



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**VÄLISSEINAL PAIKNEVATEST VENTILATSIOONI
HEITÕHU VÄLJAVISETEST PÄRIT SAASTEAINETE
HAJUMINE TÄNAVAKANJONIS**

**POLLUTANT DISPERSION FROM EXTERNAL WALL
MOUNTED VENTILATION EXHAUST OUTLETS IN AN
URBAN CANYON**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kerli Krõm
/nimi/

Üliõpilaskood: 110501 EAKI

Juhendaja: Ülar Palmiste, doktorant
/nimi, amet/

Tallinn, 2021

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.

“.....” 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

.....

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ Kerli Krõm _____ (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 09.04.1992)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ VÄLISSEINAL PAIKNEVATEST VENTILATSIOONI HEITÕHU _____
_VÄLJAVISETEST PÄRIT SAASTEAINETE HAJUMINE TÄNAVAKANJONIS _____,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on

_____ Ülar Palmiste _____,

(*juhendaja nimi*)

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

TalTech Ehituse ja arhitektuuri instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kerli Krõm, 110501EAKI.....(nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EAKI02/09, Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): doktorant, Ülar Palmiste, (+372) 58133340..(amet, nimi, telefon)
Konsultant:(nimi, amet)
.....(ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Välisseinal paiknevatest ventilatsioonihoidõhu väljavisetest pärit saasteainete hajumine tänavakanjonis*

(inglise keeles) *Pollutant dispersion from external wall mounted ventilation exhaust outlets in an urban canyon*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada CFD programmis tänavakanjoni simulatsioonimudel vastavalt tuuletunnelis katsetatud kanjonile
2. Uurida saasteainete levikut vastavalt ventilatsioonihoidõhu avade asukohtadele fassaadil
3. Uurida hoidõhu väljaviske suuna mõju saasteainete levikule

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö teoreetilised alused (tänavakanjon, välisõhu saasteained)	22.12.2020
2.	Mõõteandmete pakstile vastava võrdluskanjoni defineerimine (geomeetria)	15.01.2020
3.	Võrdluskanjoni mudeli koostamine (kiiruse profiilide järgi valideerimine)	01.02.2021
4.	Saasteaine lisamine	01.03.2021
5.	Hoidõhu olukordade defineerimine ja tänavakanjoni simulatsioon	29.03.2021
6.	Simulatsiooni analüüs	05.04.2021
7.	Lõputöö koostamine	03.05.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "17." mai 2021

Üliõpilane: "....."202....a
/allkiri/

Juhendaja: "....."202....a
/allkiri/

Konsultant: "....."202....a
/allkiri/

Programmijuht:..... "....."202....a
/allkiri/

SISUKORD

LÜHENDITE JA SÜMBOLITE LOETELU	7
1. TEOREETILISED ALUSED	11
1.1 Ülevaade sarnastest uuringutest	11
1.2 Tänavakanjon	12
1.2.1 Tänavakanjoni liigitus	12
1.2.2 Õhu liikumine tänavakanjonis	13
1.3 Võimalik saaste heitõhus	15
2. MEETODID.....	17
2.1 Uuringute aluseks oleva füüsilise mudeli kirjeldus.....	17
2.2 CFD Mudel	18
2.3 Arvutusmudeli seadistus.....	19
2.4 Töö lahenduse ülekandmise võimalused reaalsusesse	24
2.5 Mudeli valideerimine	24
3. TULEMUSED JA ARUTELU.....	31
3.1 Kiiruse modelleerimine.....	31
3.2 Saasteaine kontsentratsioonide modelleerimine	33
3.3 Tulemuste hindamine.....	58
JÄRELDUSED.....	69
KOKKUVÕTE	71
SUMMARY.....	72
KASUTATUD KIRJANDUS	74

LÜHENDITE JA SÜMBOLITE LOETELU

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Ameerika kütte-, jahutus- ja ventilatsiooniinseneride ühing

C_f – hõõrdekoefitsient

C_o – iseloomulik suurus füüsilisel katsel

C_p – iseloomulik suurus modelleerimistulemustel

$C_{\text{uuritav punkt}}$ – saasteaine kontsentratsioon uuritavas mudeli punktis

$C_{\text{väljavise}}$ – saasteaine kontsentratsioon väljaviske ava ees

CFD – *Computational fluid dynamics*, arvutuslik vedeliku dünaamika, modelleerimise meetod

CO – süsinikoksiid ehk vingugaas

CO₂ – süsinikdioksiid ehk süsihappegaas

D – mudelkatsetuses dimensioneeritud tänavakanjoni moodustavate hoonete laius

DF – *dilution factor*, lahjendustegur

FFID – *fast-response flame ionisation detector*, kontsentratsiooni mõõtesead

H – mudelkatsetuses dimensioneeritud tänavakanjoni moodustavate hoonete kõrgus

H_{hoone} – tuuletunnelikatsetuses kasutatud hoonete kõrgus

H_{mudel} – mudelkatsetuses dimensioneeritud arvutusala kõrgus

$H_{\text{tuuletunnel}}$ – tuuletunneli kõrgus

$H1/H2$ – hoone kõrguste omavaheline suhe

H/W – hoone kõrguse suhe kanjoni laiusesse

IRF – *isolated roughness flow*, voolamine üle isoleeritud kareduselemendi

L – mudelkatsetuses dimensioneeritud tänavakanjoni moodustavate hoonete pikkus

L_{hoone} – tuuletunnelikatsetuses kasutatud hoone pikkus

L_{mudel} – mudelkatsetuses dimensioneeritud arvutusala pikkus

$L_{\text{tuuletunnel}}$ – tuuletunneli pikkus

$L_{\text{voolamine}}$ – mudeli iseloomulik voolamissuunaline pikkus

L/W – hoone pikkuse suhe kanjoni laiusesse

LES – *Large-Eddy simulation*, matemaatilise modelleerimise meetod

NMSE – *Normalized mean-square error*, kvantitatiivse valideerimise meetod

NO_x – lämmastikoksiidid

RANS – *Reynolds-averaged Navier-Stokes*, matemaatilise modelleerimise meetod

Re – Reynoldsi arv

SF – *Skimming flow*, voolamine üle tihedalt paiknevate kareduselementide

U_{ref} – õhu voolamise kiirus mudeli sisendil

u_{τ} – hõõrdekiirus

U_{2H}/U_{ref} – suhteline õhu voolamise kiirus

VOC – *volatile organic compound*, lenduv orgaaniline ühend

W – tänavakanjoni laius

W_{mudel} – mudelkatsetuses dimensioneeritud arvutusala laius

$W_{\text{tuuletunnel}}$ – tuuletunneli laius

WIF – *wake interface flow*, voolamine, mille puhul kareduselementide poolt tekitatud pöörised liituvad

y^+ – dimensioonitu kaugus seinast

y^p – pool elemendi kõrgusest

y/H – suhteline kõrgus tänavakanjoni põhjast

ρ – tihedus

μ – õhu dünaamiline viskoossustegur

τ_w – seinahõõrdepinge

SISSEJUHATUS

Seoses aastakümneid tihenunud linnastumisega on suurlinnades tihti probleeme õhu saastega. Õhukvaliteeti linnaruumis mõjutavad transpordist ja hoonetest tulenev heitõhk, ilmastik ning muud dünaamilised ja keemilised protsessid. Õhu saasteainete hajumist uuritakse kõige tihemini tänavakanjonites, sest nendes jäävad kanjonis tekkivate pöörise tõttu saasteained tsirkuleerima, põhjustades saasteaine kontsentratsiooni kasvu.

Saasteainete levikut tänavakanjonis on palju uuritud. Peamiselt on uuritud saasteainete levikut, mida põhjustab suurenev liikluskoormus [1]. Samuti leidub mitmeid uurimustöid selle kohta, kuidas aitavad puude olemasolu või hoonete parameetrite parem valik kaasa saasteainete hajumisele tänavakanjonis [2][3]. Vähem on aga teaduskirjanduses uuritud saasteainete hajumist sõltuvalt ventilatsiooni heitõhu väljaviske asukohast fassaadilt.

Kui õhureostus koguneb inimeste viibimistsooni, võib see tekitada ebameeldivustunnet (lõhnad, kõrge CO₂ kontsentratsioon jne). Hoonete heitõhu hindamine on oluline ka kõrvalasuvate hoonete õhukvaliteedi määramisel. Halvasti paigutatud õhuvõtuava võib muuta kogu hoone hästi projekteeritud ventilatsioonisüsteemi kasutuks.

EVS 906:2018 soovib alati võimalusel paigutada väljaviske ava katusele ja võtta õhku altpoolt heiteava. Paraku ei ole see alati võimalik, kuna tihti, eriti kortermajade puhul, asuvad korteripõhised õhuvõtu- ja heitavad iga korteri fassaadil. Seetõttu võib kortermajade vahelisse tänavakanjonisse sattuda erineva kvaliteedi ja lõhnaomadustega heitõhku, mida omakorda haaratakse samal fassaadil asuvatesse õhuvõtuavadesse.

Käesoleva töö ülesanne oli võrrelda saasteaine leviku dünaamikat sõltuvalt heitõhu väljaviskete paigutusest siledal fassaadil ning testida heitõhu väljaviske suuna mõju saasteainete levimisele. Lisaks uuriti õhu tsirkulatsioonist tekkivat heitõhu lahjendamist ja potentsiaalsete õhuhaarete paiknemist fassaadil. Töös käsitleti väljavisket kolmelt erinevalt kõrguselt, kahe erineva nurgaga – risti fassaadiga ja alla poole suunatud 45° nurgaga.

Tänavakanjoni modelleerimiseks kasutati Ansys Fluent programmi. Esmalt teostati mudeli valideerimine. Selleks modelleeriti matemaatiliselt füüsilised katsed, mis teostati Surrey Ülikoolis Enflo tuuletunnelis. Selleks taasloodi virtuaalselt tuuletunnelisse ehitatud tänavakanjoni mudel ning seejärel modelleeriti voolamine samadel tingimustel

kui füüsilisel mudelil. Valideeritud mudeli tänavakanjoni fassaadidel anti ette kuues erinevas paigas (kolm asukohta allatuult seinal ja kolm asukohta tuulepoolsel seinal) ventilatsiooni heitõhk ja hinnati selle levimist tänavakanjoni ulatuses.

Seoses Ansys Fluent Student versiooni piirangutega on saadud tulemuste rakendatavus piiratud teoreetiliste uurimustöödega. Saadud tulemuste viimiseks naturile vastava mudeli loomiseks on vajalik Ansys Fluent täisversiooni. Samas annab uurimustöö esialgsed hinnangud reostusaine leviku hindamiseks tänavakanjonis erinevate hoone ventilatsiooni heitõhu väljaviske asukohtade ja suundade jaoks.

Töö alguses antakse teoreetiline taust ja kirjeldatakse seni tehtud uuringuid. Seejärel kirjeldatakse mudeli valideerimist, misjärel esitatakse saadud tulemusi ja antakse töö lähteülesandes kirjeldatud soovitused.

1. TEOREETILISED ALUSED

1.1 Ülevaade sarnastest uuringutest

Ventilatsiooni heitõhu saasteainete hajumist tänavakanjonis on palju uuritud. Saasteainete levikut tänavakanjonis on võimalik uurida tuuletunneli abil või numbriliselt, kasutades arvuti tarkvara. Eelmise sajandi lõpul kasutati tänavakanjonite uurimiseks põhiliselt tuuletunneleid, sest arvutite võimsused olid madalad ning arvutusprogrammid veel mitte piisavalt täpsed. 2000. aastate esimese kümnendi keskel hakkas uuringute fookus kalduma numbriliste meetodite kasuks.

2003. aastal uurisid Vardoulakis et al. õhu kvaliteeti tänavakanjonis, pannes rõhku tänavakanjoni geomeetria kasutades „*computational fluid dynamics*“ (CFD) tarkvara [4]. Ahmad et al. koostasid 2005. aastal ülevaate tuuletunneli katsetest, mis käsitlesid õhu liikumist ja saasteainete levikut tänavakanjonis [5]. Ka Reiminger et al. uurisid 2019. aastal tänavakanjonis saasteainete levikut tulenevalt kanjoni geomeetriast. Töö käsitles erinevaid kanjoni külje kõrguse ja laiuse suhteid ning nende mõju saasteainete levikule. Reiminger et al. pakuvad oma töös välja saasteaine leviku arengu stsenaariumid ja mõju minimaliseerimise meetodid [6]. Cui et al. teostasid katseid kolme kõige tüüpilisema elamukvartali fassaadi tüüpidega (rõdudega, külgmiste ning ülemiste varjestuse paneelidega). Uurimusega leiti, et allatuult olevatel tänavakanjoni fassaadi külgedel on suurem saasteaine reostuse risk kui vastutuult fassaadi külgedel. Samuti on uuritud haljastuse mõju tänavakanjoni õhukvaliteedile [3]. Viimased neli uurimust pakuvad välja linnaplaneerimiseks vajalikud lähteandmed, madalama heitõhu reostusega tänavakanjonite projekteerimiseks [7].

Liu et al. modelleerisid 2019. aastal õhu liikumist ja saasteainete levikut tänavakanjonis olukorras, kus seal olevatel hoonetel avatakse aknad. Tulemused näitasid, et mida rohkem on tänavakanjonis avatud aknaid, seda rohkem kantakse õhusaastet tänavakanjonist välja [8].

Marucci et al. viisid 2019. aastal läbi põhjaliku katseseeria tuuletunnelis, uurides õhu voolamist tänavakanjonis ning selle piirikihis. Katseid tehti erinevate tunneli seinte ja põhja temperatuuridega ning võrreldi seda olukorraga, kus kanjoni temperatuur ei muutu. Leiti, et allatuult asetseva kanjoni seina kuumutamisel kanjonis tekkiva pöörise liikumise kiirus kasvab, mis vähendab saasteainete kogunemise riski allatuult

fassaadile. Antud töö tulemusel leiti, et tänavakanjoni seinte temperatuur mõjutab oluliselt õhu liikumist tänavakanjonis [9].

Selgub, et tänavakanjonite puhul on uuritud paljusid saasteaine levikut mõjutavaid parameetreid, kuid tähelepanuta on jäänud heitõhu väljaviske asukoha fassaadil paiknemise mõju hindamine. Käesolevas töös keskendutakse tänavakanjoni modelleerimisel ventilatsiooni heitõhu väljalaske asukohale fassaadil.

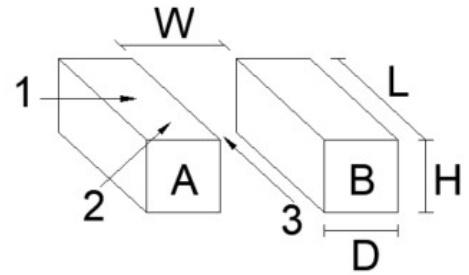
1.2 Tänavakanjon

1.2.1 Tänavakanjoni liigitus

1975. aastal defineeris Sharon E Nicholson tänavakanjonid järgmiselt: „Tänavakanjon on ideaalis kitsas tänav, mida ääristavad mõlemal küljel katkematult ehitised“ [10].

Sümmeetriliseks loetakse tänavakanjoneid juhul, kui võrreldavate hoonete kõrgused on võrdsed. Tänavakanjoni mõõtmeid võrreldakse järgmiste suhtarvudega: H/W (hoone kõrguse suhe tänavakanjoni laiusesse), L/W (hoone pikkuse suhe tänavakanjoni laiusesse). Tänavakanjonis võib tuul puhuda kanjoniga risti, nurga all või piki kanjoneid. Sõltuvalt tuule puhumise suunast jagatakse kanjonis olevad hooned alla- ja pealetuult paiknevateks hooneteks [11]. Joonis 1.1 illustreerib tänavakanjonile iseloomulikke definitsioone.

- A- Pealetuult asetsev hoone
- B- Allatuult asetsev hoone
- H- Tänavakanjoni moodustavate hoonete kõrgus
- L- Tänavakanjoni moodustavate hoonete pikkus
- W- Tänavakanjoni laius
- D- Tänavakanjoni moodustavate hoonete laius
- 1- Tuulesuund tänavakanjoni teljega risti
- 2- Tuulesuund tänavakanjoni teljega nurga all
- 3- Tuulesuund piki tänavakanjoni telge



Joonis 1.1 Tänavakanjonile iseloomulikud definitsioonid [11]

Tänavakanjon loetakse ebasümmeetriliseks, kui hoonete suhteline kõrgus kanjoni erinevatel pooltel ei ole võrdne. Ebasümmeetrilised kanjonid liigitatakse omakorda allatuult ning ülestuult kanjoniteks vastavalt tuule liikumise suunale [12].

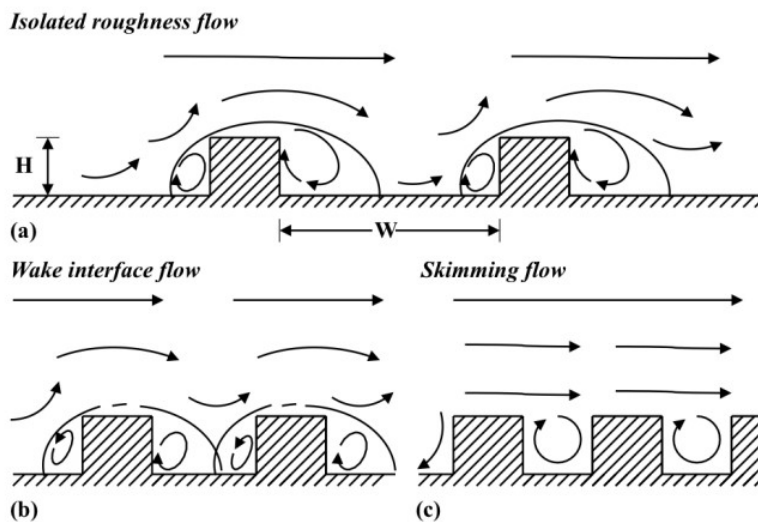
Suuremad õhuliikumise kiirused parandavad õhuvahetust tänavakanjonis ja seetõttu heitainete dispersioon suureneb. Eelmainitud tuulesuundadest on halvim versioon ristituul, mida uuritakse ka käesolevas töös [13].

1.2.2 Õhu liikumine tänavakanjonis

Joonis 1.2 kirjeldab lihtsamaid õhu voolamise skeeme tänavakanjonis. Joonise ülemise osa skeemil on kujutatud eraldiseisvat tänavakanjonit, milles hoonete kõrguse ja vahekauguse H/W on väiksem kui 0,3. Sellisest olukorrast tekkivat õhu voolamist nimetatakse *Isolated roughness flow (IRF)*. IRF voolamise puhul tekivad hoone ees ja taga pööristsoonid, mis ei ulatu teineteiseni. Hoonete vahekaugus on piisavalt suur, mistõttu kanjoni kohal olev õhuvoolamine ulatub kanjoni põhjani. Madalatel Reynoldsi väärtustel võib sellisel juhul tekkida kanjonis pööris, mis ei ole seotud üldise voolamisega ja pöörisesse sattunud heitõhk jääb hoone taha või ette tsirkuleerima, mistõttu õhk seal saastub [14].

