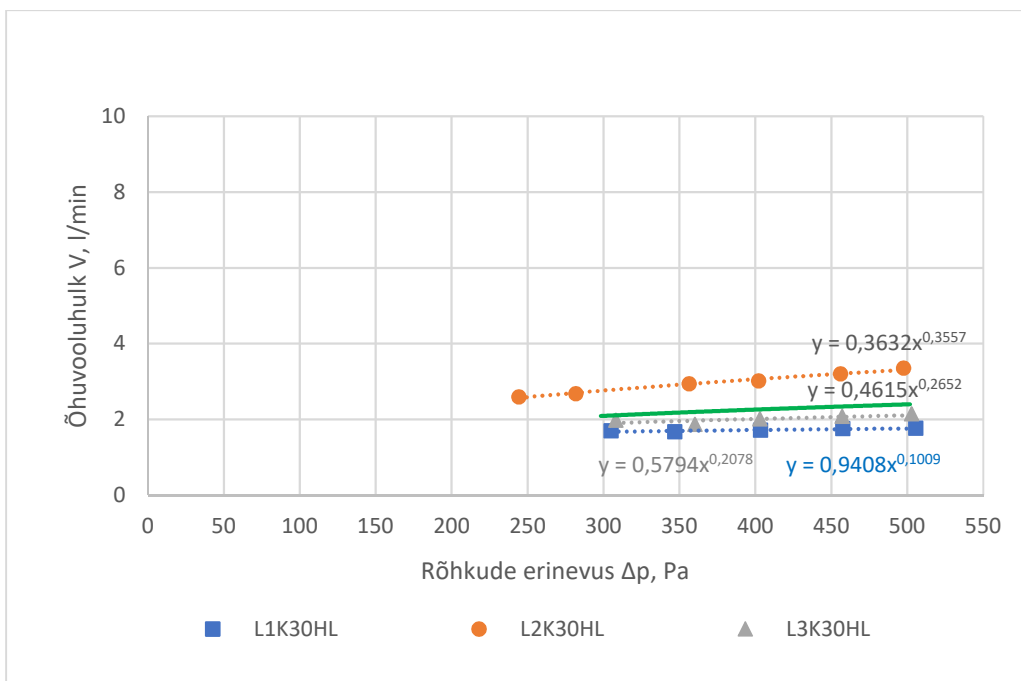
Joonis 5.56 LXL30HL, alarõhk



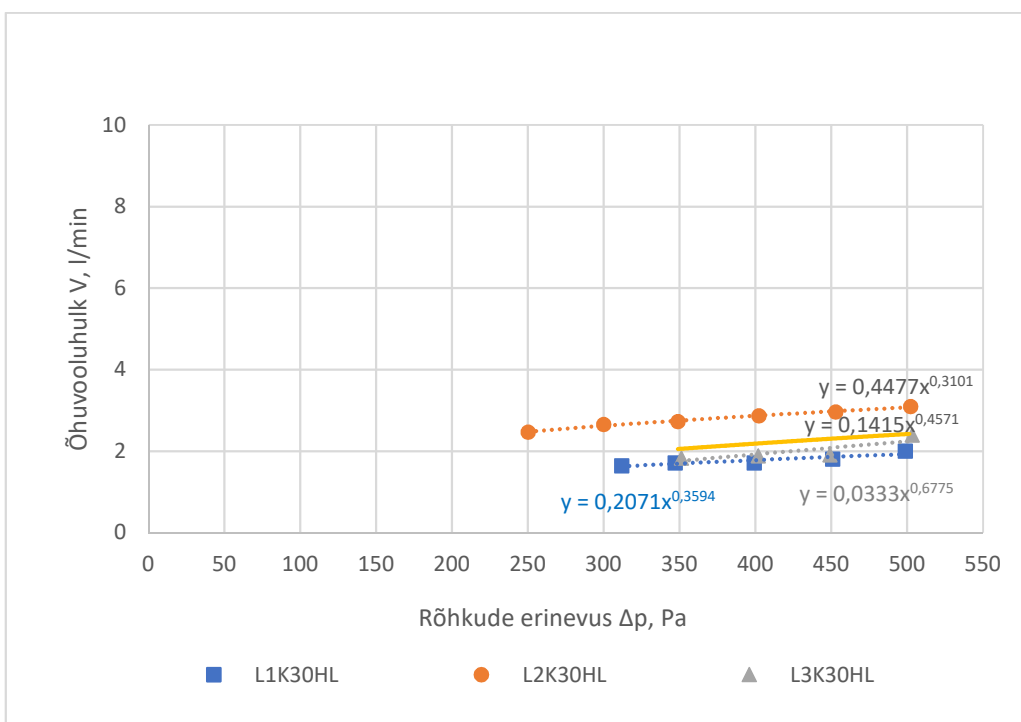
Joonis 5.57 LXS30HL, ülerõhk



Joonis 5.58 LXS30HL, alarõhk



Joonis 5.59 LK30HL, ülerõhk

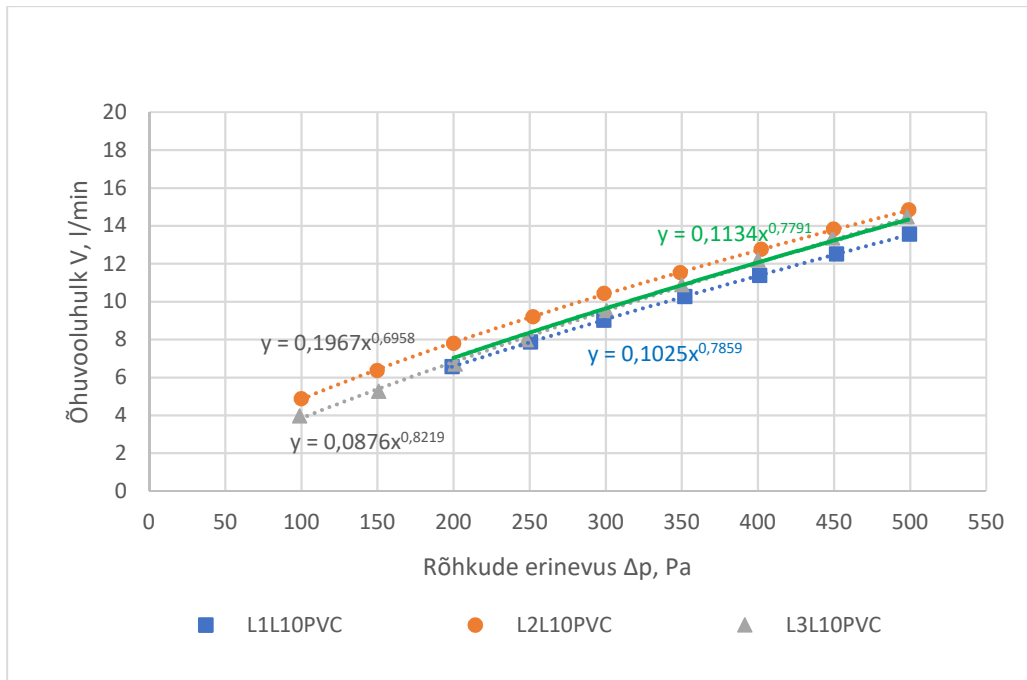


Joonis 5.60 LK30HL, alarõhk

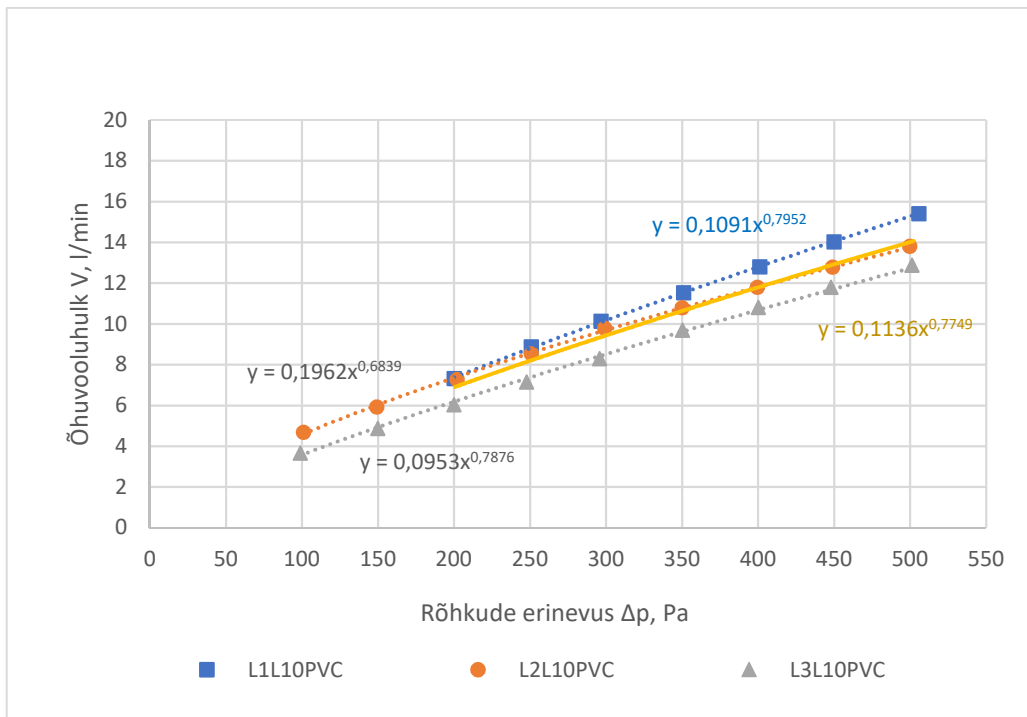
5.1.11 Lõigatud montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 10 mm

9-st antud tüüp katsekehast üks katsekeha (11%) (vt Joonis 5.61, Joonis 5.62) oli liiga õhutihe, mistõttu polnud võimalik saavutada rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses ja 7-t nõutavat mõõtepunkti (EVS-EN 12114:2000).

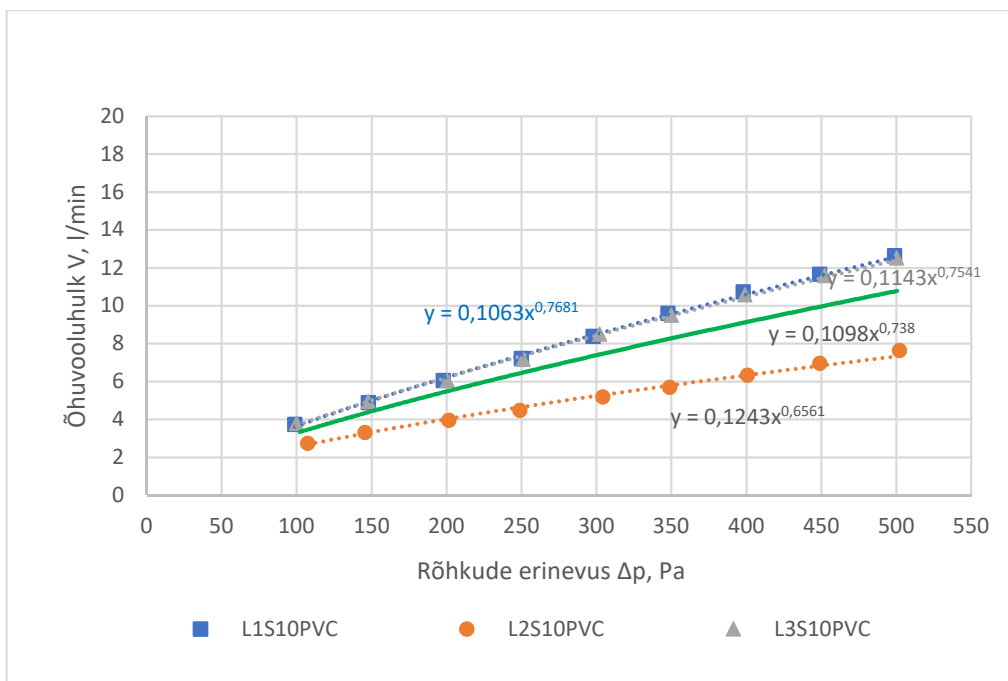
Katsekeha 3L30PVC (vt Joonis 5.67, Joonis 5.68) oli pärast montaaživahuga tihendamist tõmbunud keskosas kokku, mistõttu olid seda keeruline katsekambrisse sängitada nii, et katsekeha toetuks täielikult lekkekambri tihendile (vt Joonis 4.9). Katsekeha kuju deformeerumine võis olla põhjustatud montaaživahu mahukahanemisest kui ka hõvellaudadade deformeerumisest kuivamise tõttu, mis tekitasid katsekehas pingeid.