Skeemil b on kirjeldatud *Wake interface flow (WIF)* voolamist, mille puhul jääb kõrguse ja vahekauguse suhe (H/W) vahemikku 0,3-0,7. Sellise olukorra puhul tekivad kanjonis oleva hoone ees ja taga teineteist mõjutavad pöörised.

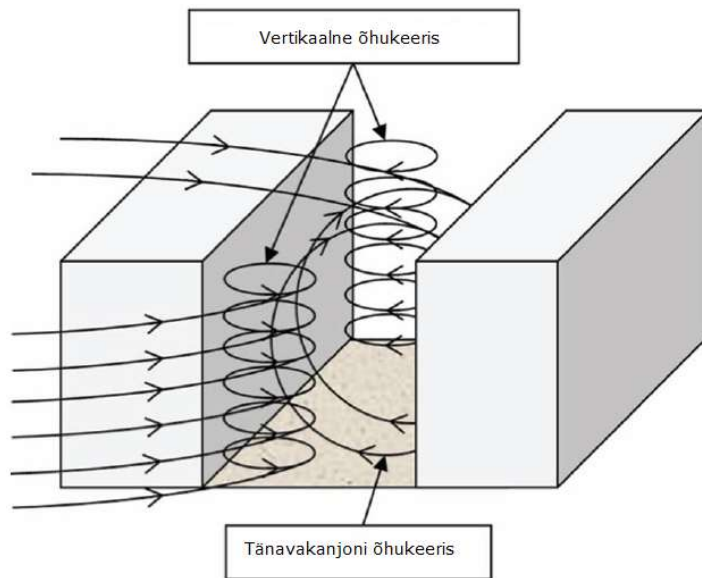
Skeemil c on kirjeldatud *Skimming flow (SF)* voolamist, mille puhul jääb kõrguse ja vahekauguse suhe (H/W) vahemikku 0,7-1,5. Kui H/W suhte väärtus on suurem kui 1,5, siis defineeritakse kanjoniit sügavaks kanjoniks. SF voolamisega kanjoni puhul on tegemist saasteainete hajumise aspektist kõige halvema voolamise viisiga. Sellisel juhul jääb suur osa saasteainest kanjonisse tsirkuleerima. Sügavate kanjonite puhul võib tekkida mitu üksteise kohal paiknevat pöörist, mis muudavad õhuvahetuse tänavakanjonis veelgi halvemaks.



Joonis 1.2 Õhu voolamise skeemid tänavakanjonis [13].

Ebasümmeetriliste kanjonite puhul sõltub õhukvaliteet tänavakanjonis lisaks H/W suhtest ka hoonete omavaheliste kõrguste $H1/H2$ suhtest. Uuringutest on selgunud, et tänavakanjonite kavandamisel tuleb väga täpselt hinnata eelmainitud suhete sobivust selleks, et saasteained tänavakanjonis ei akumuleeruks [6].

CFD mudelites modelleeritakse üldjuhul lõpmatult pikki tänavakanjoneid, kuid tegelikkuses on kanjonitel ka otsad ja vahed, kus tekivad lisaks primaarsele kanjoniga risti voolamise tsirkulatsioonile ka hoone mõlema külje ümber pöörised (joonis 1.3). Käesolevas töös modelleeritakse kanjoniit samuti lõpmatult pikana.



Joonis 1.3 Õhu voolamine tänavakanjonis [12].

1.3 Võimalik saaste heitõhus

Saasteained jagatakse kahte kategooriasse – primaarsed ja sekundaarsed. Primaarsed õhu saasteained on need, mis juhitakse atmosfääri otse ning koosnevad peamiselt lämmastikoksiididest (NO_x), lenduvatest orgaanilistest ühenditest (VOC) ja vingugaasist (CO). Sekundaarsed saasteained tekivad primaarsete saasteainete keemiliste reaktsioonide käigus [15].

Olenevalt hoone otstarbest võivad väljavisatavad saasteained olla väga erinevad. Hindamaks võimalikku saastet heitõhus koostas Tauno Meier oma töös EVS ja ASHRAE soovitusel põhineva tabeli (tabel 1.1), heitõhuklasside hindamiseks [16].

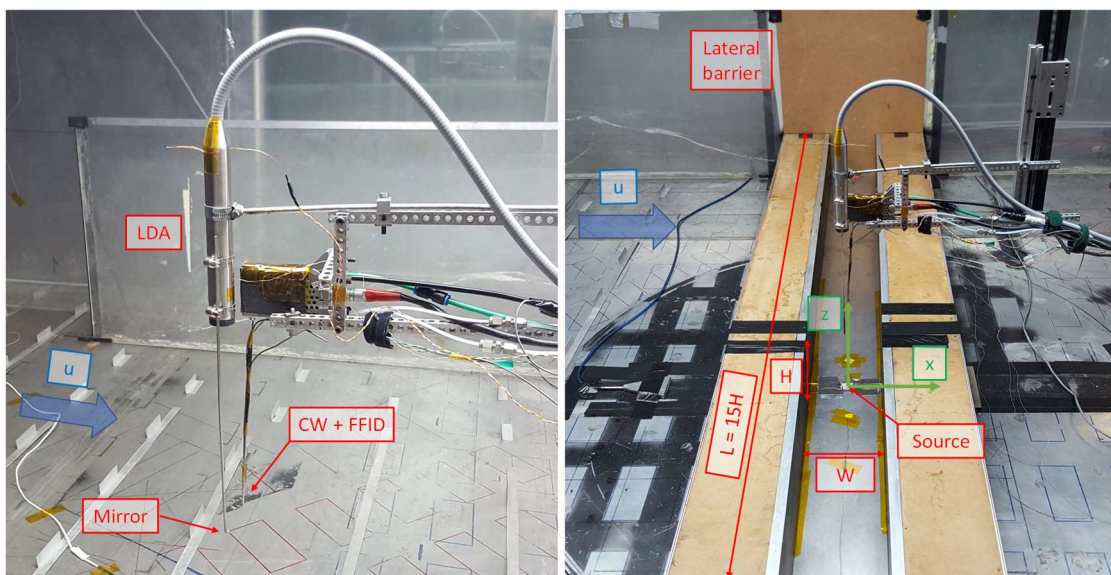
Tabel 1.1 Heitõhuklasside jaotus

Kategooria EVS/ASHRAE	Õhu kirjeldus	Näited ruumitüüpidest
EHA 1/ Class 1	Madal saasteainete kontsentratsioon peamiselt ehitusmaterjalidelt ja inimestelt, mitte ärritav, puudub ebameeldiv lõhn.	Kontor ja sellega ühendatud väikedokumentide ladu, klassiruum, trepikoda, koridorid.
EHA 2/ Class 2	Keskmine saasteainete kontsentratsioon peamiselt ehitusmaterjalidelt ja inimestelt, kergelt ärritav või ebameeldiv lõhn.	Söögituba, köögid kuumade jookide valmistamiseks, hotelli tuba, riietusruum, lifti seadmete ruum.
EHA 3/ Class 3	Märkimisväärne saasteainete kontsentratsioon protsessidest, mis eritavad niiskust või kemikaale (näiteks tubaka suits), märkimisväärselt ärritav või ebameeldiv lõhn.	WC, pesuruum, saun, köögid, printeri ruum, suitsuruum, köögid ilma rasva eralduseta ja elamute köögid.
EHA 4/ Class 4	Suur saasteainete kontsentratsioon. Mürgised ja ohtlikud aurud ja gaasid, ebameeldiv lõhn.	Professionaalsed köögid rasva eraldusega, trükikoda, värvikamber, labori tõmbekapp, garaaž, transpordi tunnelid, mustapesu ruum, prügiruum, suure intensiivsusega suitsuruumid.

2. MEETODID

2.1 Uuringute aluseks oleva füüsilise mudeli kirjeldus

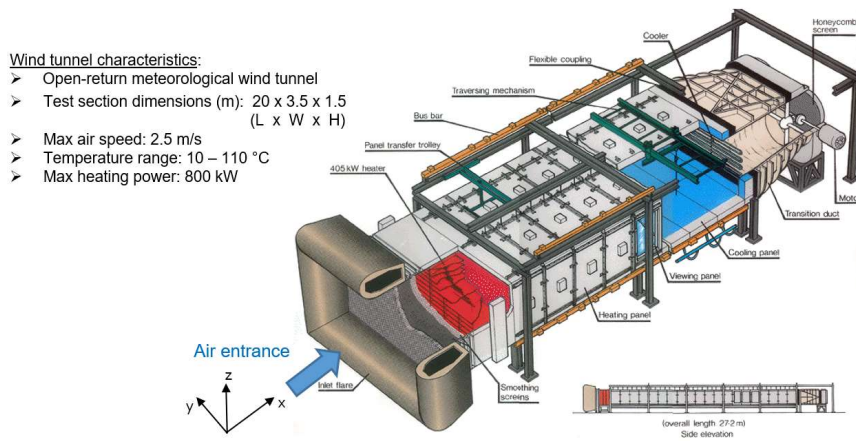
Uuritava tänavakanjoni aluseks võeti aluseks Surrey Ülikoolis asuva EnFlo tuuletunnelis tehtud mudelkatsed. Katsetatud mudel koosnes kahest paralleelselt asetsevast hoonemudelist, mille kõrgus oli 166 mm. Tuulefrondiga risti paikneva hoonekülje pikkus oli $15H$ ehk 2490 mm, tänavakanjoni laius oli 166 mm.



Joonis 2.1 EnFlo tuuletunnel [17].

Saasteaine anti mudelisse mudeli keskosas selleks, et vähendada tuuletunneli seintest tekkiva turbulentsi mõju tulemustele. Laser Doppler anemomeetriga (LDA) mõõdeti erinevates mudeli punktides kolme kiiruse komponenti. Lisaks sellele mõõdeti temperatuuri külmtraat anemomeetriga ja heitaine kontsentratsiooni FFID (*Fast-Response Flame Ionisation Detector*) [18].

Maksimaalne arendatav tuulekiirus tunnelis on 2,5 m/s, temperatuurivahemik 10-110°C ning maksimaalne küttevõimsus 800 kW [18].



Joonis 2.2 EnFlo tuuletunneli skeem [18].

EnFlo tuuletunneli mõõdud:

$$L_{\text{tuuletunnel}} = 20000 \text{ mm};$$

$$W_{\text{tuuletunnel}} = 3500 \text{ mm};$$

$$H_{\text{tuuletunnel}} = 1500 \text{ mm}.$$

Tänavakanjoni moodustavate hoonete mõõdud:

$$H_{\text{hoone}} = 166 \text{ mm};$$

$$L_{\text{hoone}} = 15H = 2490 \text{ mm};$$

$$D = 166 \text{ mm}.$$

Tänavakanjoni laius:

$$W = 166 \text{ mm}.$$

2.2 CFD Mudel

Arvutitehnoloogia areng ja jõudluse täiustamine on muutnud võimalikuks täpsete numbriliste modelleerimismeetodite rakendamise, et uurida dünaamiliste ja keemiliste protsesside seost, mis käsitlevad saasteainete hajumist tänavakanjonites.

Arvutuslik vedeliku dünaamika meetod (*Computational fluid dynamics*) ehk CFD on modelleerimise tehnika, mis annab võimaluse uurida erinevaid eksperimentaalseid voolamise probleeme.

CFD mudeleid jagatakse kaheks suuremaks kategooriaks lähtudes nende turbulentsi modelleerimise printsiibist: RANS ehk *Reynolds-averaged Navier-Stokes* ja LES ehk *Large-Eddy Simulation*.

RANS mudel lahendab turbulentse voolamise kasutades ajas keskendatud Navier-Stokes'i võrrandi väärtuseid. LES mudel lahendab Navier-Stokes'i võrrandeid keskendades neid ajas ja ruumis erinevates skaalades. RANS mudelid on tänu lihtsamale keskendamisele kiired ja töökindlad, LES mudelid nõuavad tänu oma kompleksusele rohkelt arvuti ressursi ja aega. Turbulentset voolamist tänavakanjonis ja selle kohal kirjeldavad erineva skaalaga turbulentsed pöörised [19].

2002. aastal võrdlesid Walton ning Walton ja Cheng LES- ja RANS-mudeleid mõõdistusandmetega ning leidsid, et LES-mudeli tulemused vastasid mõõdistusandmetele paremini. Selle põhjuseks pidasid autorid täpsemini hinnatud turbulentse intensiivsuse väärtuseid [20],[21].

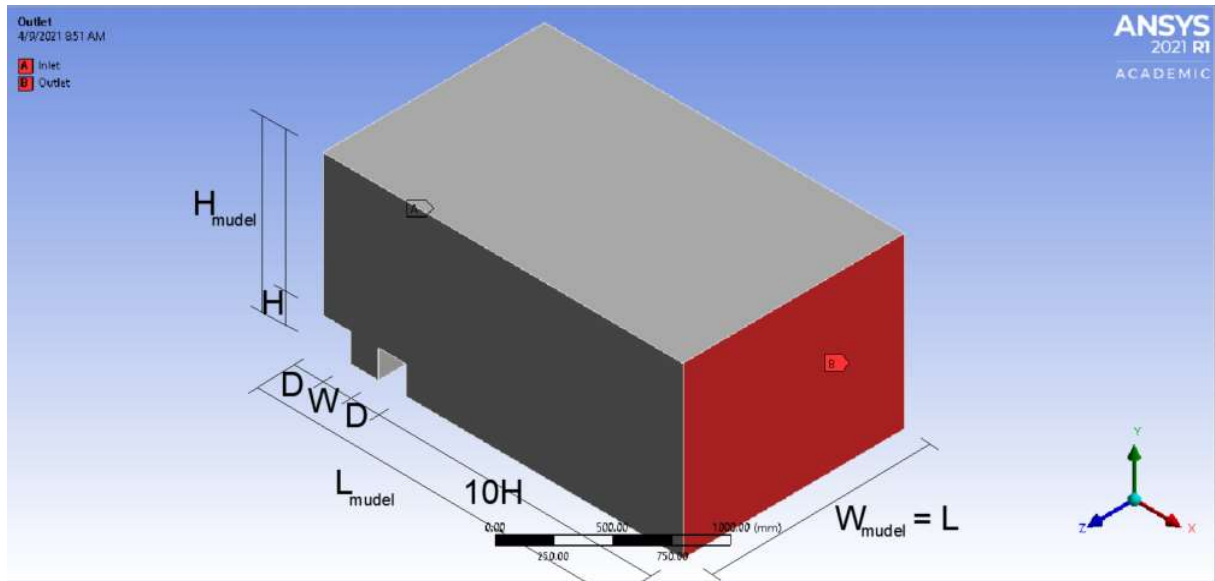
Käesolevas töös kasutati Ansys Fluent programmi, millega modelleeriti tänavakanjonit. Ansys modelleerib turbulentset voolamist laias aja ja mõõdu diapsoonis. Fluent programmis lahendatakse suured pöörised otse, väikesed modelleeritakse. LES-mudel hindab väiksemõõdulisi pööriseid läbi turbulentsi kineetilise energia hajumise. RANS mudeliga suurte pöörise otse lahendamine võimaldab suuremat arvutusvõrgu ja aja sammu, mistõttu hoitakse kokku modelleerimise aega [22].

Lisaks Navier-Stokes'i võrrandile on Fluenti põhivõrrandid massi ja liikumishulga jäävuse võrrandid. Mudel eeldab, et modelleerimismahus asuvatel piiretel ja tahketel objektidel on pinnapealne õhu voolamise kiirus võrdne nulliga. Mudel jagab modelleerimismahu elementaarmahtudeks ja arvutab voolamise väärtused elementaarmahtude keskel ja interpoleerib väärtused võrgupunktides [22].

2.3 Arvutusmudeli seadistus

Punktis 2.1 kirjeldatud tänavakanjoni modelleerimiseks Ansys Fluent programmis, sisestati esmalt programmi mudeli geomeetria. Seejärel genereeriti geomeetria

arvutusvõrk, mille punktides programm tulemusi hindas. Mudelis defineeriti pinnad vastavalt nende otstarvetele ning sisestati pindadele sobivad piiritingimused.



Joonis 2.3 Mudeli geomeetria

Geomeetria

Arvutusmudeli mõõdud:

$$L_{\text{mudel}} = 13H = 2158 \text{ mm};$$

$$W_{\text{mudel}} = 8H = 1328 \text{ mm};$$

$$H_{\text{mudel}} = 1000 \text{ mm}.$$

Tänavakanjoni moodustavate hoonete mõõdud:

$$H = 166 \text{ mm};$$

$$L = 8H = 1328 \text{ mm};$$

$$D = 166 \text{ mm}.$$

Tänavakanjoni laius:

$$W = 166 \text{ mm}.$$

Heitõhu väljaviske asukohad

Käesolevas töös kasutati uurimiseks kuut erinevat väljaviske asukohta tänavakanjoni fassaadidel. Väljaviske avad paiknevad tänavakanjoni mõlemal küljel – nii allatuult, kui ka pealetuult fassaadidel. Kõrgused valiti nii, et väljavisked jääksid fassaadi esimesele, teisele ja kolmandale kolmandikule. Kõiki väljaviskeid modelleeriti kahe nurgaga õhuvoolu suuna puhul – õhk voolab fassaadi pinnaga risti, õhk voolab 45° alla poole.

Arvutusvõrk

Käesolevas töös kasutatud võrgustik on mudeli piires muutuv. Arvutusvõrk koosneb elementidest külje pikkusega 30 mm. Võrgu esimesed kaheksa kihti on mudeli maapinna ning tänavakanjoni välispiirete läheduses ülejäänud võrgustikust erinevad. Arvutusvõrgu suurenemine (*Growth Rate*) on 1,2 kordne.

Võrgu esimese kihi paksus on saadud järgmiselt:

Voolamise Reynoldsi arv:

$$Re = \frac{\rho U_{ref} L_{voolamine}}{\mu} = \frac{1,226 * 0,65 * 0,498}{1,81 * 10^{-5}} = 21926 \quad (2. 1)$$

Kus ρ – õhutihedus (kg/m³),

U_{ref} – õhu voolamise kiirus mudeli sisendil (m/s),

$L_{voolamine}$ – mudeli voolamisesuunaline pikkus $2D+W$ (m),

μ – õhu dünaamiline viskoossustegur ($1,81 * 10^{-5}$ Pa·s) [23].

Hõõrdekoefitsent (*Skin Friction Coefficient*):

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 6,5]^{-2,3} = [2 \log_{10}(21926) - 6,5]^{-2,3} = 0,1662 \quad (2. 2)$$

Kus Re – Reynoldsi arv [23].

Seina nihkepinge (*Wall Shear Stress*):

$$\tau_w = \left(\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2\right) C_f = \left(\frac{1}{2} * 1,226 * 0,65^2\right) * 0,1662 = 0,043 \text{ Pa} \quad (2. 3)$$

Kus ρ - õhutihedus (kg/m³),

U_{ref} - õhu voolamise kiirus mudeli sisendil (m/s),

C_f - hõõrdekoefitsient [23].

Hõõrdekiirus (*Friction Velocity*):

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,043}{1,226}} = 0,1874 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

Kus ρ - õhutihedus (kg/m³),

τ_w - nihkepinge (Pa) [23].

Käesolevas töös eeldati, et dimensioonitu kaugus seinast $5 < y^+ < 30$ [24].

$$y^+ = \frac{\rho y_p u_\tau}{\mu} \quad (2.5)$$

y^+ valemist saab tuletada y_p :

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho u_\tau} = \frac{5 \cdot 1,81 \cdot 10^{-5}}{1,226 \cdot 0,1873} = 0,0006 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Seega esimese elemendi kõrgus on $2 \cdot y_p = 2 \cdot 0,0006 = 0,0011 \text{ m} = 1,1 \text{ mm}$.

Tuulekiirused

Käesolevas töös teostati kontsentratsioonide modelleerimised kahe erineva kiiruse juures:

- 0,65 m/s
- 1,5 m/s

Töö tulemuste hindamisel on kõik õhu voolamiskiirused muudetud dimensioonituks jagades kiirused läbi referentskiirusega. Referentskiiruseks on valitud modelleeritud kiirustest madalam õhu voolamise kiirus 0,65m/s tänavakanjoni kohal.

Tabel 2.1 Dimensioonitud kiirused

U_{2H} [m/s]	U_{2H}/U_{ref} [-]
0,65	1
1,5	2,3

Heitõhu väljaviske kiirus

Käesolevas töös on hoonest heidetava õhu voolamise kiirus 0,5 m/s ($U/U_{ref}=0,77$).

Tihedused

Käesolevas töös on mudeli valideerimisel kasutatud järgmisi tihedusi:

- $\rho_{\text{õhk}}=1,226 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{heitõhk}}=1,226 \text{ kg/m}^3$

Piiritingimused

Ansys Fluent programmis on mudelile ette antud järgmised parameetrid:

- Kõikidele tänavakanjoni pindadele anti ette *no-slip condition*, mis tähendab pinna omadust, mille puhul tahke piiriga vahetult kokkupuutuva kihi voolamise kiirus on võrdne nulliga.
- Sissevoolamisel: õhuvoolamise kiirus, rõhk piiril - atmosfäärne. Selleks, et tagada sissevoolamise piiril ühtlane voolamine, anti ette madal turbulentsi intensiivsus 5% ja turbulentsete pöörise maksimaalne suurus 0,01 m.
- Väljavoolu piiril anti ette, et mudelist väljumise piiril on rõhk atmosfäärne.

Modelleerimine teostati standardse $k-\varepsilon$ mudeliga, mis on praktilise iseloomuga probleemide lahendamisel tihedmini kasutatav turbulentsi arvutamise mudel.

2.4 Töö lahenduse ülekandmise võimalused reaalsusesse

Käesolev töö on teoreetiline ja selle eesmärk on anda lahendusi, mis on võrreldavad ja kasutatavad Marucci ja Carpentieri katsete skaalal. Ansys Fluent Student versioon seab ette arvutusmahu piirangud, mistõttu ei ole võimalik modelleerida reaalselt olukorda (nt 15 meetri kõrgust hoonet).

Selleks, et mudel oleks reaalsusega võrreldav, peaks Reynoldsi mudeli seadusest tulenevalt voolamise kiirus olema 1300 m/s, mis on ebareaalne. Teine variant oleks muuta õhu tihedust ja dünaamilise viskoossust. Näiteks säilitades õhu dünaamilist viskoossust reaalsena, peaks õhu tihedus olema 930 kg/m³. Või säilitades õhu tihedust, peaks õhu dünaamiline viskoossus olema $2,03 \cdot 10^{-8}$ Pa·s.

Mõlemal juhul oleks tegemist ainega, millel ei ole midagi pistmist gaasiga, mistõttu on sellisest lähenemisest loobutud. Kuna Ansys Fluent täisversiooniga on võimalik modelleerida suuri hooned ja dimensioonide ümber kandmine reaalolukorda läheks magistritöö mahust välja, siis ei ole antud töös välja toodud dimensioonide ülekandmist reaalelus vastavatesse suurustesse.

Käesolevas töös on kasutatud voolamise kiiruseid, mis on omavahel proportsioonis. Kui soovitatav heitõhu väljaviske kiirus hoonest on 5 m/s, siis mudeli heitõhu voolamise kiiruse 0,5 m/s korral on kanjoni kohal olevad voolamiskiirused proportsionaalselt 6,5 ja 15 m/s.

2.5 Mudeli valideerimine

Kõikide matemaatiliste mudelite tulemused sõltuvad ennekõike mudeli piiridel ette antud suurustest. Selleks, et mudeli tulemused vastaksid reaalsusele on vajalik matemaatilise mudeli valideerimine. Lihtsaim ja kindlaim meetod selleks on võrrelda mudeli tulemusi füüsilisel mudelil mõõdetud tulemustega.

Eestis puudub võimalus arhitektuurses tuuletunnelis tänavakanjoni mõõtmisi teostada. Käesolevas töös on võrreldud mudeli tulemusi Surrey Ülikoolis asuva EnFlo tuuletunnelis Marucci ja Carpentieri teostatud tänavakanjoni katse tulemustega.

Tulenevalt sellest, et töös on kasutatud *Ansys Fluent Student* versiooni, oli mudeli võrgupunktide arv piiratud ja töös on tehtud järgmised lihtsustused. EnFlo füüsilisel mudelil paigaldati pöörise vältimiseks kanjoni otstesse plaadid [12]. Erinevalt Surrey Ülikoolis tehtud katsest võeti käesolevas töös tuuletunneli laiuseks modelleeritud kanjoni pikkus, et vältida kanjoni otste ümber tekkivaid pööriseid ja vähendada mudeli elementide arvu.

Ansys Fluent Student versioonis oli elementide piirangu tõttu võimalik terve EnFlo tuuletunneli modelleerimine juhul, kui arvutusvõrgu samm oli 60 mm. Tänavakanjoni moodustavate hoonete kõrgus mudelis oli 166 mm, mis tähendab, et sellisel juhul jääb hoone fassaadile vaid kaks tervet elementi. See ei ole piisav võrgu tihedus, sest käesoleva töö eesmärk oli uurida heitõhu väljaviset fassaadil kolmel erineval kõrgusel.

60 mm arvutusvõrgu sammuga tehtud mudeli esmasel valideerimisel ilmnas, et hoonest tekkiva kareduse mõju kaob $6H$ kaugusel tänavakanjoni allatuule poolsest servast. Sellest tulenevalt vähendati arvutusmahu pikkust $2H$ võrra. Samuti oli hoonete mõju õhuvoolamise kiirusele piki vertikaali maksimaalselt $2H$ üle tänavakanjoni ülemise serva, mistõttu vähendati arvutusmahu kõrgust 500 mm. Lisaks tõdes autor, et hooned on piisavalt pikad, et vähendades hoonete pikkust ja arvutusmahu laiust $2H$ võrra, ei ulatu külgliseinte piirikihi mõju arvutusmahu keskteljeni.

Tänu vähenenud mõõtudele oli võimalik arvutusvõrgu sammu vähendada 30 mm.

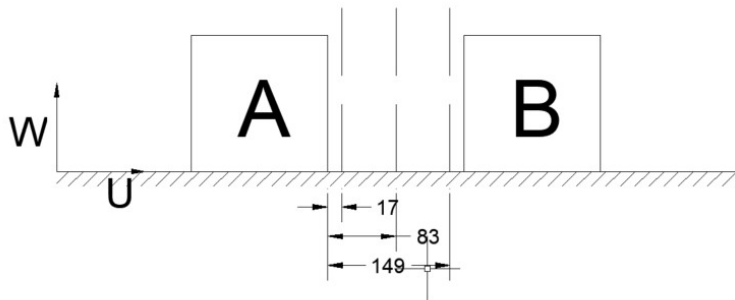
EnFlo tuuletunneli mõõtmiste tulemuste alusel on avaldatud mitmeid artikleid [17],[4]. Töodes uuriti tuuletunneli põhja ja seinte temperatuuri ja tuulekiiruse mõju saasteaine hajumisele kahedimensioonaaalsel tänavakanjoni mudelil. Füüsilise mudeli autorid valisid tänavakanjoni halvima variandi, kui $H/W=1$. Katse käigus hoiti õhu voolamist risti tänavakanjoniga ja saasteaine emissioon oli pidev.

Füüsilise katse puhul teostati mõõtmised kolme erineva õhu voolamise kiiruse puhul: 0,65, 1,0 ja 1,25 m/s. Heitõhku anti ette kanjoni põhja läbi 22 mm toru, mis asetses tänavakanjoni keskteljel, mudeli tänava tasapinnas [18].

Kasutades eelmainitud lihtsustusi valmistati käesoleva töö käigus EnFlo tuuletunneli virtuaalne koopia, millesse paigutati Marucci ja Carpentieri poolt modelleeritud tänavakanjon. Seejärel teostati arvutus samadel piirtingimustel kui füüsilisel mudelil.

Saadud andmeid võrreldi Marucci ja Carpentieri poolt avaldatud andmepakettidega [25].

Tulemusi võrreldi kolmel tänavakanjoni profiilil – tänavakanjoni keskel ja hoonete vahetus läheduses.

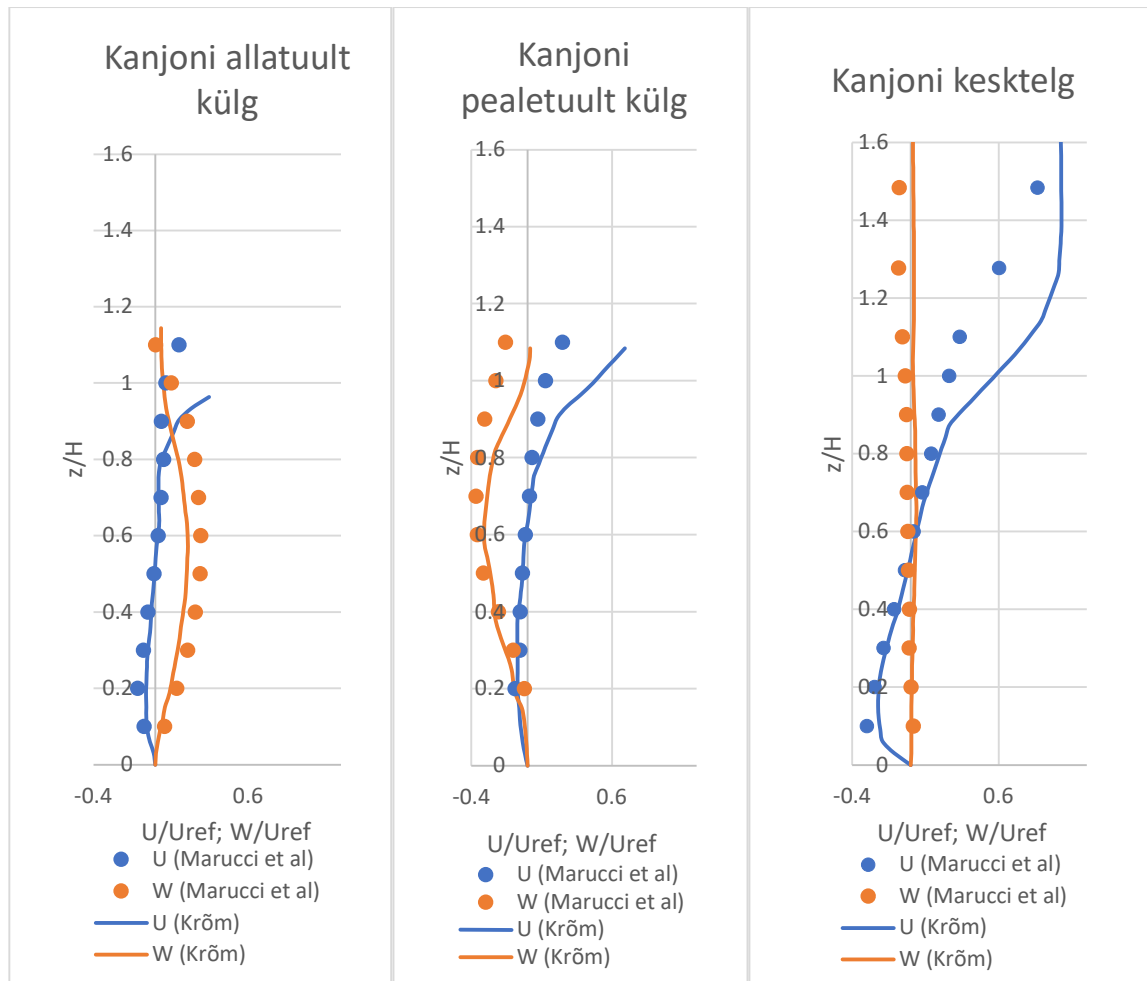


Joonis 2.4 Valideerimisel kasutatud mõõteprofiilide asukohad.

Kiirusprofiilide kvalitatiivne valideerimine

Joonisel 2.4 on toodud kiiruse muutumine joonisel 2.3 näidatud profiilides kanjoni allatuult, pealetuult ja kanjoni keskteljel. Kõikidel graafikutel on esitatud vertikaalsete ja horisontaalsete kiiruskomponentide väärtused. Pideva joonega märgitud tulemused on käesoleva magistritöö mudeli valideerimise tulemused. Punktidega on esitatud Marucci ja Carpentieri töö vastavad väärtused. Sinisega on tähistatud horisontaalsete kiiruskomponentide muutumine nii füüsilisel kui ka matemaatilisel mudelil. Oranžiga on tähistatud vastavad vertikaalsed kiirusekomponendid.

Mudelist saadud väärtused jälgivad katse tulemuste väärtuseid, mistõttu võib tõdeda, et on saavutatud magistritöö teostamiseks piisav arvutustäpsus.



Graafik 2.1 Kvalitatiivse valideerimise tulemused. Dimensioonitud horisontaalsed ja vertikaalsed kiirused valideerimisprofiilidel.

Kiirusprofiilide kvantitatiivne valideerimine

Järgnevalt teostati kiirusprofiilide kvantitatiivne valideerimine. Selleks kasutati NMSE (*Normalized mean-square error*) meetodit, mis näitab mil määral sarnaneb modelleeritud tulemus mõõdetud tulemustega:

$$NMSE = (C_o - C_p^2) / (C_o \cdot C_p) \tag{2.7}$$

Kus C_o - iseloomulik suurus mõõdetuna füüsilisel katsel,

C_p - iseloomulik suurus mõõdetuna modelleerimistulemustest [26].

Tabel 2.2 Kiiruste kvantitatiivse valideerimise tulemused

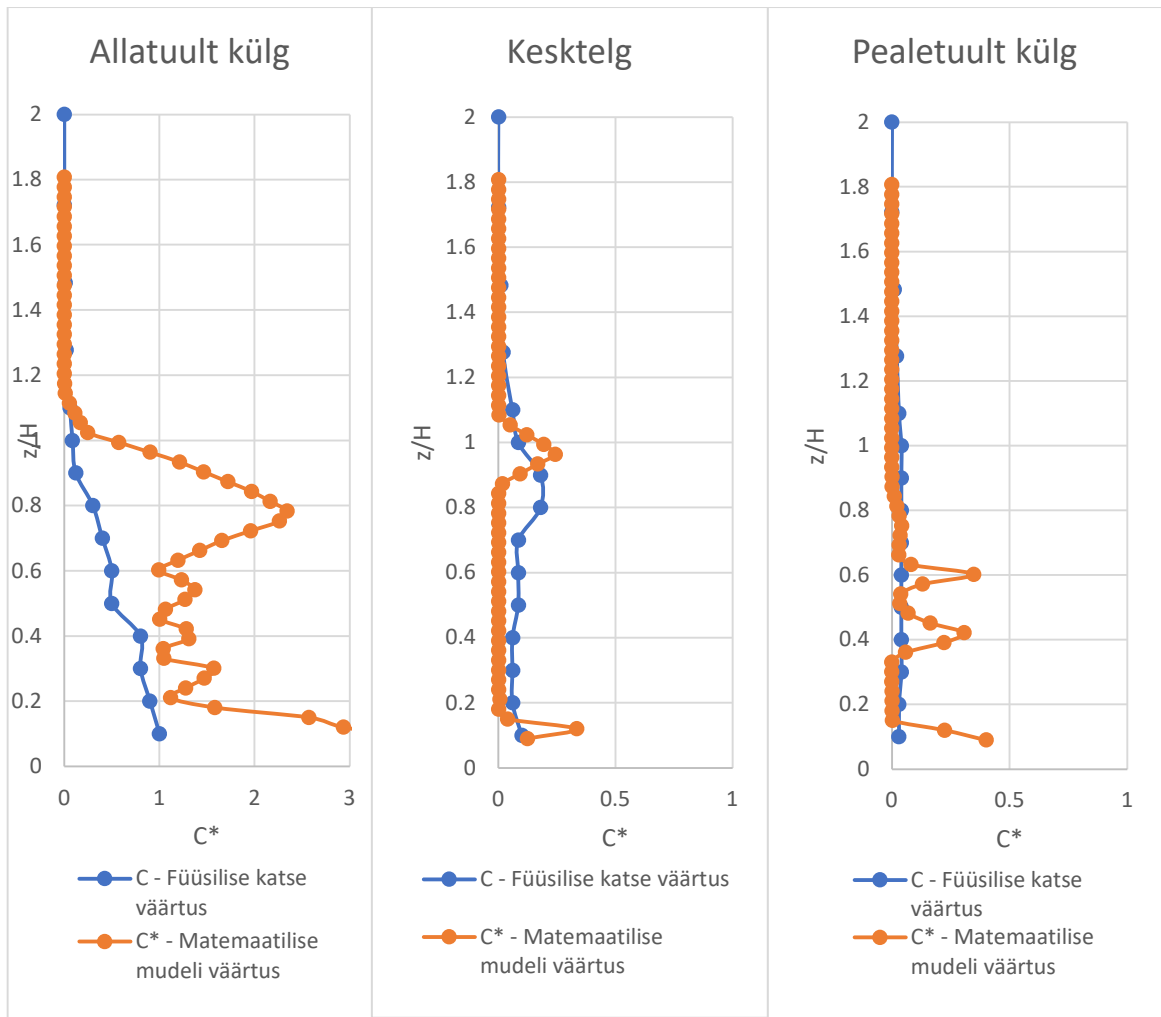
Kaugus kanjoni allatuult hoone servast	Voolamise komponent	Kõrgus tänavakanjoni põhjast (mm)	C ₀ (Marucci) – kiiruse komponent	C _p (Krõm) – kiiruse komponent	NMSE
17	U	50	-0.0505	-0.0308	0.25
17	U	100	0.0116	0.0111	0.00
17	U	150	0.0251	0.0996	2.22
17	W	50	0.1347	0.0935	0.13
17	W	100	0.1898	0.1355	0.11
17	W	150	0.1340	0.0558	0.82
83	U	50	-0.1603	-0.1082	0.16
83	U	100	0.0121	0.0269	0.67
83	U	150	0.1240	0.2150	0.31
83	W	50	-0.0072	0.0078	-4.01
83	W	100	-0.0129	0.0222	-4.31
83	W	150	-0.0182	0.0152	-4.03
149	U	50	-0.0367	-0.0466	0.06
149	U	100	-0.0163	-0.0094	0.32
149	U	150	0.0464	0.1376	1.30
149	W	50	-0.0680	-0.1036	0.18
149	W	100	-0.2334	-0.2012	0.02
149	W	150	-0.1996	-0.0793	0.91

Selleks, et tulemus oleks piisav, peab NMSE absoluutväärtus olema väiksem kui 6 [26]. Kiiruse kvantitatiivse valideerimise tulemusel selgus, et matemaatiline mudel kirjeldab füüsilist katset piisava täpsusega.