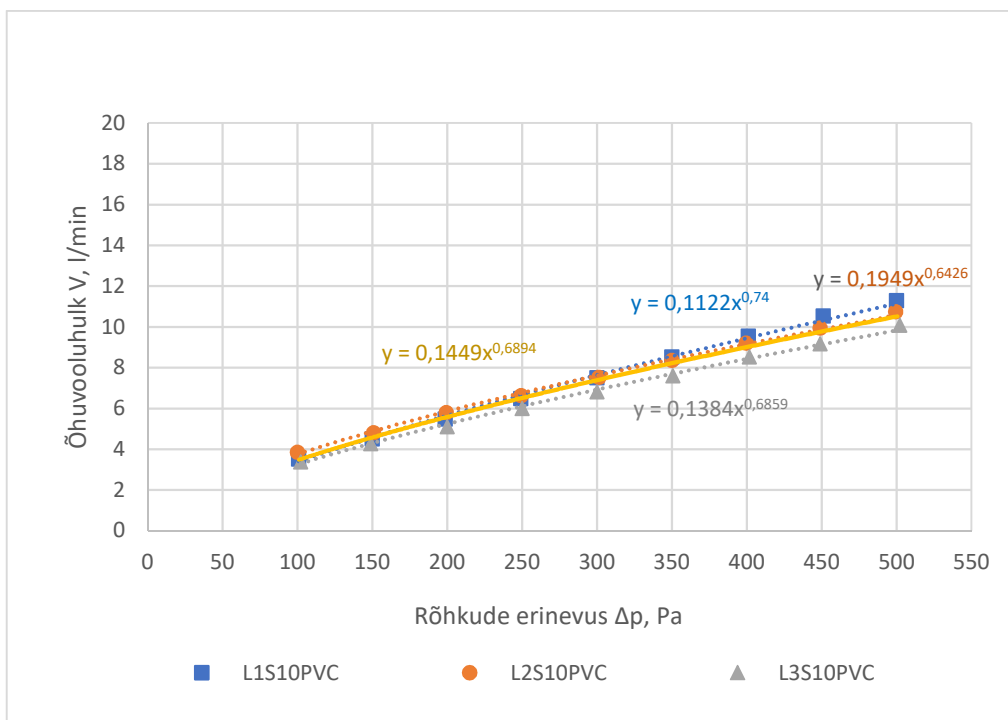
Joonis 5.61 LXL10PVC, ülerõhk



Joonis 5.62 LXL10PVC, alarõhk

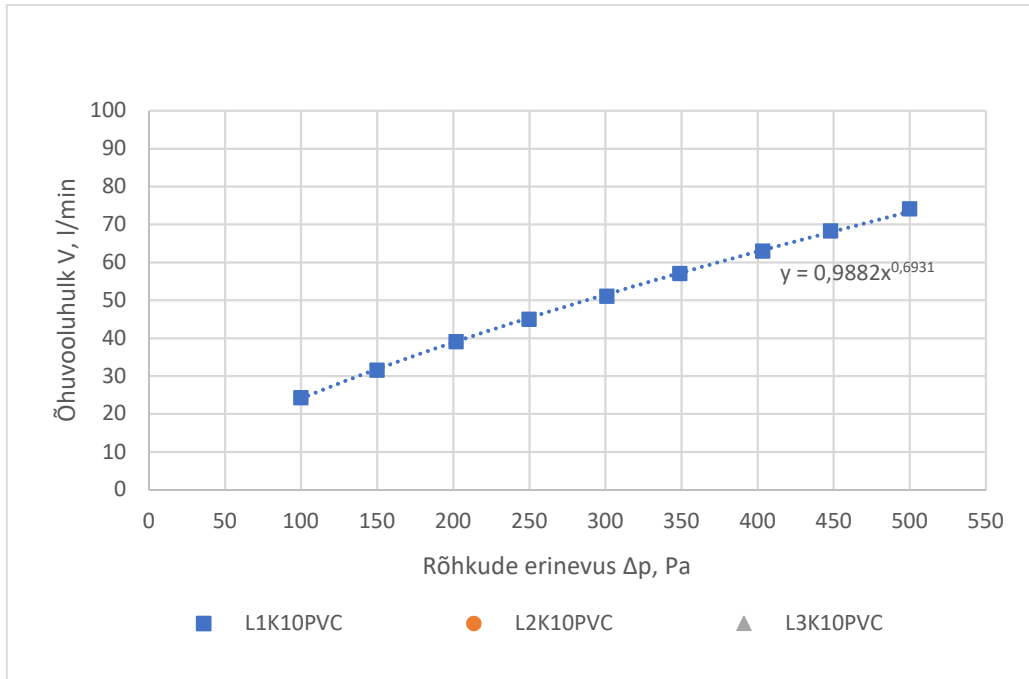


Joonis 5.63 LXS10PVC, ülerõhk

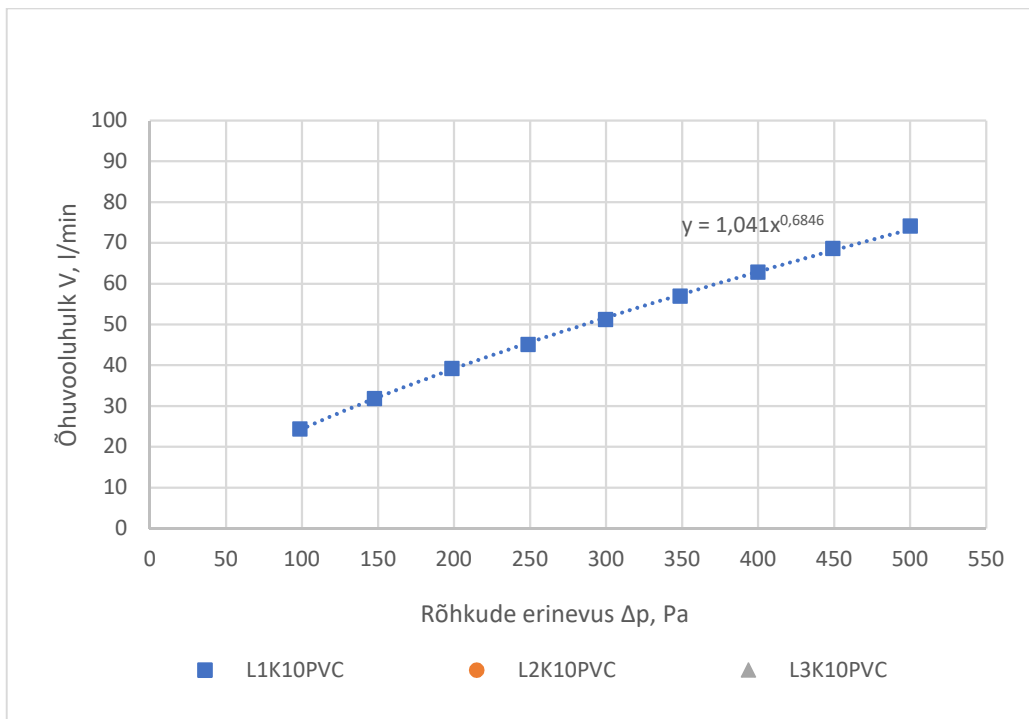


Joonis 5.64 LXS10PVC, alarõhk

Katsekehad L2K10PVC (vt Joonis 4.65) ja L3K10PVC (vt Joonis 4.66) olid liiga õhuhõredad, mistõttu polnud võimalik katseid läbi viia. Õhuhõredus on ilmselt põhjustatud lekkekohtadest PVC teibi ja hõõvelpuidu pinna vahel. Praod teibi ja puidupinna vahel on visuaalselt tuvastatavad.