Kontsentratsiooniprofiilide valideerimine

Valideerimisprotsessi teises etapis modelleeriti heitainete kontsentratsiooni levikut samadel piirtingimusel kui füüsilisel mudelil.

Joonisel 2.5 on toodud kontsentratsiooni muutumine kanjoni allatuult, pealetuult ja kesktelje profiilidel. Kõikidel graafikutel on esitatud füüsilise ja matemaatilise mudeli kontsentratsioonid. Oranži joonega märgitud tulemused on käesoleva magistritöö mudeli valideerimise tulemused. Sinise joonega on esitatud Marucci ja Carpentieri töö [17] vastavad väärtused. Mudelist saadud väärtused jälgivad suurtes piirdes katse tulemusi. RANS mudeliga tehtavate lihtsustavate eelduste tõttu põhjustatud ebatäpsustest tulenevalt hindab mudel kohati kontsentratsiooni väärtusi üle.



Graafik 2.2 Kontsentratsioonide valideerimise tulemused.

Tabel 2.3 Kontsentratsioonide kvantitatiivse valideerimise tulemused

Kaugus esimese honest	Kõrgus (mm)	C0 (Marucci)	Cp(Krõm)	NMSE
17	50	0.8000	1.2820	0.23
17	100	0.5000	0.8104	0.24
17	150	0.1200	0.0749	0.23
83	50	0.0600	0.0000	*
83	100	0.0850	0.0000	*
83	150	0.1800	0.0749	0.82
149	50	0.0400	0.0000	*
149	100	0.5000	0.2833	0.33
149	150	0.1200	0.0000	*

*Matemaatiliselt mittelahenduv suurus

Sarnaselt kiiruse valideerimisega, peab NMSE absoluutväärtus olema väiksem kui 6 m, et tulemus oleks piisav [26]. Kontsentratsioonide kvantitatiivse valideerimise tulemusel selgus, et matemaatiline mudel kirjeldab füüsilist katset piisava täpsusega.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

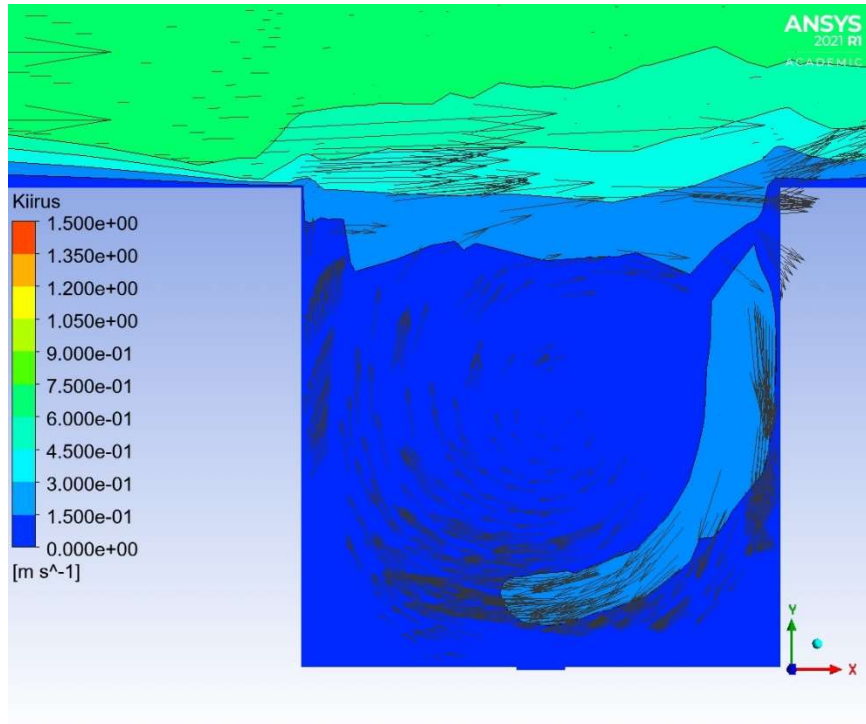
3.1 Kiiruse modelleerimine

Joonisel 3.1 on kujutatud õhu voolamist tänavakanjonis olukorras, kus õhu liikumise kiirus on 0,65 m/s. Joonisel 3.2 on kujutatud õhu voolamist tänavakanjonis olukorras, kus õhu liikumise kiirus on 1.5 m/s. Jooniste 3.1 ja 3.2 skaalad on võrdsed eesmärgiga, et need oleksid omavahelt visuaalselt võrreldavad.

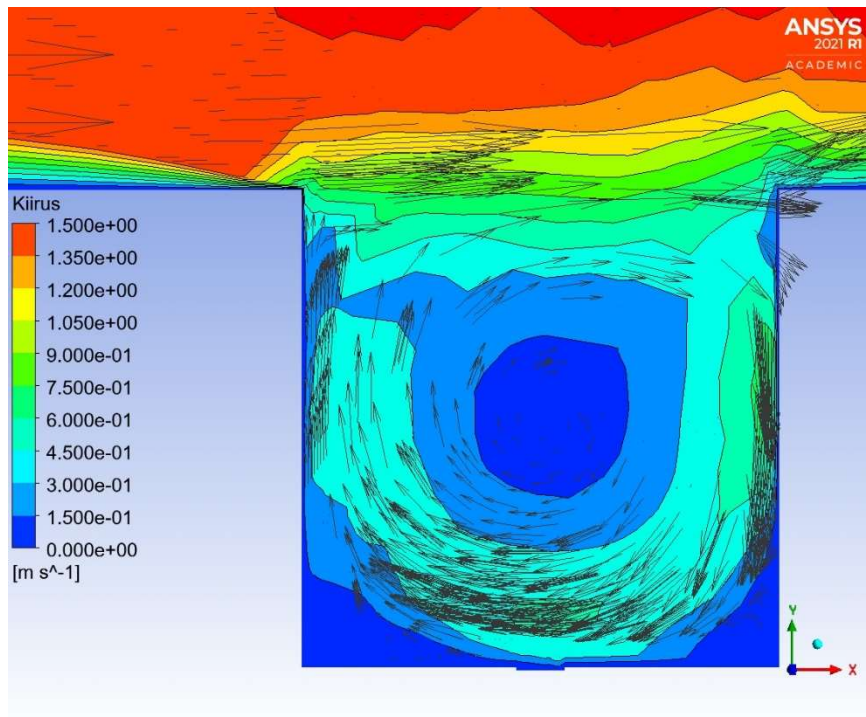
Jooniselt 3.1 on näha, et vasakult paremale puhuv tuul siseneb vähesel määral tänavakanjonisse, tekitades seal madala kiirusega pöörise (kuni 0,3 m/s). Joonisel 3.2 on näha, et tänavakanjoni kohal maksimaalne tuulekiirus on suurem ja selle mõju kanjonis toimuvale voolamisele rohkem märgata. Õhu voolamiskiirused kanjonis ulatavad 0,6...0,7 m/s.

Pöörise tulemusel tekivad tänavakanjoni alumistesse nurkadesse „surnud tsoonid“, kus voolamise kiirus on praktiliselt 0 m/s. Joonistelt on võimalik märgata, et pöörise tsentrisse tekib madala õhuvoolamise kiirusega ala, kus õhu liikumise kiirus jääb alla 0,1 m/s. Nendesse tsoonidesse võib hakata tekkima saasteaine kontsentratsiooni kasv, sest õhuvahetus seal on vähene.

Pealetuult asuva hoone ülemisel nurgal tekib tsoon, kus voolamine lahkneb. Osa õhu massist liigub tänavakanjonis olevasse pöörisesse ning teine osa liigub üle katuse serva edasi. Voolu lahknemiskohas tekib lokaalne madala kiirusega ala.



Joonis 3.1. Õhu voolamine 0,65 m/s tuule korral.



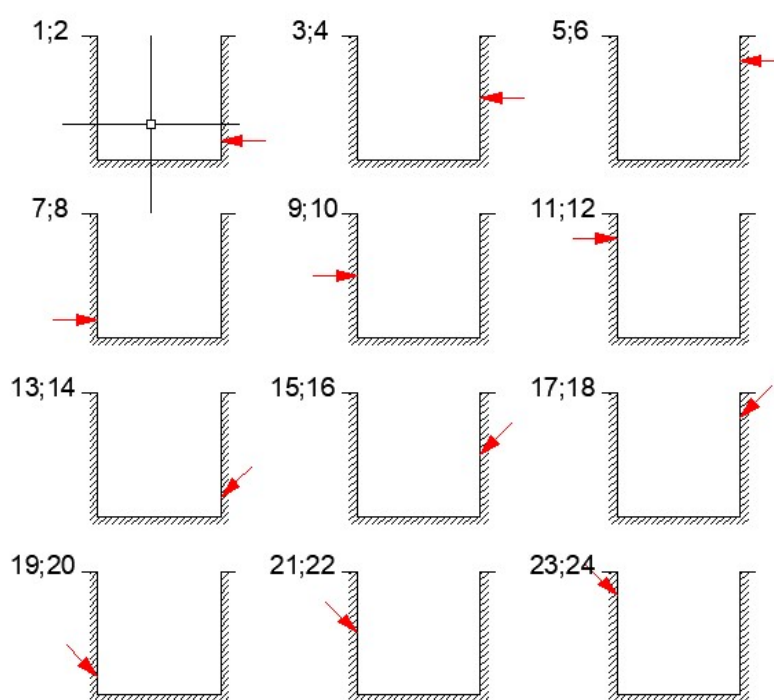
Joonis 3.2 Õhu voolamine 1,5 m/s tuule korral.

3.2 Saasteaine kontsentratsioonide modelleerimine

Järgnevas arutelus on mudelist saadud väärtused muudetud dimensioonituks kasutades järgnevaid suurusid:

- Pikkusmõõtude normaliseerimiseks kasutatakse kanjoni kõrgust $H=0,166$ m;
- Kiiruste normaliseerimiseks kasutatakse referentskiirust $U_{ref}=0,65$ m/s;

Võrdluse huvides kasutatakse samu väärtuseid, mida on kasutanud Marucci ja Carpentieri oma töös, mille järgi käesolev töö on valideeritud [17].



Joonis 3.3 Väljaviske olukordade koondtabel.

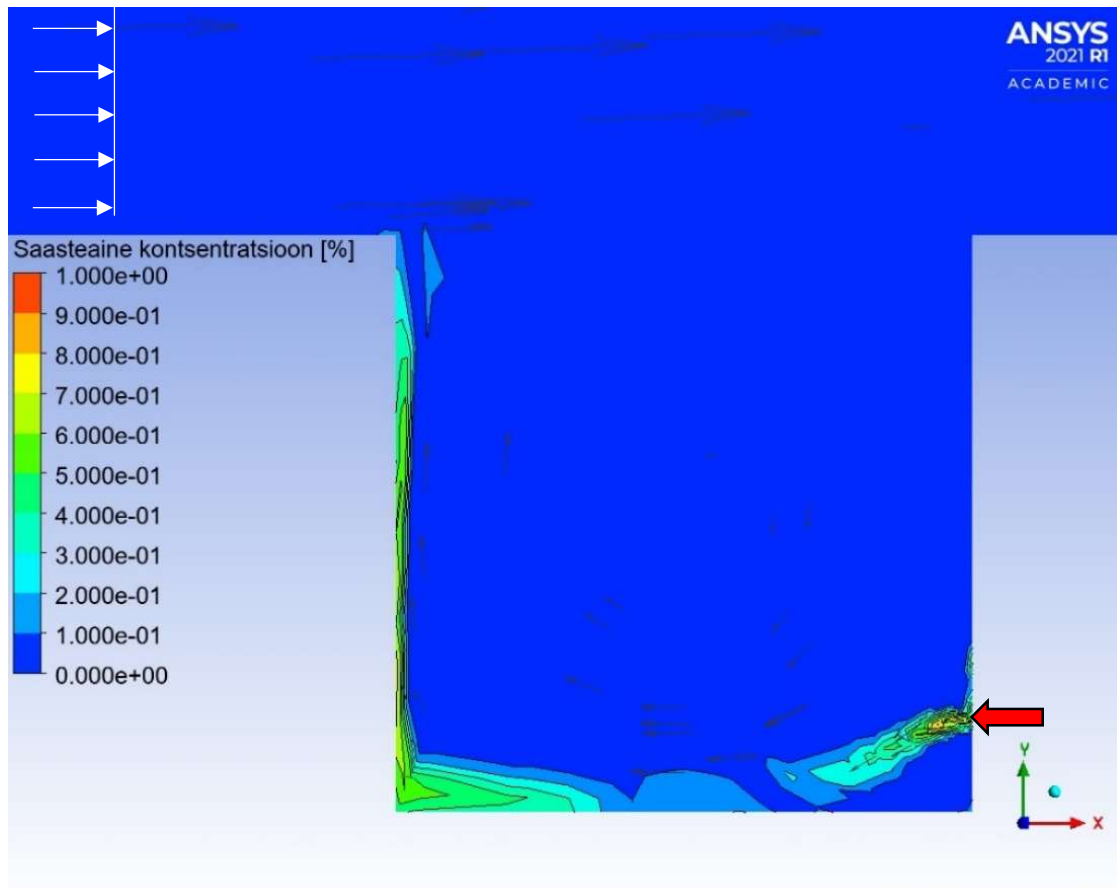
Joonisel 3.3 kujutatud 12 erinevat väljaviske asukohta ja joa suunda on modelleeritud kahe erineva tuulekiiruse korral. Skeemide kõrval asuvad numbrid vastavad joonistel 3.4-3.27 välja toodud väljaviske olukordadele.

Väljaviske olukord nr 1

Joonisel 3.3 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk piki kanjoni põhja, vastas asuva hooneni. Suuremad heitõhu kontsentratsioonid tekivad joonisel 3.2 kujutatud madala õhuvoolamise kiirusega tsoonis, vastas hoone ja kanjoni põhja liitumispunktis, kus heitõhu kontsentratsioon on kuni 70%. Edasi liigub heitõhk piki vastas asetseva hoone fassaadi üles ning seejärel hajub kanjonist väljudes ümbritsevasse õhuvoolu.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80%) asub vastas hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel vahemikus $y/H=0,2...0,3$.

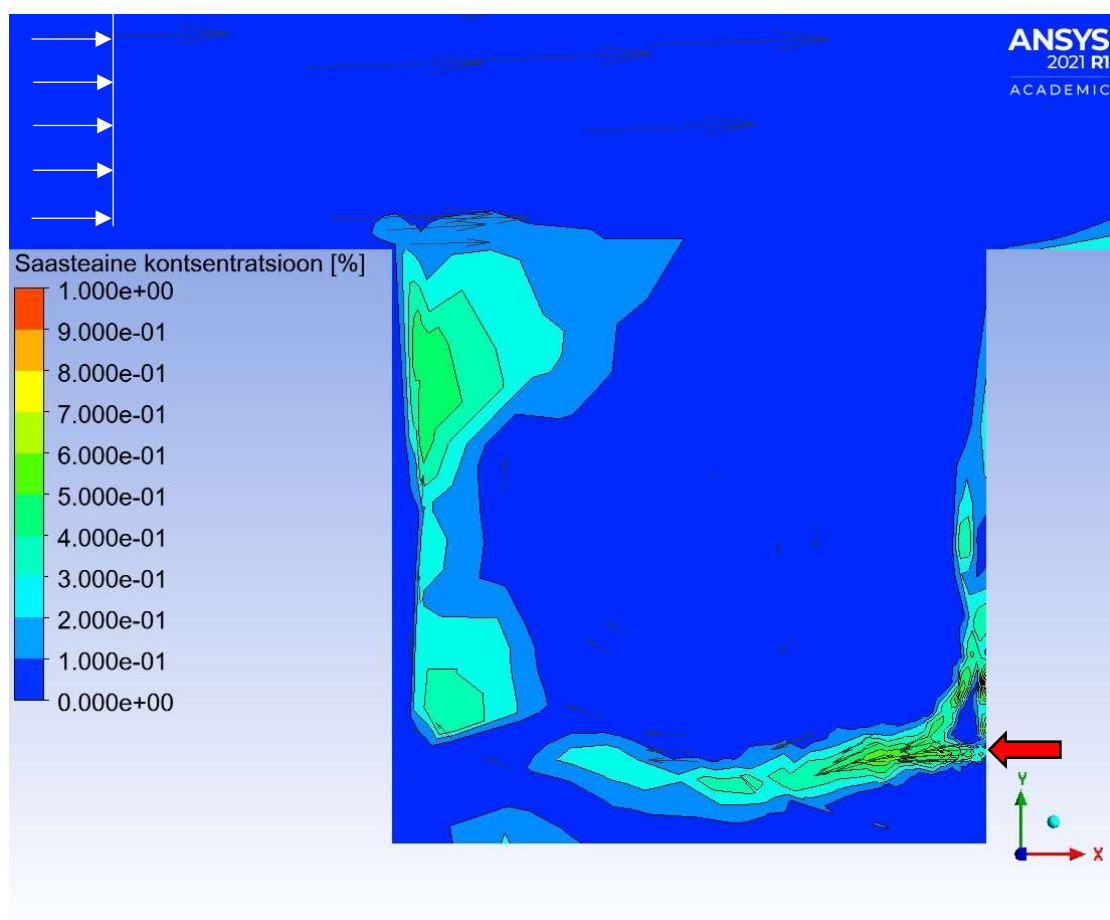


Joonis 3.4 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 2

Joonisel 3.4 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk piki kanjoni põhja vastas asuva hooneni ja mööda fassaadi üles. Võrreldes olukorraga, kus kanjoni kohal õhu voolamiskiirus on $U_{2H}/U_{ref}=2,3$, on pööris väiksema intensiivsusega ning heitõhku ei suruta vastu vastas oleva hoone fassaadi. Seetõttu pääseb osa heitõhust pöörise sisemistesse kihtidesse ning kantakse edasi vastu allatuult hoone fassaadi.



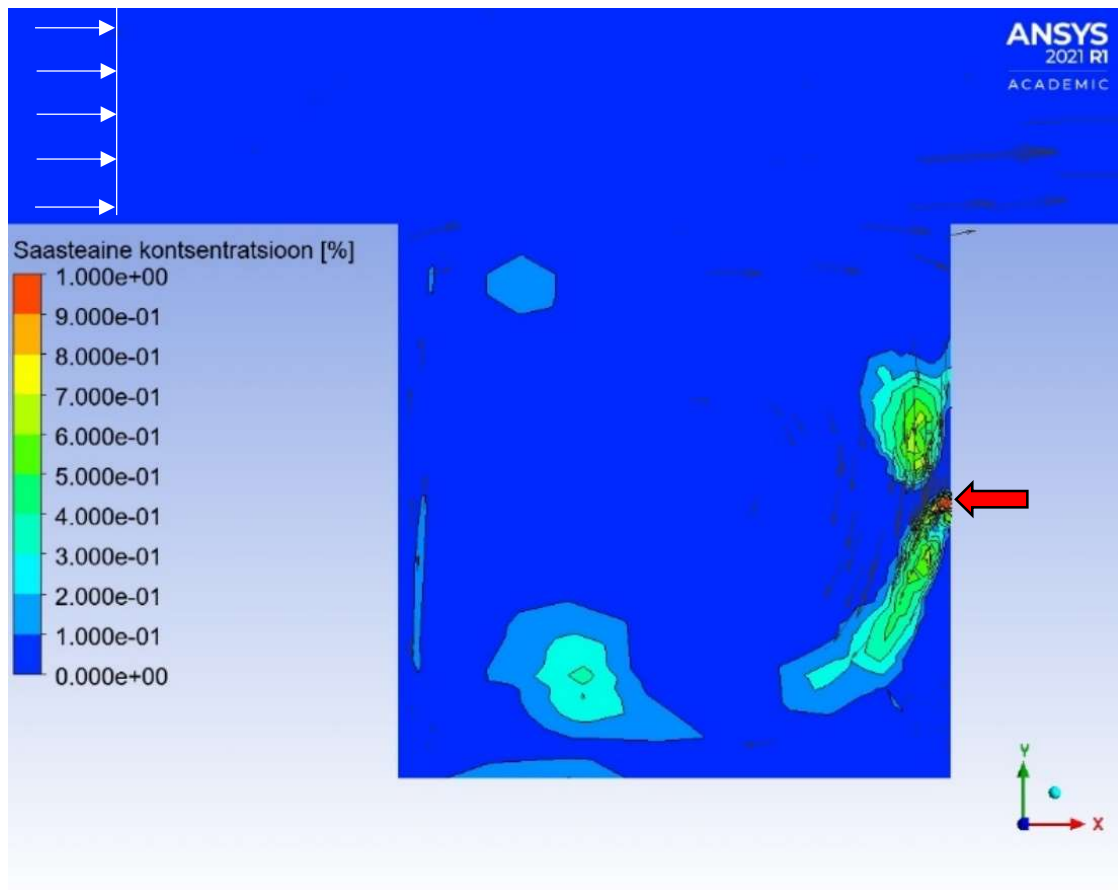
Joonis 3.5 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 3

Joonisel 3.5 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk hoonest välja, kuid suuremad kontsentratsioonid ei jõua tänavakanjoni põhja, vaid haaratakse pöörise sisemisse ossa ja kantakse osaliselt tagasi pealetuult paikevale fassaadile.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80%) asub hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel vahemikus $y/H=0,55...0,8$, kuhu tekib pikkamööda heitõhu tasku.



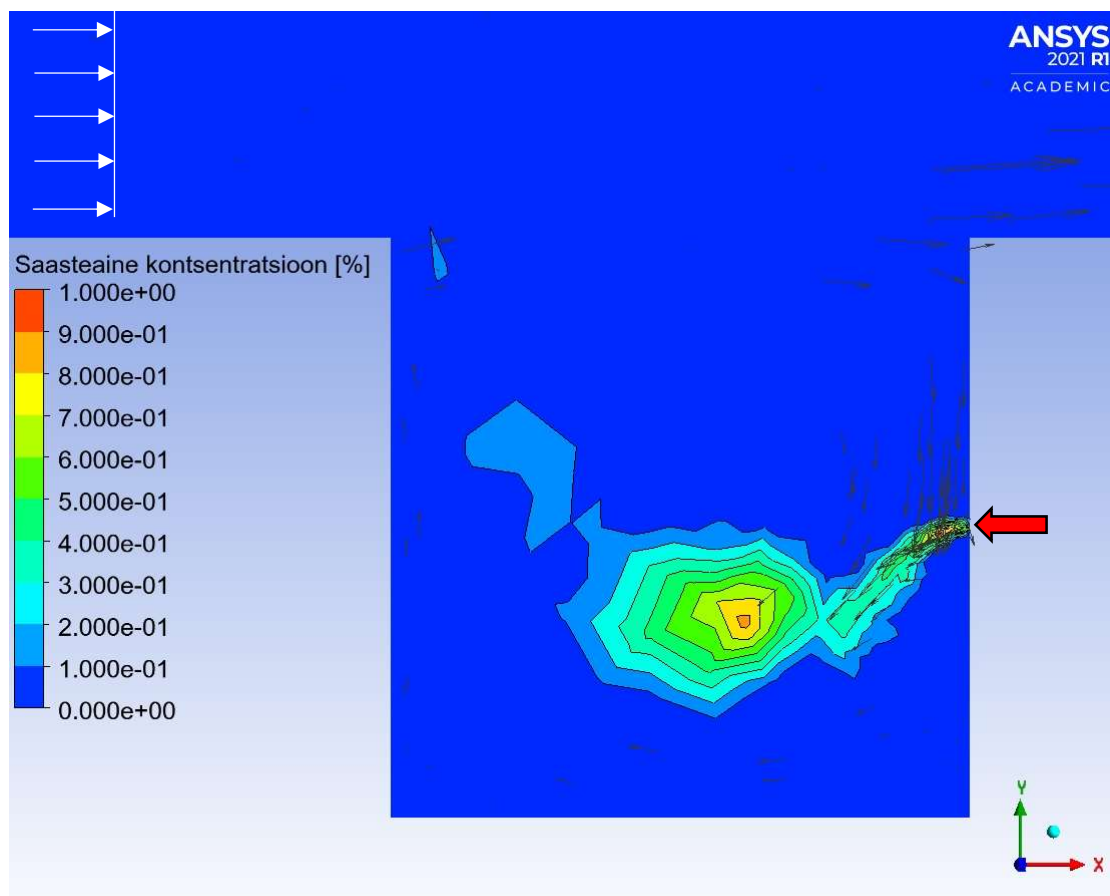
Joonis 3.6 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 4

Joonisel 3.6 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Jooniselt on näha, et kuna pöörise kiirus võrreldes heitõhu väljaviske voolamiskiirusega on väike, siis heitõhk paisatakse pöörise keskosasse. Kiiruse jooniselt 3.1 on näha, et sellel alal on voolamise kiirus praktiliselt 0 m/s, mistõttu hakkavad sellel alal heitõhu kontsentratsioonid kasvama. Kui heitõhu „pilve“ mõõtmed muutuvad nii suureks, et täidavad kogu pöörise keskosa, siis hakatakse heitõhku piki „pilve“ välisperimeetrit tänavakanjonist välja kandma.

Kontsentratsioon pöörise keskel on kuni 90%.



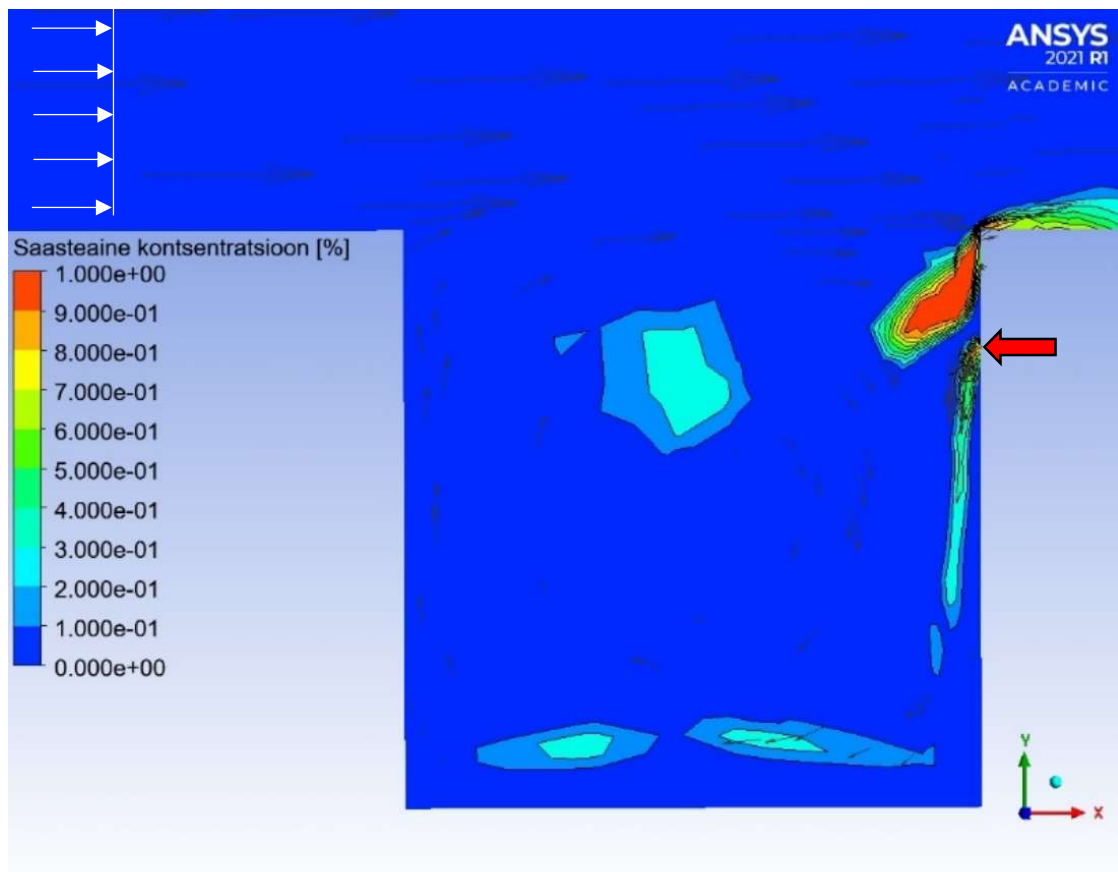
Joonis 3.7 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 5

Joonisel 3.7 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk hoonest välja, kuid suuremad kontsentratsioonid ei kogune tänavakanjoni põhja, vaid haaratakse pöörise sisemisse ossa ja kantakse osaliselt tagasi pealetuult paikevale fassaadile ja katusele.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel vahemikus $y/H=0,85...1$, kuhu tekib pikkamööda heitõhu tasku. Tasku kasvades hakkab heitõhk voolama üle hoone katuse.



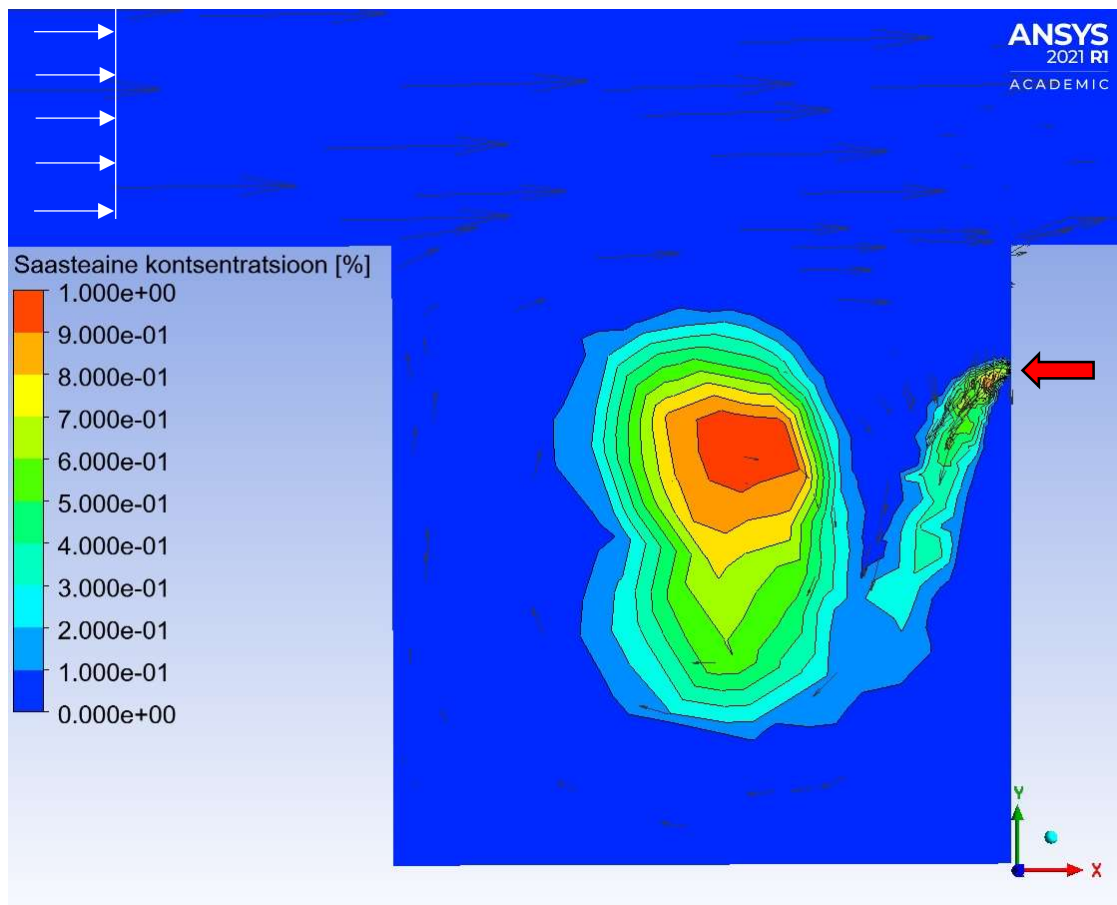
Joonis 3.8 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, esimesel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 6

Joonisel 3.8 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Sarnaselt olukorrale, kus samade tingimuste puhul oli väljaviske asukoht hoone keskel, on pöörise kiirus võrreldes heitõhu väljaviske voolamiskiirusega väike. Heitõhk paisatakse pöörise keskosasse, kus heitõhu kontsentratsioonid kasvama hakkavad. Kui heitõhu „pilve“ mõõtmed muutuvad nii suureks, et täidavad kogu pöörise keskosasa, siis hakatakse heitõhku piki „pilve“ välisperimeetrit tänavakanjonist välja kandma.

Kontsentratsioon pöörise keskel on kuni 100%.



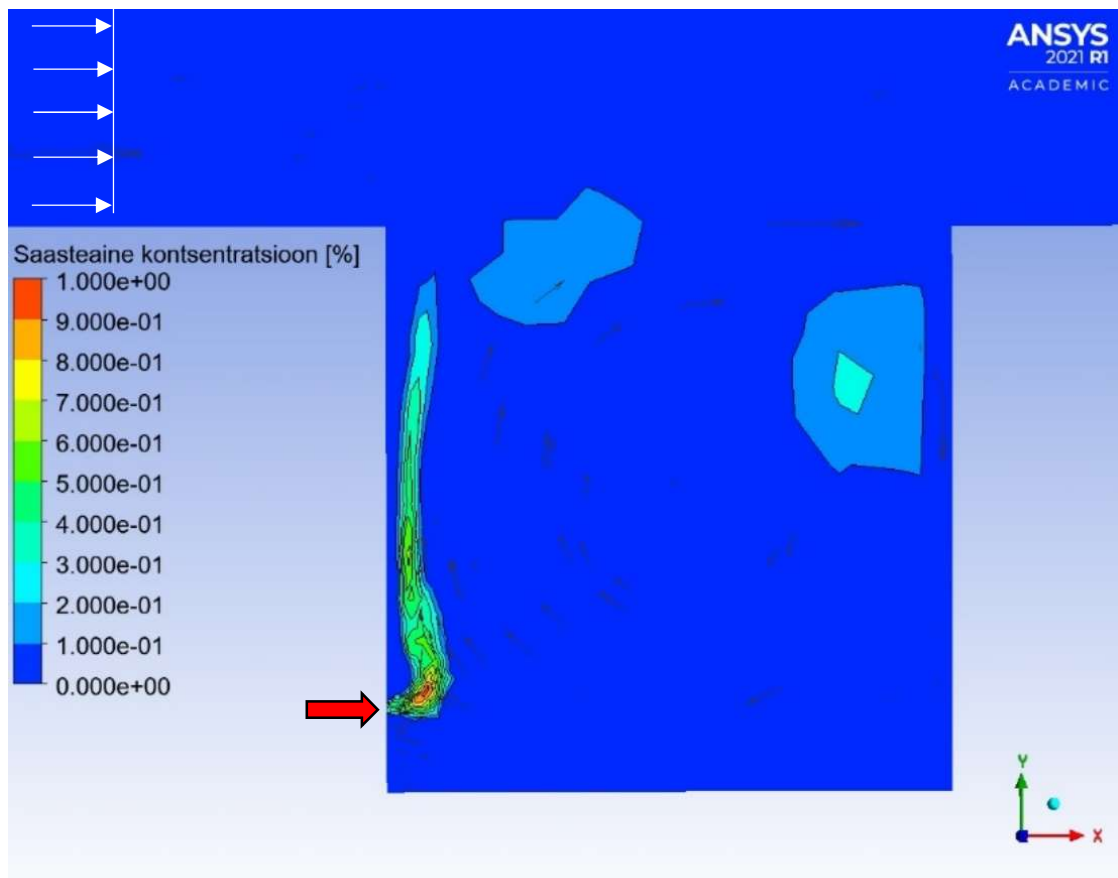
Joonis 3.9 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, esimesel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 7

Joonisel 3.9 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsenter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk piki hoone fassaadi üles ning hajub hoonete katuste kõrgusel. Väiksemad heitõhu saasteaine kontsentratsioonid (kuni 20%) tekivad ka vastashoone fassaadi ülemise kolmandiku lähedal. Tänavakanjoni põhja heitõhk ei jõua.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80...90%) asub vahetult peale hoonest väljumist vahemikus $y/H=0,15...0,2$ vahetult heitõhu väljaviske taga.