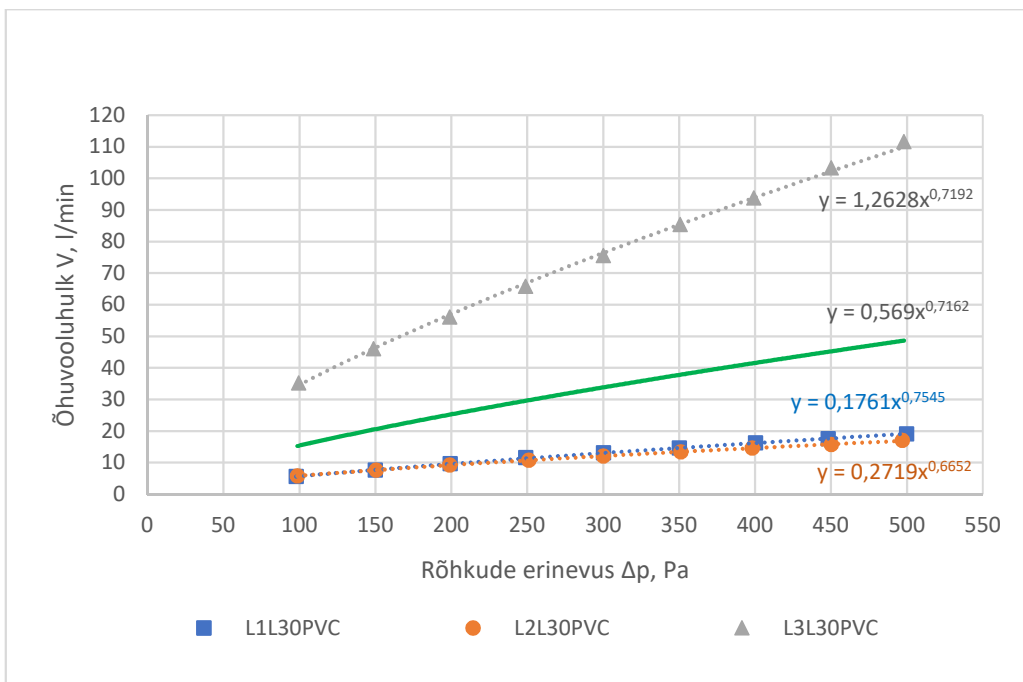
Joonis 5.65 L1K10PVC, ülerõhk



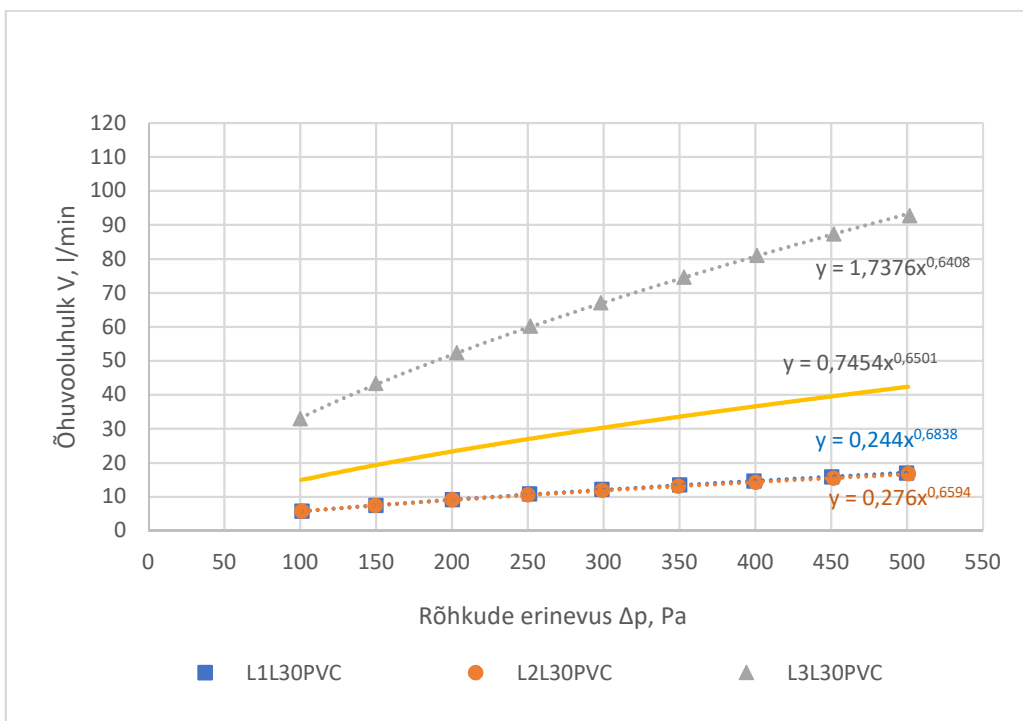
Joonis 5.66 L1K10PVC, alarõhk

5.1.12 Lõigatud montaaživahuga PVC kattega katsekehad vuugiga 30 mm

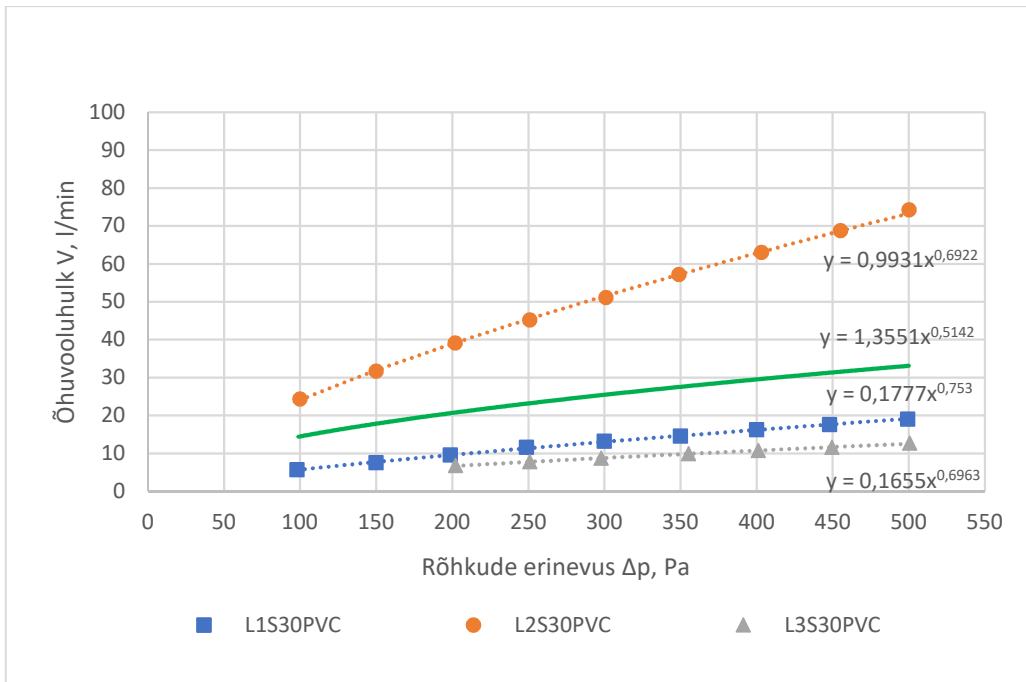
9-st antud tüüpi katsekehad üs katsekeha (11%) (vt Joonis 5.69, Joonis 5.70) oli liiga õhutihe, mistõttu pole saavutatud rõhuastmestikku 100...500 Pa täies ulatuses (EVS-EN 12114:2000).



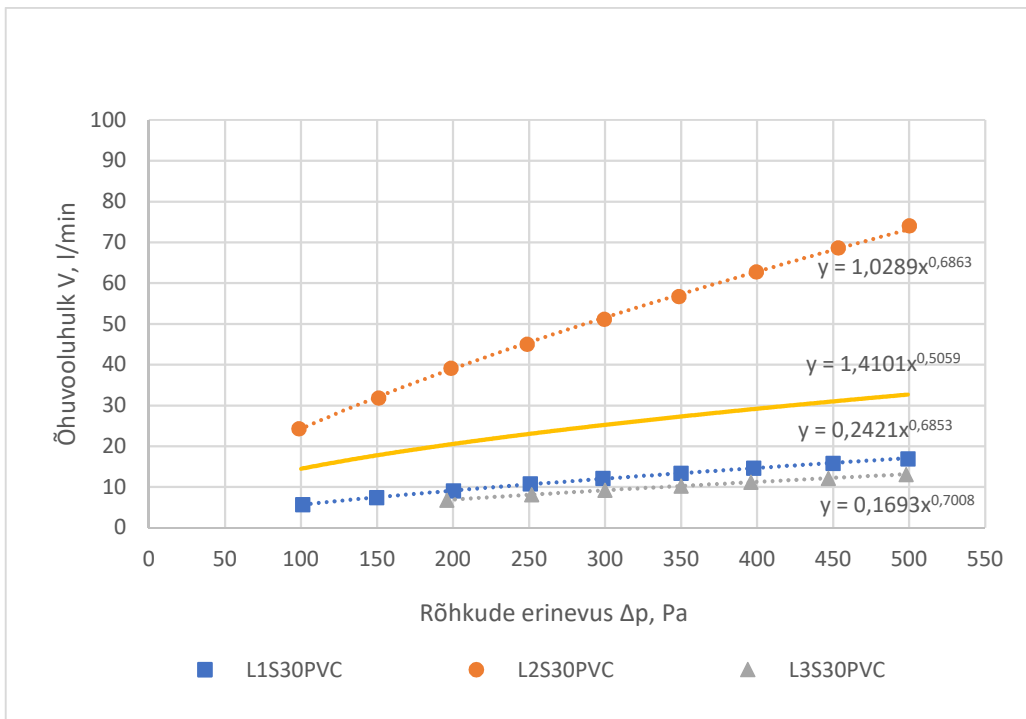
Joonis 5.67 LXL30PVC, ülerõhk



Joonis 5.68 LXL30PVC, alarõhk

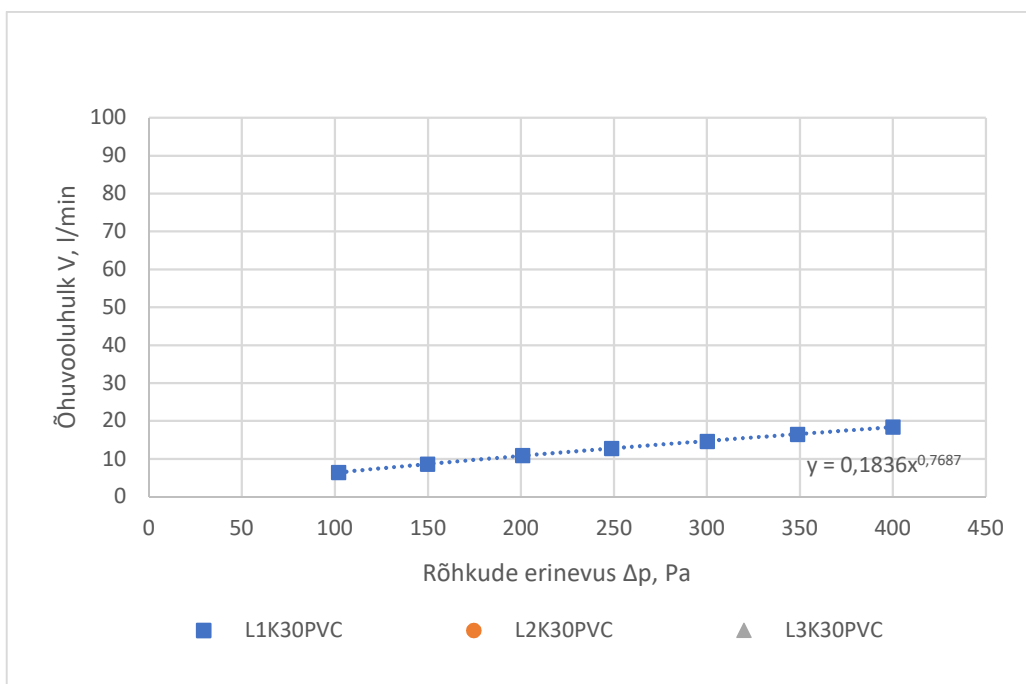


Joonis 5.69 LXS30PVC, ülerõhk

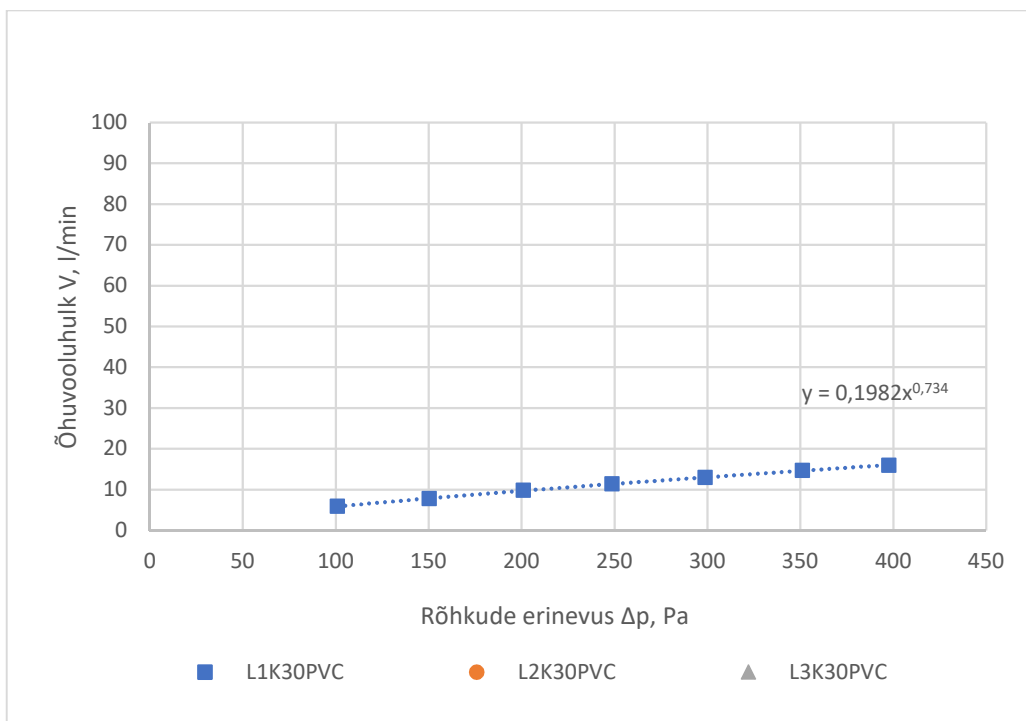


Joonis 5.70 LXS30PVC, alarõhk

Katsekehad 2K30PVC (vt Joonis 4.71) ja 3K30PVC (vt Joonis 4.72) olid liiga õhuhõreded, mistõttu polnud võimalik katseid läbi viia. Õhuhõredus on ilmselt põhjustatud lekkekohtadest PVC teibi ja hõõvelpuidu pinna vahel. Praod teibi ja puidupinna vahel on visuaalselt tuvastatavad.



Joonis 5.71 L2K30PVC, ülerõhk



Joonis 5.72 L2K30PVC, alarõhk

5.2 Tulemuste kokkuvõte

Antud uurimuse raames tehtud katsete mõõtmistulemused on kokku võetud tabelis Tabel 5.2. Tabelis esitatud iga õhulekkearv esindab kolme sama tüüpi katsekeha aritmeetilist keskmist. Eranditeks on LXL10SL ja LXX30SL, mille puhul on arvestatud kahe katsekeha tulemuse aritmeetilist keskmist, ning LXX10PVC ja LXX30PVC, mille keskmise tulemuse arvutamise asemel on arvestatud ainult ühe katsekeha tulemust. Põhjuseks tulemuste arvutamisel välja jäetud katsekehade liiga suur õhuhõredus, mistõttu külgkanalpuhur ei suutnud genereerida piisavalt suurt õhuvooluhulka rõhuerinevuste tekitamiseks ning seega polnud võimalik antud katseid läbi viia.

Antud uurimuses pole õhuvooluhulka vastavalt baastingimustele korrigeeritud, kuna on teadmata temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse muutuste mõju katsekehade õhulekete suurusele.

Tabelis esitatud õhulekkearvud on saadud õhuvooluhulga (l/min) jagamisel vastava katsekeha summaarse vuugipikkusega (m) (vt Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Katsekehatüüpide summaarne vuugipikkus

Katsekehatüüp	Summaarne vuugipikkus, m
Saelauast katsekeha vuugilaiusega 10 mm	9,82
Saelauast katsekeha vuugilaiusega 30 mm	5,89
Hööveldatud lauast katsekeha vuugilaiusega 10 mm	10,89
Hööveldatud lauast katsekeha vuugilaiusega 30 mm	6,93
PVC kattega katsekeha vuugilaiusega 10 mm	10,89
PVC kattega katsekeha vuugilaiusega 30 mm	6,93

Õhuvooluhulk 400 Pa ja -400 Pa juures arvutati trendijoontelt alarõhu- ja ülerõhu õhulekke graafikutel (EVS-EN 16798-7:2018).