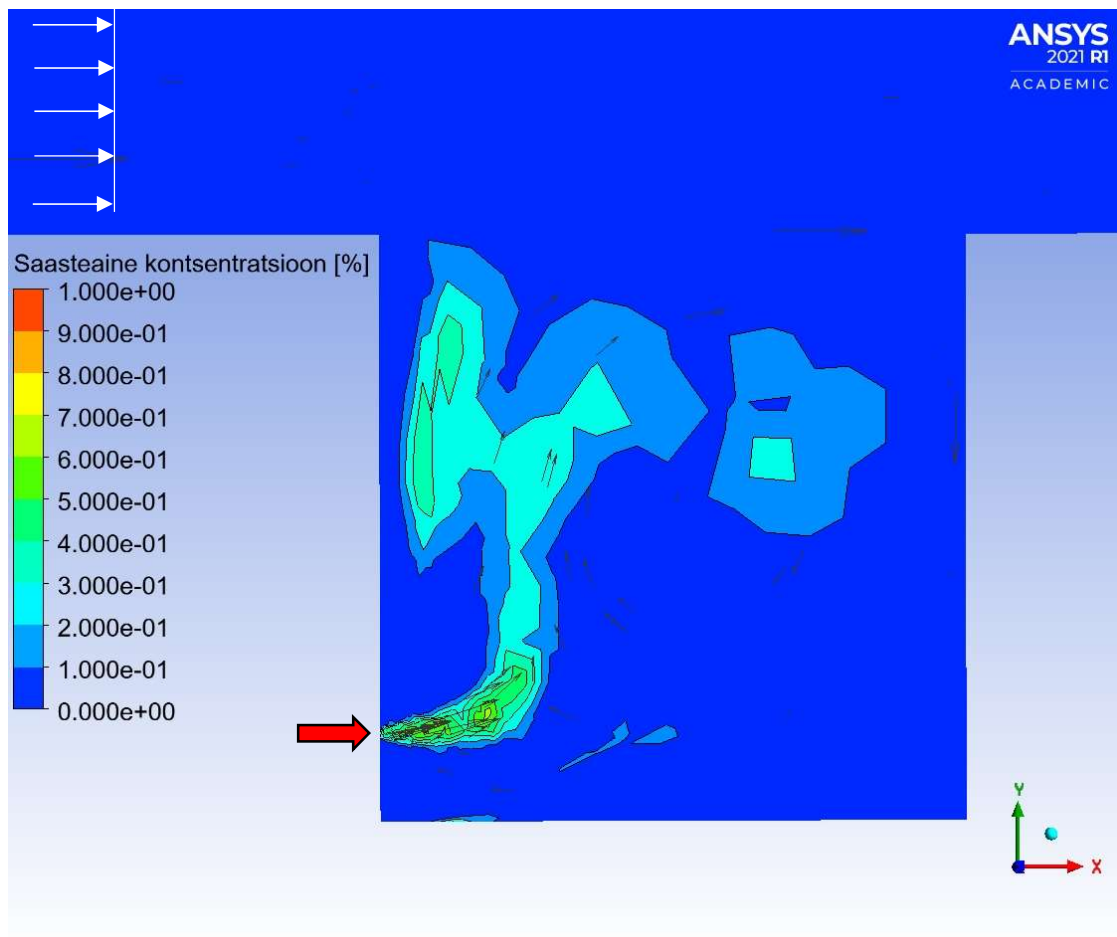
Joonis 3.10 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 8

Joonisel 3.10 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsenter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Võrreldes antud olukorda suurema kiirusega olukorraga (olukord 7) on näha, et heitõhk siseneb pöörise sisemisse osasse ja sealt liigub üle tuulepealse hoone katuse kanjonist välja. Suured kontsentratsioonid ei jõua pöörise keskosas asuvasse voolamiseta alasse, sest heitõhk paisatakse kanjonisse vastu pöörise voolamise suunda.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80...90%) asub vahetult peale hoonest väljumist vahemikus $y/H=0,15...0,2$ vahetult heitõhu väljaviske taga.



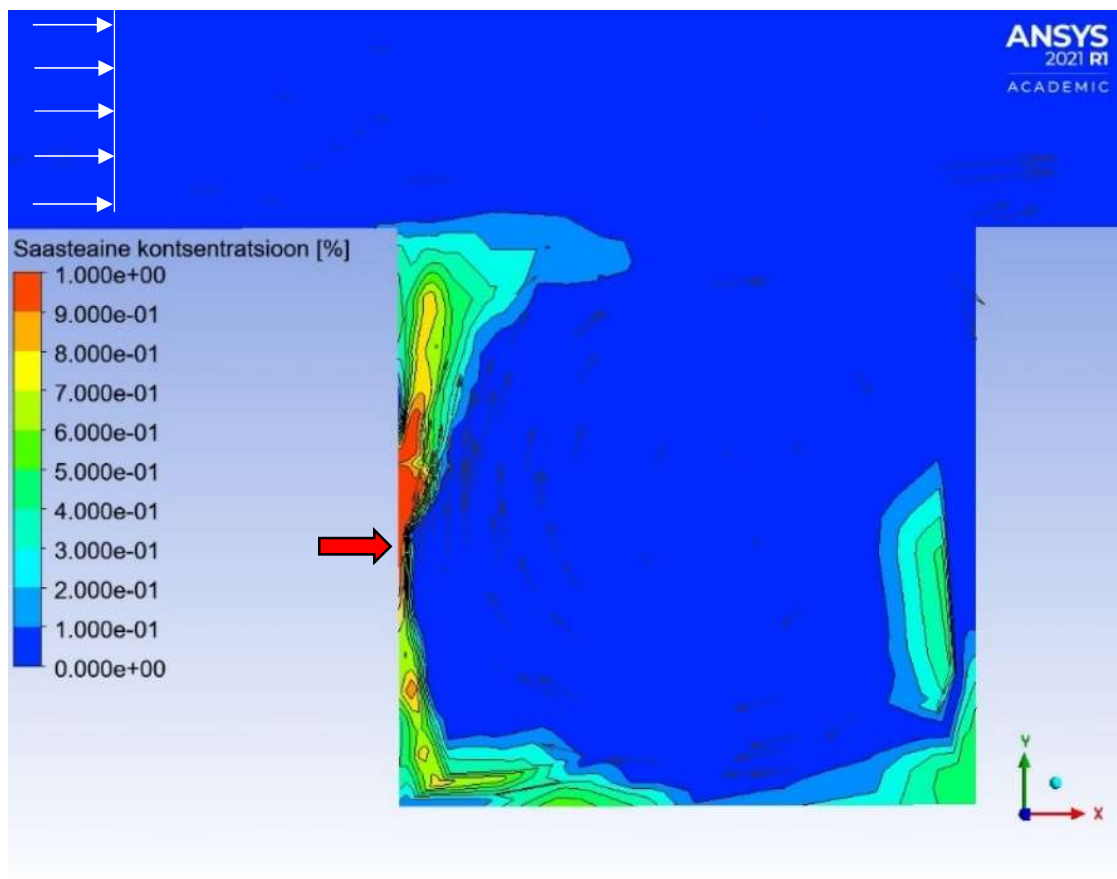
Joonis 3.11 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 9

Joonisel 3.11 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneval hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljavisatav heitõhk satub kanjonis olevasse pöörisesse ja osa sellest kantakse üle kanjoni vastasoleva hoone fassaadile. Sealt liigub heitõhk joonisel 3.2 kujutatud madala õhu voolamiskiirusega tsoonidesse mõlema hoone ja kanjoni põhja liitumispunktides. Allatuult hoone esisel maapinnal võib kontsentratsioon ulatuda kuni 90%. Vastashoone esisel maapinnal ulatuvad heitõhu kontsentratsioonid 60%.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub heitõhu väljaviskeava taga ja vahemikus $y/H=0,5...0,7$.

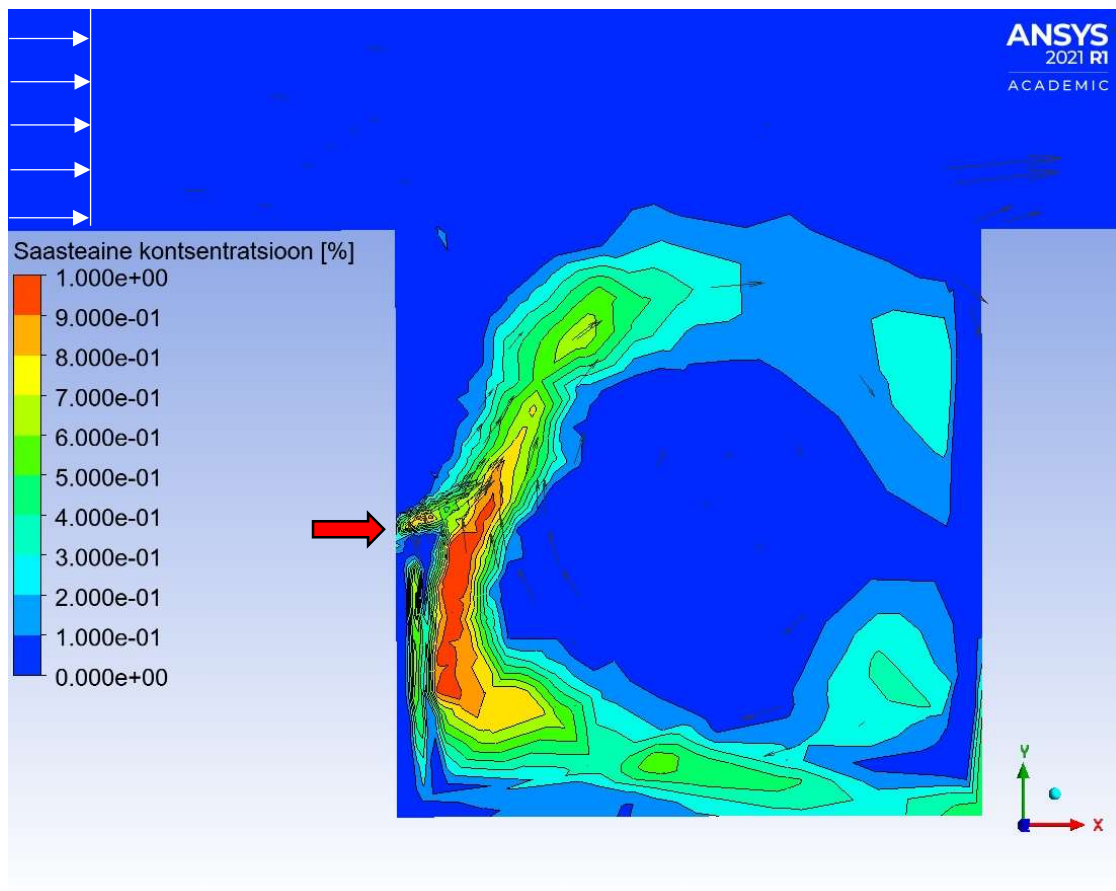


Joonis 3.12 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 10

Joonisel 3.12 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneval hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljavisatav heitõhk satub kanjonis olevasse pöörisesse, kus heitõhk jääb tänavakanjonisse ringleva. Heitõhu kontsentratsioonid hakkavad kasvama väljaviske asukohast madalamal, kus need võivad suurel alal ulatuda kuni 100%.



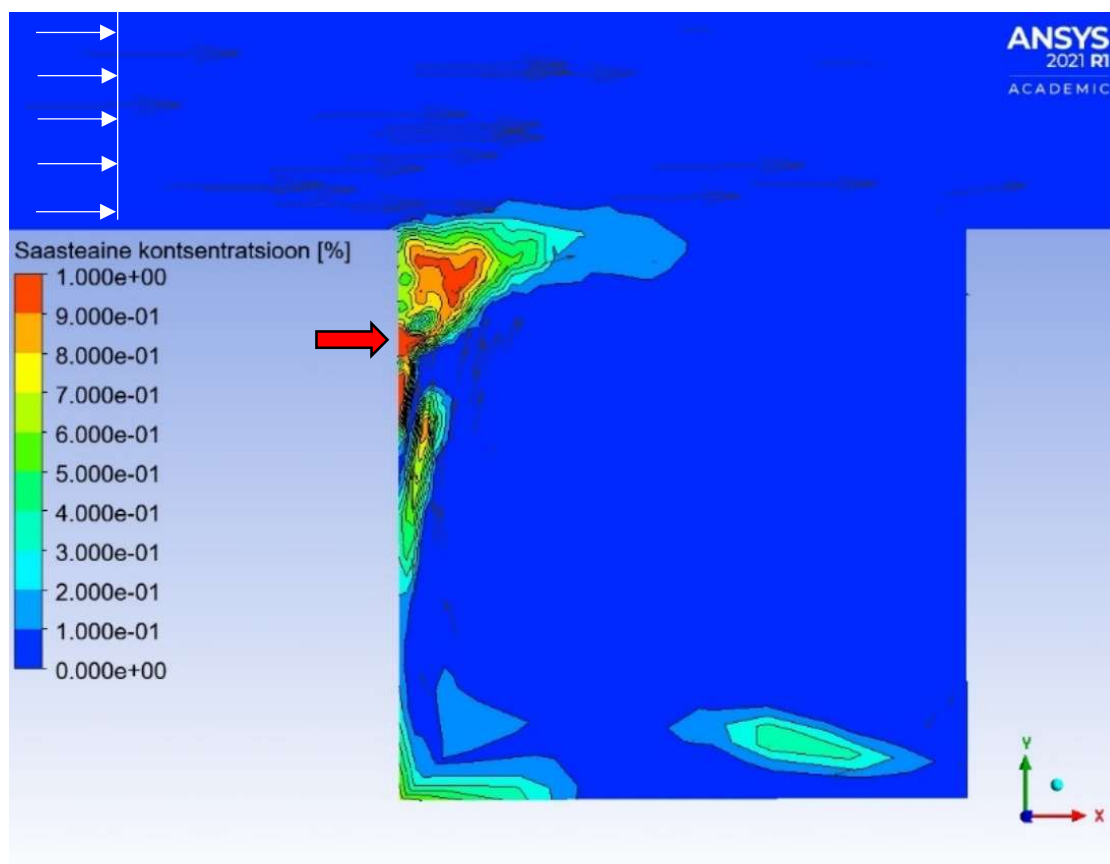
Joonis 3.13 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 11

Joonisel 3.13 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsenter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel haaratakse heitõhk pöörisesse ning see hajub kanjoni peal olevasse õhuvoolu hulka. Erinevalt väljaviske olukord nr 9, kus väljavise asub hoone fassaadi keskel, ei jõua heitõhu juga pöörise sisemiste kihtideni ja seetõttu ei kanta seda tagasi tänavakanjonisse.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub heitõhu väljaviskeava taga ja vahemikus $y/H=0,8...1$.

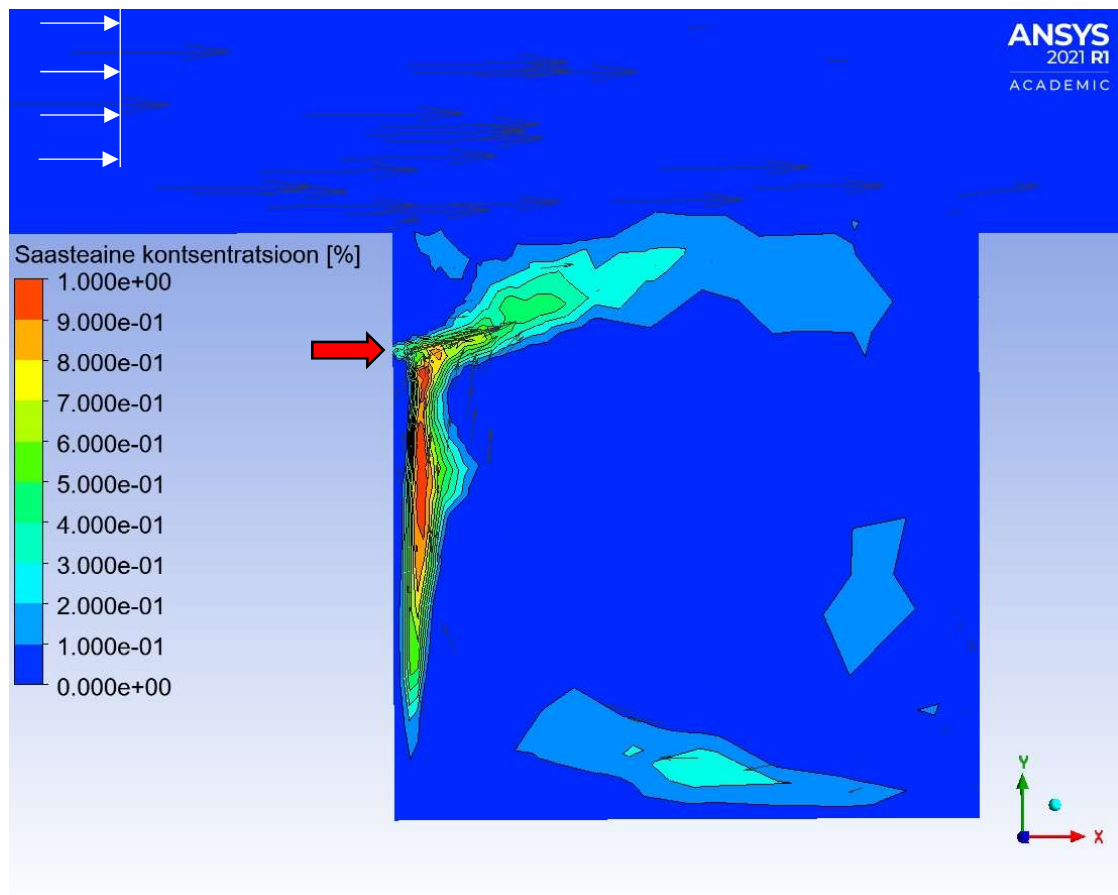


Joonis 3.14 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, ülemisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 12

Joonisel 3.14 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt nurga all 0° , suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljavisatav heitõhk satub kanjonis olevasse pöörisesse, kus osa heitõhust jääb tänavakanjonisse ringlema ning teine osa kantakse kanjonist välja. Heitõhu saasteaine kontsentratsioonid hakkavad kasvama väljaviske asukohast madalamal, kus need võivad suurel alal ulatuda kuni 100%. Erinevalt suurema kiirusega olukorrast, tuulealuse hoone ülemisse nurka heitõhu saasteaine kontsentratsioone ei kogune, sest kanjoni kohal oleva madalama kiirusega voolamise puhul tekib kanjoni nurka lokaalne pööris, mis haarab sealt heitõhu kaasa. Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub vahemikus $y/H=0, \dots, 0,8$.

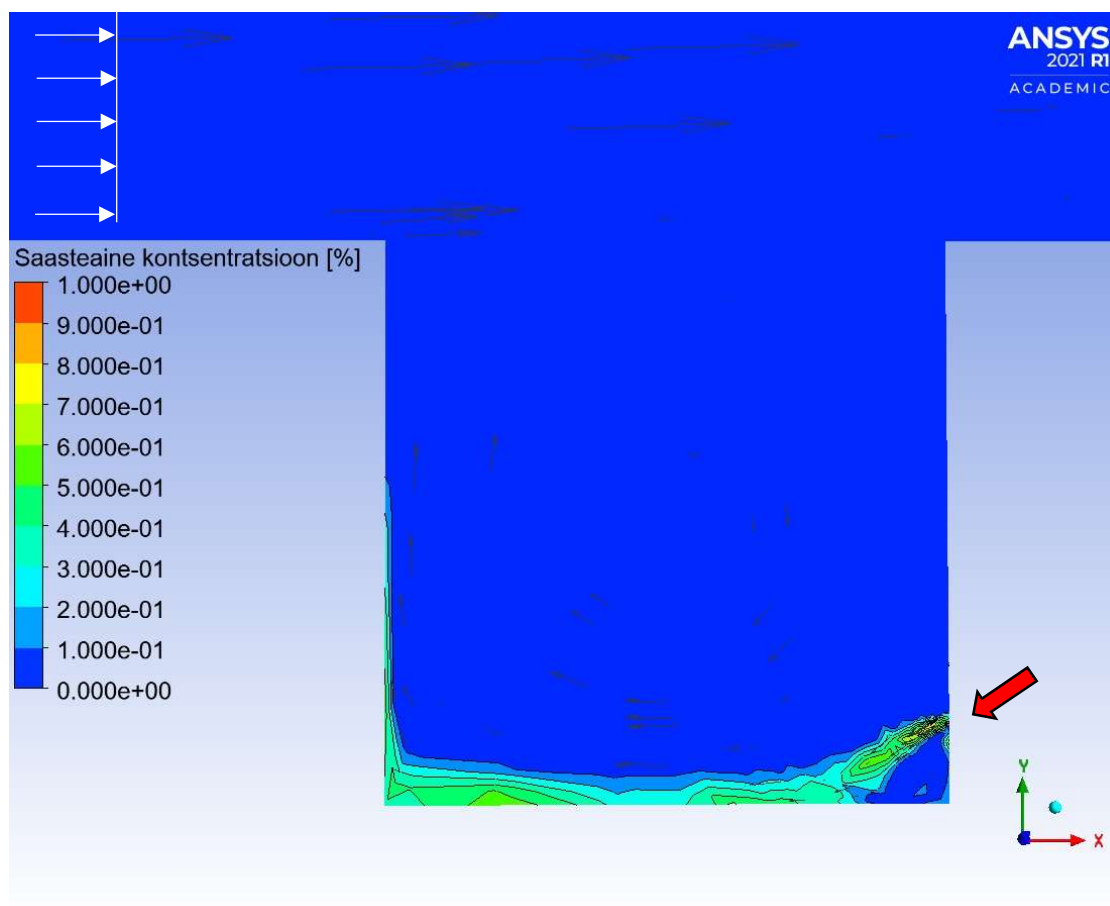


Joonis 3.15 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, ülemisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 13

Joonisel 3.15 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk piki kanjoni põhja, vastas asuva hooneni ja piki hoone fassaadi üles. Heitõhk hajub ümbritsevasse voolamisse hoone suhtelisel kõrgusel 0,5. Kuna heitõhk ei satu pöörise sisemisse tsooni, siis heitõhk ei jõua tagasi parempoolse hoone fassaadile.