Õhulekkearvud on valitud 400 Pa ja -400 Pa juures kuna kõigist 102-st katsetulemusest 46-l juhul (45%) on katsekeha olnud liiga õhutihe ning pole saavutatud tervet nõutud õhurõhkude erinevuse astmestikku (EVS-EN 12114:2000) vahemikus 100 Pa...500 Pa. See tähendab, et suurematel õhurõhkude erinevustel on saadud rohkem mõõtepunkte õhuvoolulekke kohta ning seega tulemused suurematel õhurõhkude erinevustel on usaldusväärsemad kui madalamatel õhurõhkude erinevustel.

Tabel 5.2 Katsekehatüüpide keskmised õhulekkearvu väärtused

Katsekehatüüp		Õhulekkearv, l/(min*m)		Ülerõhk		Alarõhk		
		400 Pa	-400 Pa	C	n	C	n	
Lõikamata montaaživaht								
MXL10SL	Saেলাud	10 mm	14,31	14,29	0,38	0,99	0,49	0,95
MXS10SL			1,19	1,42	0,14	0,73	0,56	0,54
MXK10SL			4,36	2,98	0,37	0,79	0,71	0,62
MXL30SL		30 mm	7,21	4,96	0,39	0,78	0,72	0,62
MXS30SL			5,65	3,74	0,44	0,72	0,48	0,64
MXK30SL			9,90	6,64	0,77	0,72	0,57	0,71
MXL10HL	Höövellaud	10 mm	0,78	0,69	0,31	0,55	0,38	0,50
MXS10HL			0,28	0,26	0,36	0,36	0,37	0,34
MXK10HL			0,29	0,26	1,15	0,17	0,91	0,19
MXL30HL		30 mm	0,80	0,79	0,06	0,75	0,14	0,62
MXS30HL			0,32	0,62	0,35	0,31	0,13	0,58
MXK30HL			1,00	0,59	0,003	1,29	0,77	0,28
MXL10PVC	PVC kate	10 mm	1,09	1,06	0,15	0,73	0,14	0,74
MXS10PVC			1,24	1,12	0,29	0,64	0,27	0,63
MXK10PVC			1,48	1,37	0,13	0,80	0,16	0,75
MXL30PVC		30 mm	1,58	1,40	0,19	0,68	0,21	0,64
MXS30PVC			3,98	3,35	0,18	0,84	0,45	0,66
MXK30PVC			1,32	1,30	0,05	0,85	0,07	0,82
Lõigatud montaaživaht								
LXL10SL	Saেলাud	10 mm	5,80	3,83	1,14	0,65	1,37	0,55
LXS10SL			3,26	2,28	0,79	0,62	0,52	0,63
LXK10SL			0,76	0,65	0,40	0,49	0,52	0,42
LXL30SL		30 mm	1,48	1,25	0,27	0,58	0,32	0,52
LXS30SL			1,01	0,83	0,15	0,62	0,26	0,49
LXK30SL			5,09	3,47	0,64	0,64	0,63	0,58
LXL10HL	Höövellaud	10 mm	0,56	0,20	0,15	0,61	0,04	0,68
LXS10HL			0,34	0,32	0,38	0,38	0,76	0,25
LXK10HL			0,35	0,31	1,30	0,18	0,70	0,26
LXL30HL		30 mm	1,52	1,32	0,76	0,44	0,55	0,47
LXS30HL			0,34	0,31	0,05	0,63	0,19	0,41
LXK30HL			0,33	0,32	0,46	0,27	0,14	0,46
LXL10PVC	PVC kate	10 mm	1,11	1,08	0,11	0,78	0,11	0,77
LXS10PVC			0,84	0,83	0,11	0,74	0,14	0,69
LXK10PVC			5,77	5,78	0,99	0,69	1,04	0,68
LXL10PVC		30 mm	6,00	5,29	0,57	0,72	0,75	0,65
LXS30PVC			4,26	4,22	1,36	0,51	1,41	0,51
LXK30PVC			6,00	5,29	0,57	0,72	0,75	0,65

6 TULEMUSTE HINDAMINE

Katsetulemusi iseloomustab suur hajuvus (vt Joonis 6.2). See võib olla osaliselt põhjustatud asjaolust, et katsetulemusi mõjutavad katsete meetodidest tulenevad tegurid, mille mõju ulatust on keeruline kindlaks teha:

- tõenäoliselt on üheks teguriks katsekehade ebaühtlase kvaliteediga sängitamine lekkekambrisse ning pitskruvidega surumine vastu tihendit (vt Joonis 4.9 Hermeetiline lekkekamber);
- teiseks teguriks võivad olla suuremad lokaalsed õhulekked raami ning montaaživahu liitekohas, sealhulgas katsekehade otstes, kus montaaži vaht pole vuuke täielikult täitnud;
- kolmandaks teguriks võib olla asjaolu, et osade katsekehade väljaulatuv montaaži vaht on ebaühtlaselt lõigatud (montaaži vaht pole ühtlaselt paisunud katsekeha tasapinnast kõrgemale, et seda saaks vuugi täies ulatuses lõigata);
- neljandaks teguriks võib olla asjaolu, et katsete teostamise periood oli enam kui kaks kuud (vt ptk 2), mille jooksul vuukidesse lastud montaaživahu omadused võisid muutuda sellisel määral, et need mõjutasid katsetulemusi. PVC kattega katsekehade puhul võis mõjutada katsetulemusi PVC teibi ja raami puitpinna liitekohta õhupidavus;
- viiendaks, katsetulemusi mõjutab samuti montaaživahu laskjate töövõtted. Kuigi montaaživahud paigaldasid kogenud spetsialistid ning järgiti vastava toote paigaldusjuhiseid, on iga inimese „käekiri“ mõnevõrra erinev.

Kõige paremad (kõige väiksema õhulekkega) keskmised tulemused saavutati hõõvellauast katsekehade, seejuures vuugi laiuse mõju antud tulemustele on ebaselge. Lõikamata montaaživahuga tulemuste arvestuses on 10-mm vuugilaiusega katsekehade keskmised tulemused paremad kui 30-mm vuugilaiusega katsekehade keskmised tulemused. Põhjuseks võib olla asjaolu, et laiemas vuugis on montaaživahu „paisumispinge“ väiksem ning seetõttu pole liitekoht montaaživahu ning puitpinna vahel nii õhutihe. Seevastu lõigatud montaaživahuga tulemuste arvestuses on mõlema vuugilaiusega katsekehade keskmised tulemused väga lähedased (v.a „lilla“ montaaživahu puhul).

Saelauast katsekehade tulemuste hajuvus on väga suur. Ilmselt tuleneb see saelaua pinna ebatasasest ning „karvasest“ pinnast, mille mikroõõnsusi puidukiudude vahel ei suuda montaaži vaht täielikult täita. Siiski võib tulemuste põhjal järeldada, et saelauast katsekehade tulemused on selgelt kehvemad kui hõõveldatud lauast katsekehade tulemused.

PVC kattega katsekehade tulemusi mõjutas ilmselt küllaltki palju PVC teibi ning hõõveldatud puitpinna liitekohta leke. Lekkekohad olid mõnedel katsekehadel visuaalselt tuvastatavad (vt

Joonis 6.1 Praod PVC teibi ja hõõveldatud laua on vahel visuaalselt näha. Sellegipoolest, jättes arvestamata lõigatud vahuga ning 30-mm vuugiga katsekehade tulemused, on PVC kattega katsekehade tulemuste hajuvus küllaltki väike, mis tuleneb tõenäoliselt PVC teibi ühtlastest pinnaomadustest. Lisaks võib üldistatult väita, et PVC kattega katsekehade keskmised tulemused jäävad hõõvellauast ning saelauast katsekehade keskmiste tulemuste vahele.

Katsekehade väljaulatuva montaaživahu lõikamise mõju tulemustele on ebamäärane. Osade katsekehade tulemused lõigatud montaaživahuga on isegi paremad. See võib olla põhjustatud katsemetoodikast tulenevatest teguritest kui ka asjaolust, et lõigatud montaaživaht on enam avatud õhuniiskusele, mille toimel polüuretaanvahu kõvastumine jätkub ning vaht saavutab paremad õhupidavuse omadused. Võimalik, et see protsess teatud katsekehade puhul korvab montaaživahu lõikamisel avanevate pooride kaudu suureneva õhulekke.

Tulemuste erinevus montaaživahtude lõikes tuleb kõige selgemalt välja hõõvellauast katsekehade puhul. „Sinise“ (Soudal Flexifoam Gum) ja „kollase“ (Soudal kollane püstoliivaht) montaaživahu keskmised tulemused on paremad kui „lillal“ montaaživahul (Enerest Poroloon Gunfoam).

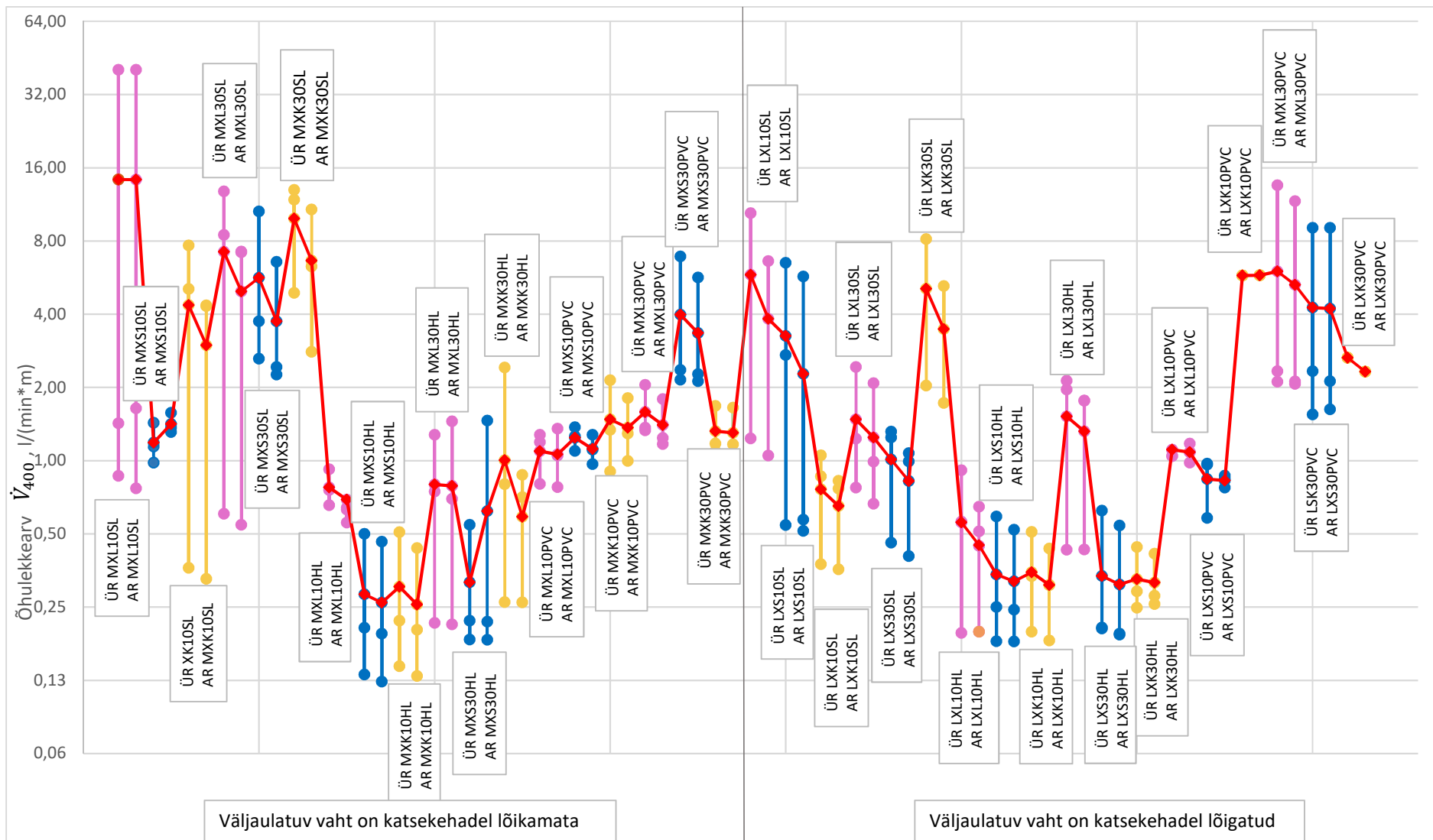


Joonis 6.1 Praod PVC teibi ja hõõveldatud laua on vahel visuaalselt näha

Katsekehade tulemusi alarõhu ja ülerõhu tingimustes võrreldes on saadud paremaid tulemusi alarõhukatsete puhul. Tõenäoliselt põhjustab seda alarõhust katsekehale tekkiv lisasurvejõud (lisaks pitskruvide põhjustatud survele), tänu millele on katsekeha lekkekambris paremini surutud vastu tihendit (vt Joonis 4.9).

Tallinna Tehnikaülikoolis läbi viidud uuring (Kalamees, Alev, ja Pärnalaas, 2017) puitkarkassiga elementmajade liitekohtade (sealhulgas välisseina ja akna liitekoht) õhupidavuse kohta tõi välja, et konstruktsiooni liitekohtade testimine laboritingimustes ning samade konstruktsioonilahendustega hoonete testimine välitingimustes andsid väga erinevaid tulemusi. Uuringus käsitletavate nelja hoone õhulekkearv, q_{50} välitingimustes mõõdetuna oli keskmiselt 8,7 korda suurem laboritingimustes saadud väärtustest. Õhuvahetuskordsus n_{50} väärtused välitingimustes mõõdetuna olid keskmiselt 8,9 korda suuremad laboritingimustes saadud väärtustest. Saadud tulemuste peamise põhjusena on välja toodud kõikuv ehituskvaliteet objektil.

Selle uuringu tulemustest lähtuvalt võib ka käesoleva uuringu raames järeldada, et välisseina-akna liitekohtade tihendamine polüuretaanvahuga objektil võib olla oluliselt kehvemate tulemustega kui laboritingimustes saadud tulemused. Lisaks suurendab montaaživahuga tihendatud vuukide õhuleket akende seinaelemendi monteerimiseks ja kinnitamiseks vajalikud kinnitid (Bracke jt, 2014).



Joonis 6.2 Katsekehade tulemuste koondgraafik: ür- ülerõhk, ar- alarõhk

7 JÄRELDUSED

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on laboratoorsete katsete tulemuste põhjal hinnata õhuvooluleket läbi polüuretaan montaaživahuga tihendatud vuukidega katsekehade ning analüüsida, missugused katsekehade omadused mõjutavad vuukide õhuleket. Katsete läbiviimiseks sängitati ning tihendati katsekehad hermeetilisesse lekkekambrisse, kus tekitati nii alarõhk kui ka ülerõhk. Saadud tulemuste põhjal koostati õhulekkegraafikud, mille alusel arvutati välja vastavad õhulekkearvud ($l/(m \cdot \text{min})$) 400 ja -400 Pa juures. Katsekehasid testiti kahes faasis: väljaulatuv montaaživaht katsekehadel on lõikamata ning väljaulatuv montaaživaht katsekehadel on lõigatud. Uurimuses testiti kolme tüüpi püstoliga lastavat polüuretaan montaaživahtu, millel on tooteinfost lähtudes väga head elastsusomadused ning kujustabiilsus.

Katsetulemusi iseloomustab suur hajuvus, mis võib olla osaliselt põhjustatud mitmesugustest katsemetoodikast tulenevatest teguritest, mille ulatust on keeruline hinnata. Sellegipoolest on võimalik leida katsekehatüüpide keskmistes tulemustes teatud seaduspärasusi.

Kokkuvõtvalt võib katsetulemuste põhjal järeldada, et polüuretaan montaaživahuga tihendatud vuukide õhuleket mõjutab väga suurel määral vuugi pinna viimistlus. Ehituspraktikas tuleb silmas pidada, et saepuidust pinna viimistlusega vuukide õhupidavus võib olla väga kõikuv. Seevastu hööveldatud puidu pinna viimistlusega vuukide õhupidavus on selgelt parem, seejuures vuugi laiuse ning montaaživahu omaduste mõju tulemustele on selgemini määratletav.

PVC pinnaviimistlusega vuukide keskmised õhulekkearvu väärtused paigutuvad eespool kirjeldatud vuugitüüpide keskmiste väärtuste vahele. PVC pinnaviimistlusega vuukide tulemused (mõne erandiga) olid küllaltki väikese hajuvusega võrreldes ülejäänud tulemustega, mis ilmselt tuleneb PVC teibi küllaltki ühtlastest pinnaomadustest.

Montaaživahu järeltöötuse (katsekehast väljaulatuva vahu mahalõikamine) mõju katsetulemustele on ebaselge. Lisaks katsemetoodikast tulenevatele teguritele võib mõju avaldada ka asjaolu, et lõigatud montaaživaht on enam avatud õhuniiskusele, mille toime polüuretaanvahu kõvastumine jätkub ning vaht saavutab paremad õhupidavuse omadused. Võimalik, et see protsess teatud katsekehade puhul korvab montaaživahu lõikamisel avanevate pooride kaudu suureneva õhulekke.

Tuleb arvestada, et tulemused saadi laboritingimustes, mistõttu võivad need olla väiksemad kui reaalsel ehitustöödel.

Hoonekonstruktsioonide liikumise ning soojuspaisumise ja kahanemise mõju polüuretaan montaaživahuga täidetud vuukide õhupidavusele vajab täiendavaid uuringuid.

8 SUMMARY

8.1 Introduction

The airtightness of the building envelope is a crucial factor considering the energy consumption of a building. Air leakage through a building envelope is determined by the result of air-pressure differences over the envelope, the distribution of air leakage locations and the airtightness of a building envelope. Uncontrolled air movement through a building envelope affects hygrothermal performance, thermal comfort, the effectiveness of ventilation systems, noise level and fire resistance.

When measuring air leakage, the airflow \dot{V} (m^3/h) through an opening for an applied pressure difference ΔP (Pa) is expressed by the empirical power law

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

with flow coefficient C ($m^3/(h * Pa)^n$) and flow exponent n ranging from 0,5 to 1. This equation can be also used in case of measuring the airtightness of components, such as doors, windows or construction details.

The objective of this study is to estimate the air leakage of joints filled with polyurethane montage foam (specimen) and compare the results of different type of joints. This was done by laboratory measurements of 54 specimen.

8.2 Methods

8.2.1 Tested specimen

One specimen consists of a wooden frame with cavities (joints) that were filled with polyurethane foam. The frames were made of three types of material- sawn timber laths, planed laths and planed laths covered with PVC tape. Three types of gun foams were tested all with high elastic recovery dimensional stability. Each type of specimen was tested three times.

8.2.2 Measuring methods

A special hermetic chamber (vat Joonis 4.9 Hermeetiline lekkekamber) was built for testing the air leakage through the specimen. The airtight chamber was connected to different measuring and controlling devices that all were connected to a data logger. The data logger collected data of both air pressure difference Δp (Pa) and corresponding air flow V ($l/(\text{min} * m)$) applied to the specimen in the airtight chamber.

The airtightness of the specimen were measured according to standard EVS EN 12114:2000. Readings of air leakage were taken at pressure steps of 100 Pa to 500 Pa for both positive and

negative pressure in the airtight chamber. According to the standard the pressure steps should be chosen so that at least seven measuring measuring points were emerged. Before the leakage test, three rapid pulses of 10-12% higher than the maximum pressure difference were carried out. To ensure reliable measuring points, 30 sec was spent for each step and pulse ensuring equilibrium of pressure and air flow was reached.

8.3 Results

The air leakage results through the specimen are summarized in Table 8.1.

The air leakage rate were calculated at 400 Pa and -400 Pa as almost half of the specimen were too airtight to take readings at pressure steps from 100...500 Pa (EVS-EN 12114:2000). It means that calculating the air leakage rate at higher pressure differences provided more reliable results.