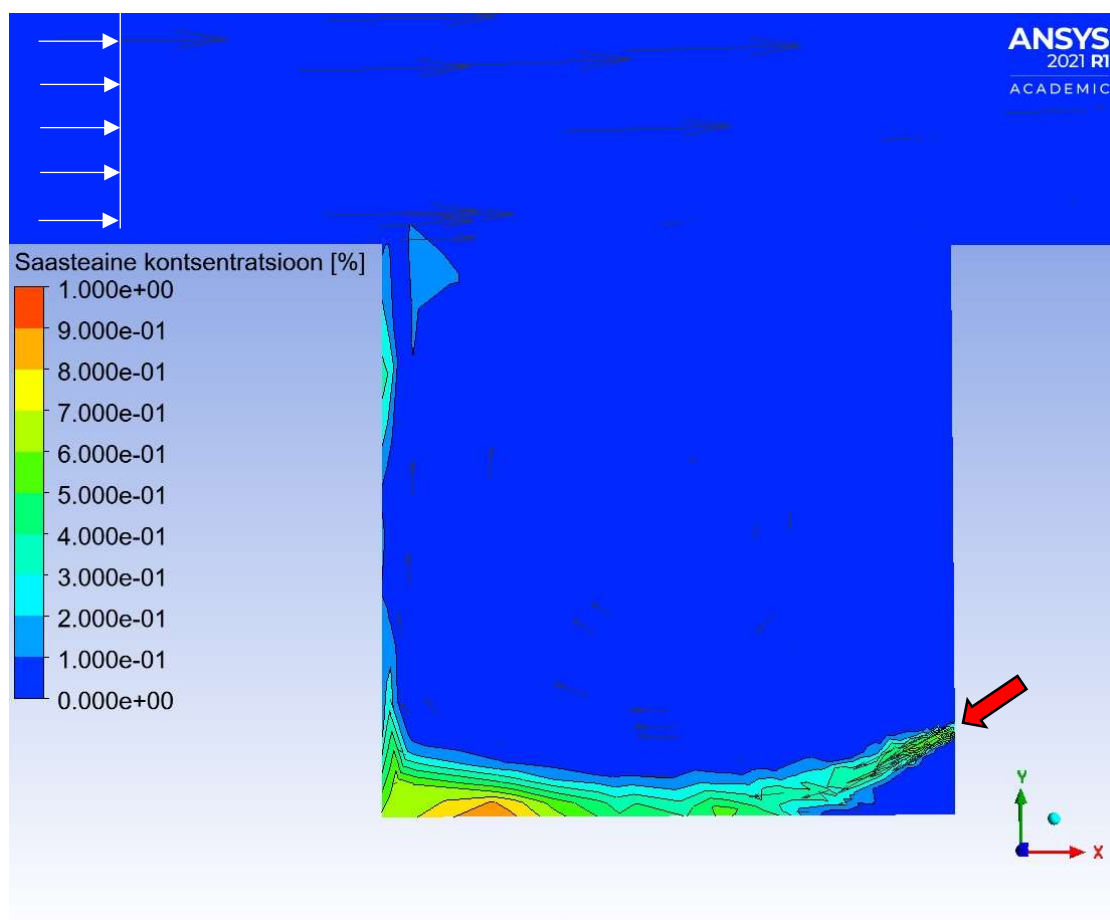


Joonis 3.16 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 14

Joonisel 3.16 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk piki kanjoni põhja vastas asuva hooneni. Suuremad saasteaine kontsentratsioonid tekivad joonisel 3.2 kujutatud madala õhu voolamise kiirusega tsoonis vastashoone ja kanjoni põhja liitumispunktis, kus heitõhu kontsentratsioon on kuni 90%. Edasi liigub heitõhk piki vastas asetseva hoone fassaadi üles ning seejärel hajub kanjonist väljudes ümbritsevasse õhuvoolu.

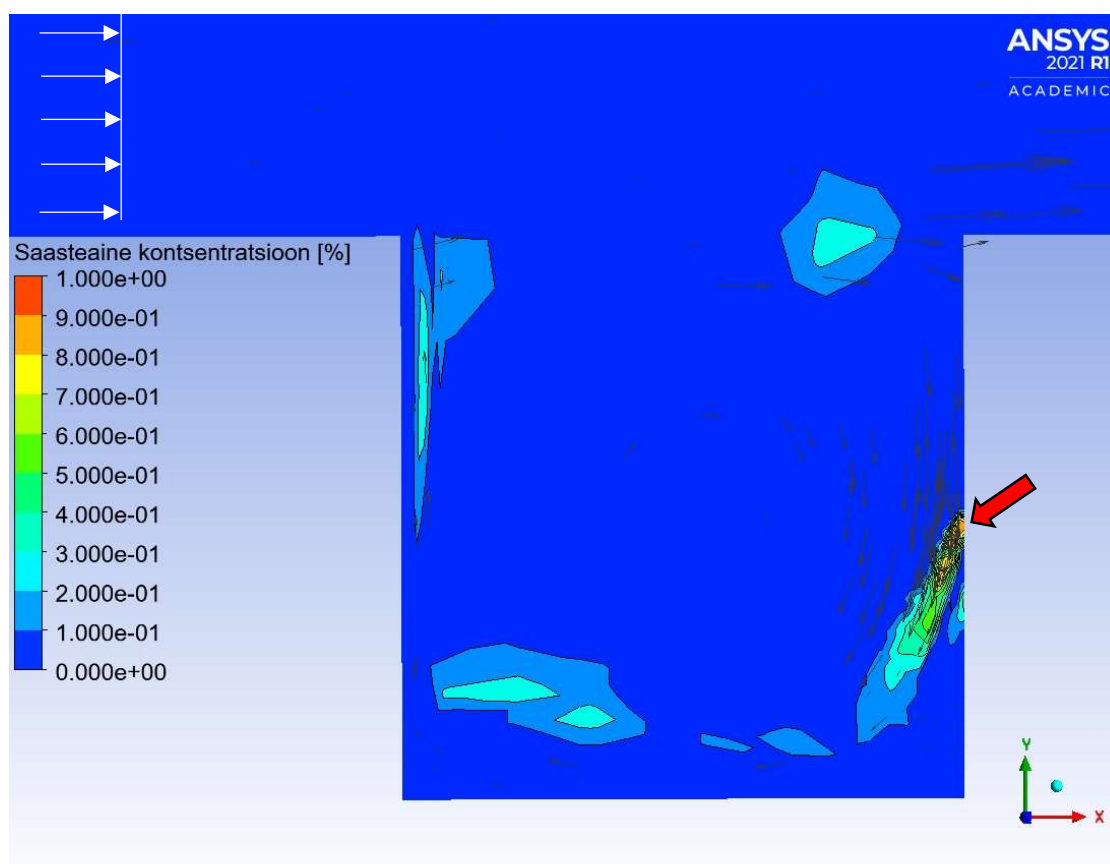


Joonis 3.17 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 15

Joonisel 3.17 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Hoonest väljavisatava heitõhu kõrgeimad kontsentratsioonid (80%) asuvad vahetult heitõhu väljaviskeava taga, hoonest väljumisel. Suure õhu voolamiskiiruse $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ tagajärjel ei jõua suuremad kontsentratsioonid tänavakanjoni põhja, vaid hajuvad kiirelt kanjonis tekkivas pöörises ning kantakse piki pöörise välimist perimeetrit üle parempoolse hoone katust.

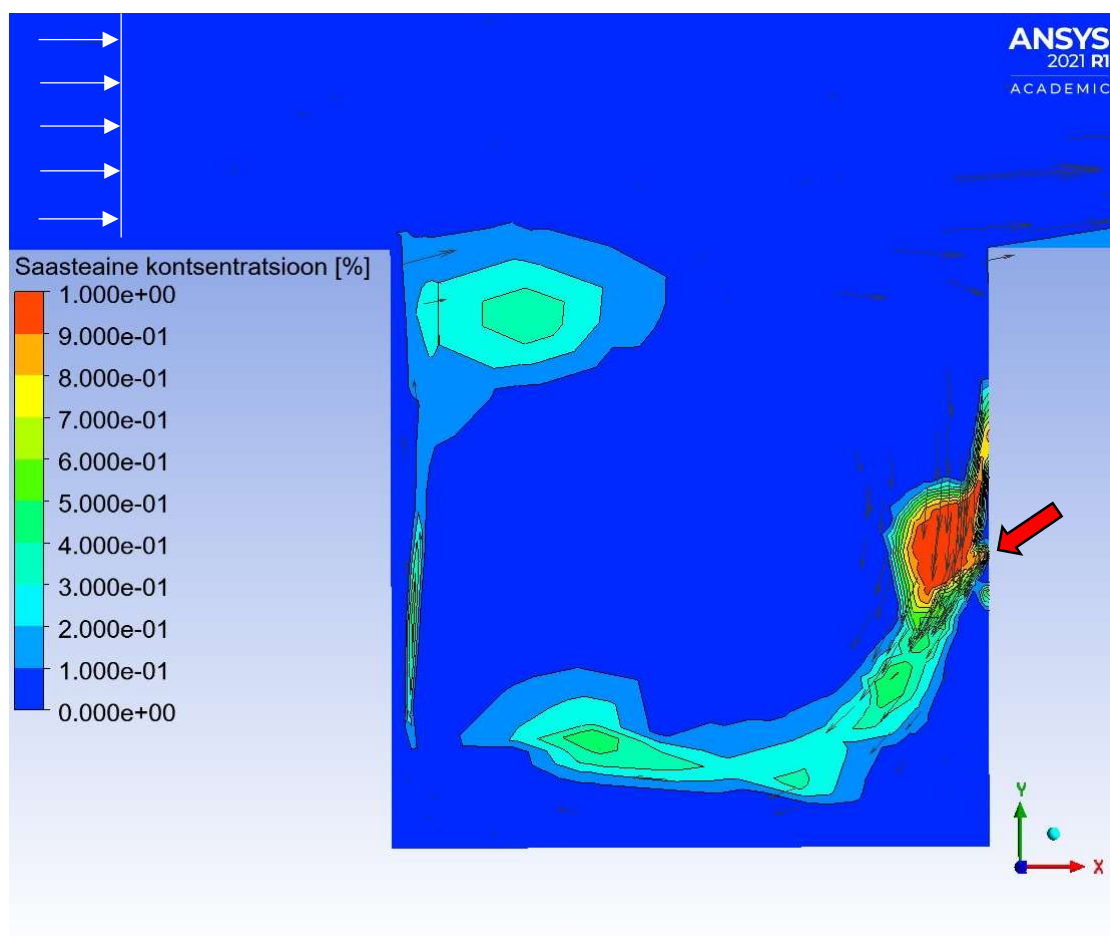


Joonis 3.18 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 16

Joonisel 3.18 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsenter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Antud olukorras on heitõhu väljaviske kiirus ja pöörise liikumise kiirus ligilähedased, mistõttu tekivad suured heitõhu kontsentratsioonid (100%) heitõhu ava ette. Tekkinud heitõhu „pilv“ hajub ajapikku tänavakanjonis ning see kantakse pöörise abil tänavakanjonist välja.

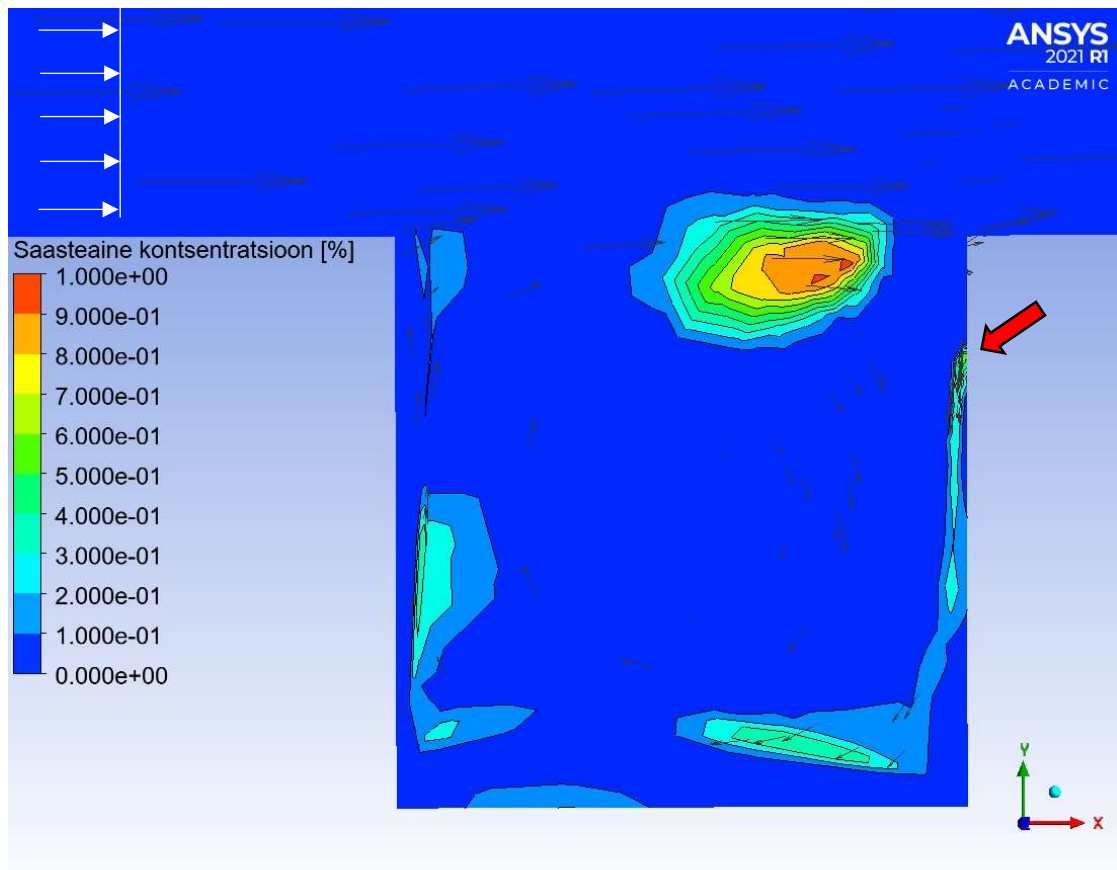


Joonis 3.19 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 17

Joonisel 3.19 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel liigub heitõhk hoonest välja ning voolab piki pöörise välisperimeetrit, hoone fassaadi ja tänavakanjoni põhja ning piki vastashoone fassaadi üles kuni hoone katuseni. Jõudes tagasi allatuult hoone fassaadini, satub see heitõhu väljaviske vooluhulga ja tänavakanjonisse pöörava õhu voolamise koosmõjul tekkivasse pöörisesse, mille tulemusel tekib tänavakanjoni kohale heitõhu „pilv“, kus pöörise keskmes võivad saasteaine kontsentratsioonid ulatuda kuni 100%.



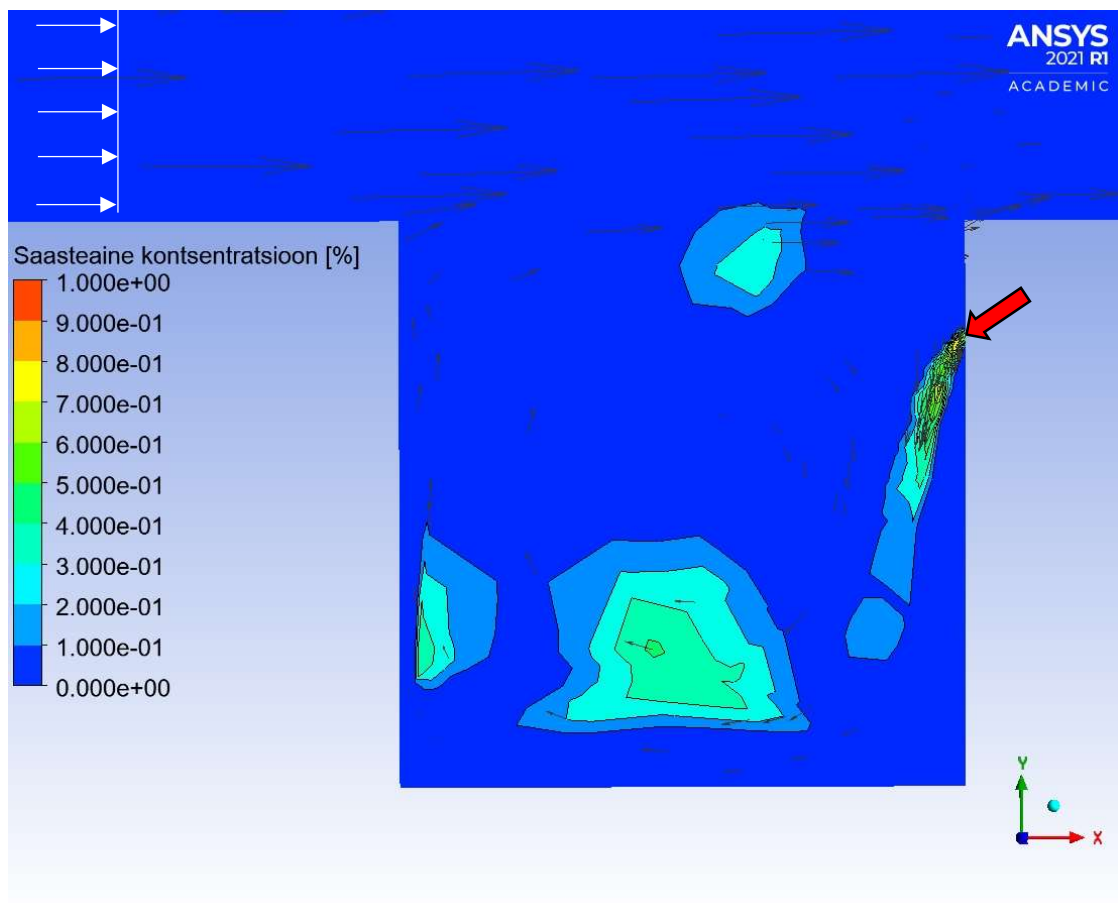
Joonis 3.20 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, esimesel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 18

Joonisel 3.20 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub pealetuult paikneva hoone fassaadil suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljavisatav õhk kantakse tänavakanjoni alumisse keskmisesse osasse, kus voolamise kiirus järsult väheneb. Sealt viiakse see aeglaselt tänavakanjonist välja.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80%) asub hoone fassaadil vahetult peale hoonest väljumist.