Table 8.1 Average air leakage rates of specimen

Speciman		Air leakage rate, l/(min*m)		Overpressure		Underpressure		
		400 Pa	-400 Pa	C	n	C	n	
Results with uncut foam								
MXL10SL	Sawn laths	10 mm	14.31	14.29	0.38	0.99	0.49	0.95
MXS10SL			1.19	1.42	0.14	0.73	0.56	0.54
MXK10SL			4.36	2.98	0.37	0.79	0.71	0.62
MXL30SL		30 mm	7.21	4.96	0.39	0.78	0.72	0.62
MXS30SL			5.65	3.74	0.44	0.72	0.48	0.64
MXK30SL			9.90	6.64	0.77	0.72	0.57	0.71
MXL10HL	Planed laths	10 mm	0.78	0.69	0.31	0.55	0.38	0.50
MXS10HL			0.28	0.26	0.36	0.36	0.37	0.34
MXK10HL			0.29	0.26	1.15	0.17	0.91	0.19
MXL30HL		30 mm	0.80	0.79	0.06	0.75	0.14	0.62
MXS30HL			0.32	0.62	0.35	0.31	0.13	0.58
MXK30HL			1.00	0.59	0.003	1.29	0.77	0.28
MXL10PVC	PVC tape	10 mm	1.09	1.06	0.15	0.73	0.14	0.74
MXS10PVC			1.24	1.12	0.29	0.64	0.27	0.63
MXK10PVC			1.48	1.37	0.13	0.80	0.16	0.75
MXL30PVC		30 mm	1.58	1.40	0.19	0.68	0.21	0.64
MXS30PVC			3.98	3.35	0.18	0.84	0.45	0.66
MXK30PVC			1.32	1.30	0.05	0.85	0.07	0.82
Results with cut foam								
LXL10SL	Sawn laths	10 mm	5.80	3.83	1.14	0.65	1.37	0.55
LXS10SL			3.26	2.28	0.79	0.62	0.52	0.63
LXK10SL			0.76	0.65	0.40	0.49	0.52	0.42
LXL30SL		30 mm	1.48	1.25	0.27	0.58	0.32	0.52
LXS30SL			1.01	0.83	0.15	0.62	0.26	0.49
LXK30SL			5.09	3.47	0.64	0.64	0.63	0.58

Table 8.1 continued

Speciman		Air leakage rate, l/(min*m)		Overpressure		Underpressure		
		400 Pa	-400 Pa	C	n	C	n	
LXL10HL	Planed laths	10 mm	0.56	0.20	0.15	0.61	0.04	0.68
LXS10HL			0.34	0.32	0.38	0.38	0.76	0.25
LXK10HL			0.35	0.31	1.30	0.18	0.70	0.26
LXL30HL		30 mm	1.52	1.32	0.76	0.44	0.55	0.47
LXS30HL			0.34	0.31	0.05	0.63	0.19	0.41
LXK30HL			0.33	0.32	0.46	0.27	0.14	0.46
LXL10PVC	PVC tape	10 mm	1.11	1.08	0.11	0.78	0.11	0.77
LXS10PVC			0.84	0.83	0.11	0.74	0.14	0.69
LXK10PVC			5.77	5.78	0.99	0.69	1.04	0.68
LXK10PVC		30 mm	6.00	5.29	0.57	0.72	0.75	0.65
LXS30PVC			4.26	4.22	1.36	0.51	1.41	0.51
LXK30PVC			6.00	5.29	0.57	0.72	0.75	0.65

8.4 Discussion

The air leakage results are characterized by high dispersion which can be partly accounted for measuring methods. Nevertheless, some relations can be found by comparing the average air leakage rates.

The best results were obtained with specimen made of planed laths, while the effect of the joint width (10 mm and 30 mm) on the given results is unclear. The effect of joint width can be clearly seen only regarding the results of specimen with uncut foam. The results with joint width of 30 mm are poorer. The reason might be that as wider is the width of joint the smaller is pressure applied by expanding foam to joint surfaces.

The dispersion of the results of the specimen made of sawn laths is very wide. The reason might be that the properties of the surface of sawn laths is not homogenous. In addition, it is likely that foam cannot fill microcavities between the wood fibers effectively. Nevertheless, it can be seen clearly that the given results are poorer than the results of specimen with planed laths.

The results of the specimen with PVC coating were likely to be influenced by the air leakage through the connection of the tape and wood surface (the locations of the leakages are visually detectable on some specimen). In general, the given results are better than the results of specimen with sawn laths and poorer than the results of specimen with planed laths.

The effect of cutting the upper layer of foam is unclear. The results of some of the specimen with cut foam are better than the results with uncut foam. This may be caused by the test methods as well as the assumption that cut foam is more exposed to the air humidity, which extends the

hardening process and therefore foam achieves better airtightness properties. It can be assumed that in some cases this phenomenon compensates increased air leakage due to opening the pores by cutting the foam.

The difference between the results in terms of differed tested foams is the most apparent with the specimen with planar panels. The average results of Soudal foams were better than the average results of Enerest foam.

8.5 Conclusion

In conclusion, based on the measurement results, the surface finish of joints have a significant effect on the air leakage rate of joints. In everyday construction practice, it should be considered that the airtightness of the faom filled joints with sawn timber surface finish can give very variable results. On the other hand, the airtightness of foam filled joints with plane wood surface finish give much better results and, moreover, the effect of foam type and joint width on the air leakage can be more easily distinguished. It should be taken into consideration that the results obtained in laboratory conditions may be better than the ones obtained in site.

9 KASUTATUD KIRJANDUS

- Alev, Ü., Antsov, P., & Kalamees, T. (14-17 June 2015). Air leakage of concrete floor and foundation joints. *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*, (lk 2046-2051). Turin.
- Alev, Ü., Uus, A., & Kalamees, T. (11-14 June 2017). Airtightness improvement solutions for log wall joints. *11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017*, (lk 861-866). Trondheim.
- Andmeloger Grant Squirrel SQ 2010*. (10. mai 2018. a.). Allikas: <http://www.grantinstruments.com/squirrel-sq2010-data-logger/>
- Bracke, W., Devos, L., Maertens, S., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2014). Airtightness of the window-wall interface in wood-frame wall. *DBCM Conference Proceedings*, (lk 562-572).
- Diferentsiaalmanomeeter Pro dual PEL-DK-d*. (10. mai 2018. a.). Allikas: http://www.pro dual.com/en/shop/web_differential_pressure_transmitters_for_air/sku-1131201
- Enerest Poroloon Gunfoam*. (10. mai 2018. a.). Allikas: http://www.enerest.ee/wp-content/uploads/2016/09/PUdeliPOROLOON_TDS_EST_5.02.16.pdf
- EVS-EN 12114:2000. Thermal performance of buildings- Air permeability of building components and building elements- Laboratory test method. (kuupäev puudub).
- EVS-EN 16798-7:2018. Energy performance of buildings- Ventilation for buildings- Part 7: Calculation methods for the determination of air flow rates in building including infiltration (Modules M5-5). (kuupäev puudub).
- EVS-EN ISO 9972:2015. Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhulekke määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod. (kuupäev puudub).
- Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakage of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42(6), 2369-2377.
- Kalamees, T., & Loorits, K. (2008). *Elamute õhulekkearvu baasväärtuste väljaselgitamine ja õhulekkearvu muul viisil tõendamise meetoodika väljatöötamine*. Uurimistöö, Tallinna Tehnikaülikool.
- Kalamees, T., Alev, Ü., & Pärnalaas, M. (2017). Air leakage levels in timber frame building envelope joints. *Building and Environment*(116), 121-129. Allikas: www.elsevier.com/locate/buildenv
- Külgkanalpuhur Elmo Rietchle G-BH1*. (10. mai 2018. a.). Allikas: <http://www.gd-elmorietschle.com/en/products/side-channel/vacuum-pumps-g-bh1>
- Pärnalaas, M. (2015). *Puitsõrestik välisseina liitekohtade õhulekke laboratoorne analüüs*. Uurimistöö, Tallinna Tehnikaülikool.
- Sagedusmuundur EATON DC1-S24DNN-A20N*. (10. mai 2018. a.). Allikas: <http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/AutomationControl/SwitchingProtectingDrivingMotors/PowerXLfrequencydrives/DC1Compactdrives/index.htm>

Soudal Flexifoam Gum. (10. mai 2018. a.). Allikas: <https://www.soudal.ee/index.php/pu-foams/item/28-soudafoam-flexifoam>

Soudal kollane püstolivaht. (10. mai 2018. a.). Allikas: <https://www.soudal.ee/index.php/pu-foams/item/36-kollane-p%C3%BCstolivaht>

Van Den Bossche, N., Huyghe, W., Moens, J., Janssens, A., & Depaepe, M. (2012). Airtightness of the window- wall interface in cavity brick walls. *Energy and Buildings*(45), 32-42. Allikas: www.elsevier.com/locate/enbuild

Vooluhulkade mõõtja Dwyer GFC. (10. mai 2018. a.). Allikas: <http://www.dwyer-inst.com/Product/Flow/MassFlowmetersandControllers/SeriesGFC#features>