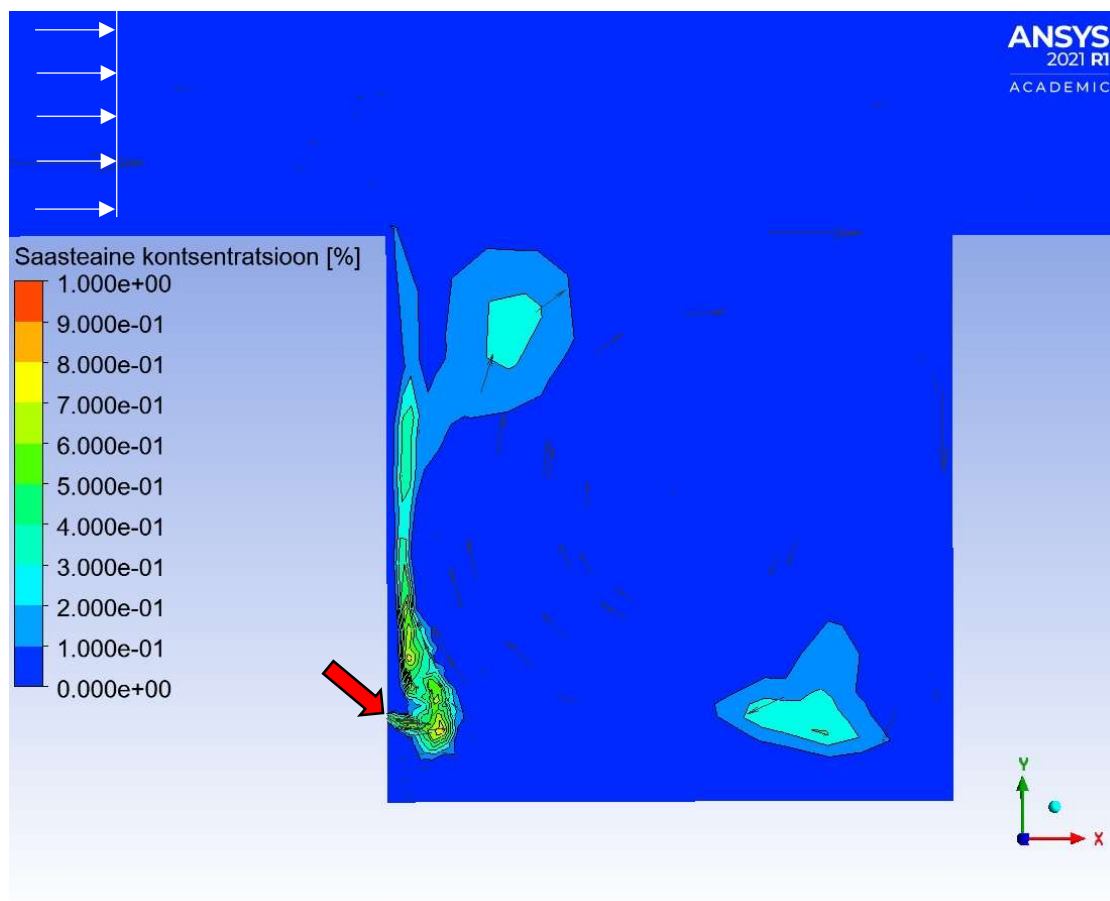
Joonis 3.21 Ventilatsiooni väljaviske asukoht pealetuult asuva hoone fassaadil, esimesel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 19

Joonisel 3.21 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Hoonest 45° all väljudes töötab väljaviske vastu pöörise voolamise suunda, mistõttu heitõhk liigub küll algselt hoone fassaadist eemale, ent pöörise tulemusel liibub tagasi vastu allatuult hoone fassaadi. Suur osa heitõhust hajub sisenedes pöörisesse, kuid kuni 30% liigub pöörisega kaasa ja tekitab madalama tuulekiirusega aladel suurema heitõhu kontsentratsiooniga alasid.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (70...80%) asub vahetult peale hoonest väljumist vahemikus $y/H=0,15...0,2$ vahetult heitõhu väljaviske taga.

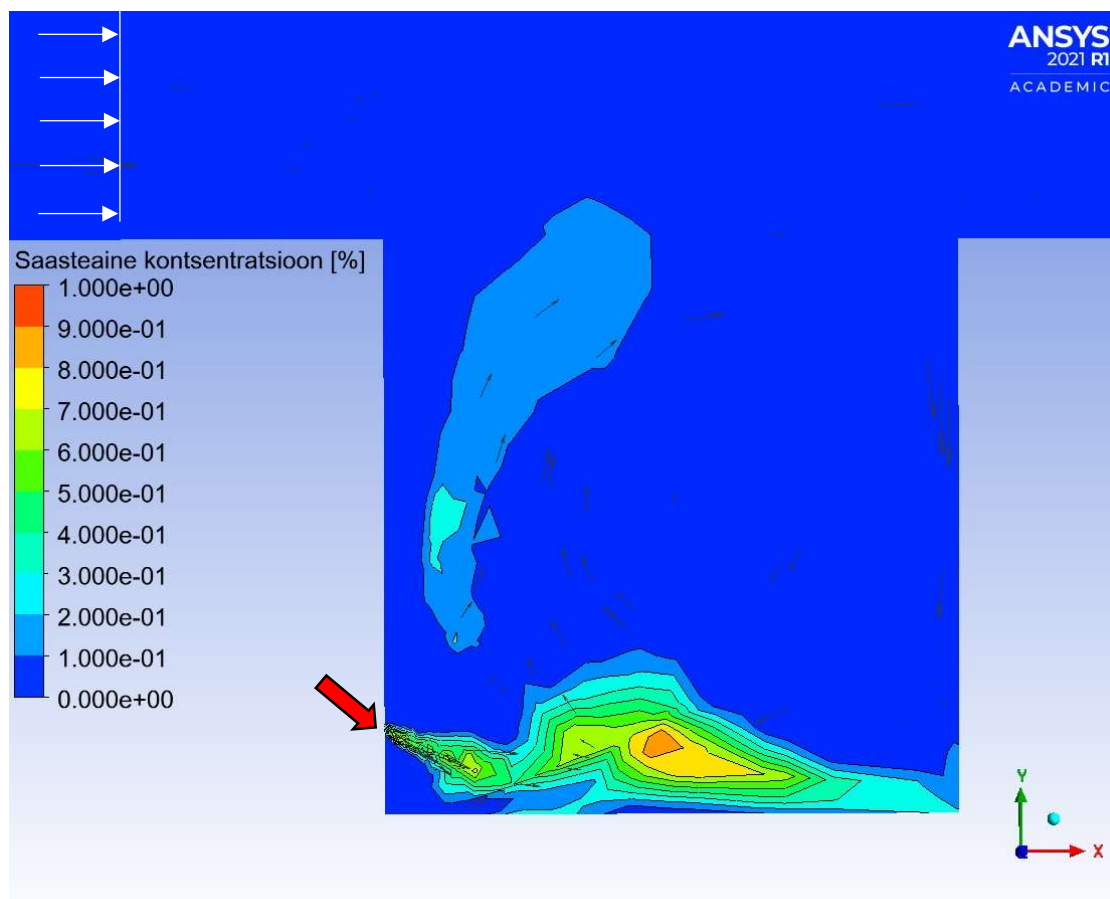


Joonis 3.22 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 20

Joonisel 3.22 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,15$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Antud olukorras on heitõhu väljaviske kiirus ja pöörise liikumise kiirus ligilähedased, mistõttu hoonest väljuv heitõhk satub tänavakanjoni põhja, kuhu see kogunema hakkab. Suurimad kontsentratsioonid tekivad tänavakanjoni keskel vahemikus $y/H=0...0,3$. Pöörise tulemusel kantakse heitõhk vähehaaval tänavakanjonist välja.



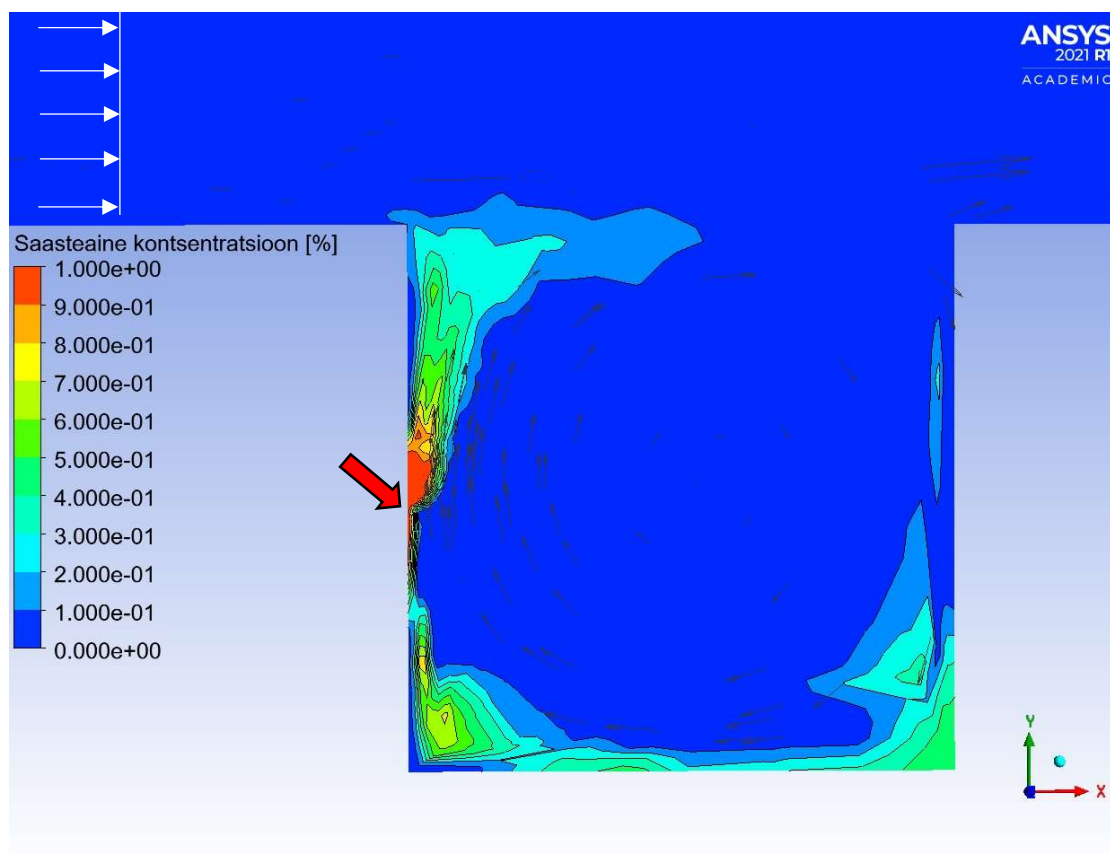
Joonis 3.23 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, alumisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 21

Joonisel 3.23 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneval hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Antud juhul visatakse heitõhk välja otse vastu pöörise voolamise suunda. Heitõhu väljaviskeava koha peal tekib ala, kus heitõhu väljaviske kiirus ja pöörise liikumiskiirus on võrdsed ($U_{2H}/U_{ref}=0,77$), seetõttu tekib alal, kus voolamist praktiliselt ei toimu ja kontsentratsioonid kasvavad kuni 100%. Enamus õhust hajub pöörises ja kantakse kanjonist välja. Osa saastest jääb kanjonisse tsirkuleerima ning see osa heitõhust kuhjub madala voolamise kiirusega aladel tänavakanjoni põhja ja hoonete fassaadide nurkadesse.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub heitõhu väljaviskeava taga ja vahemikus $y/H=0,5...0,7$.



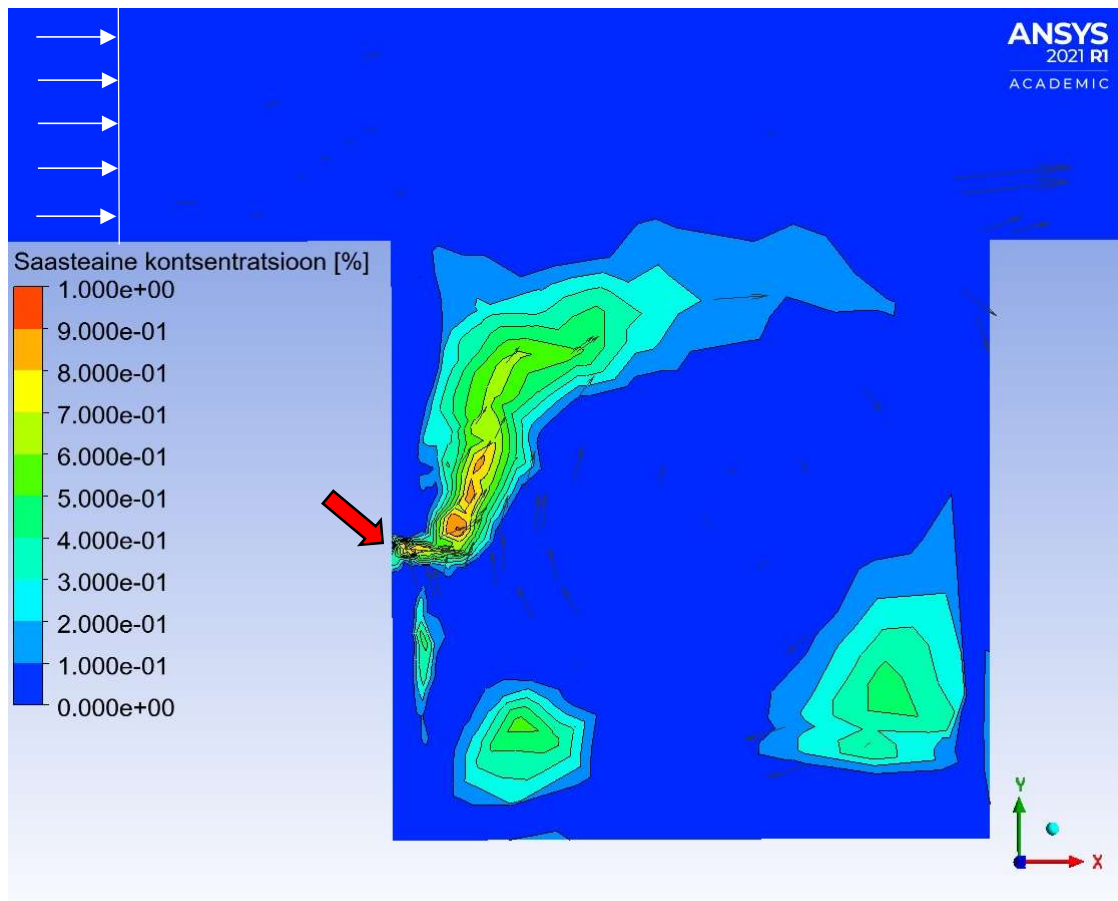
Joonis 3.24 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 22

Joonisel 3.24 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneval hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,5$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljavisatav heitõhk hajub kanjonis olevas pöörises ja enamus sellest kantakse tänavakanjonist välja. Kuid vähesel määral heitõhku jääb kanjonisse tsirkuleerima ja koguneb madala kiirusega aladele, kus tekitab lokaalseid saasteaine koldeid.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (kuni 90%) asub heitõhu väljaviskeava taga ja vahemikus $y/H=0,5...0,7$.



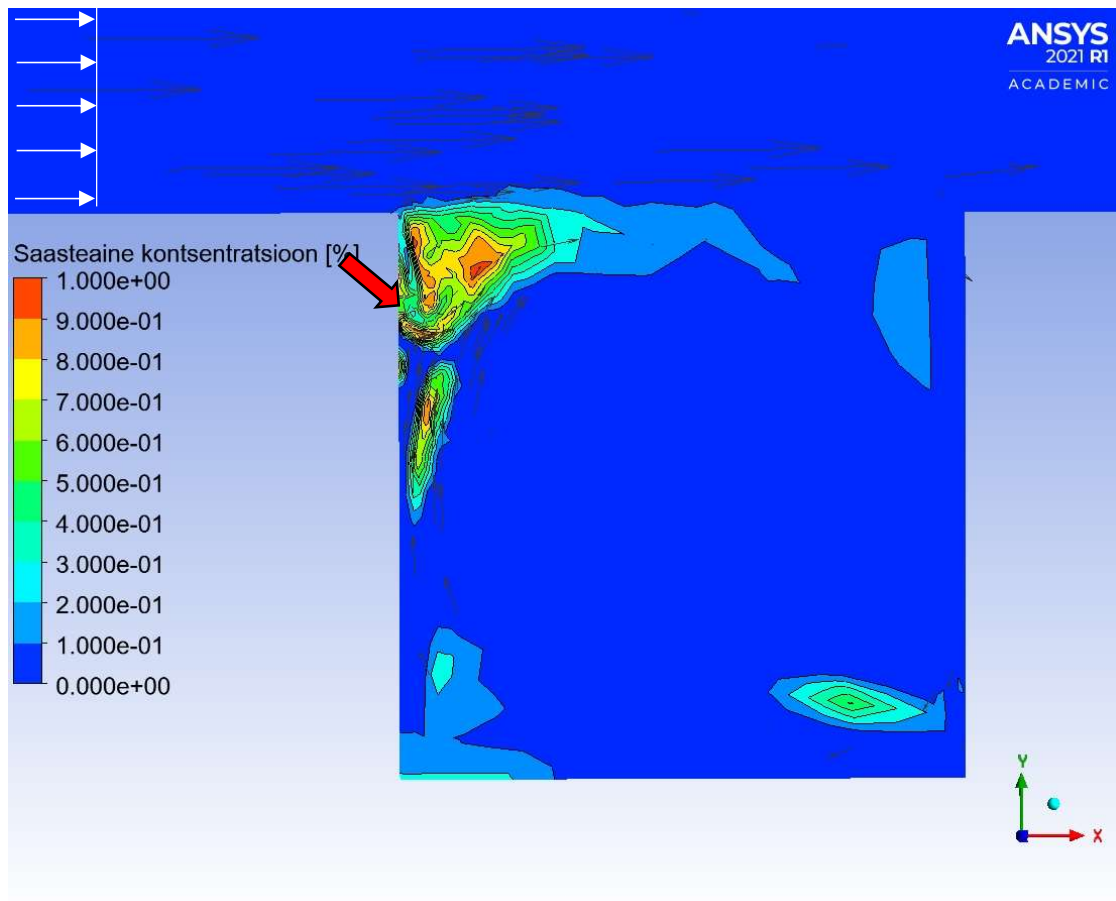
Joonis 3.25 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadi keskel.

Väljaviske olukord nr 23

Joonisel 3.25 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=2,3$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Väljudes hoonest 45° nurga all, haaratakse osa heitõhust kanjonis tekkivasse pöörisesse. Teine osa heitõhust jääb pealetuult hoone katuse tasapinnas asuvasse madala voolamise kiirusega tsooni.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (100%) asub heitõhu väljaviskeava taga ja vahemikus $y/H=0,5...1$.



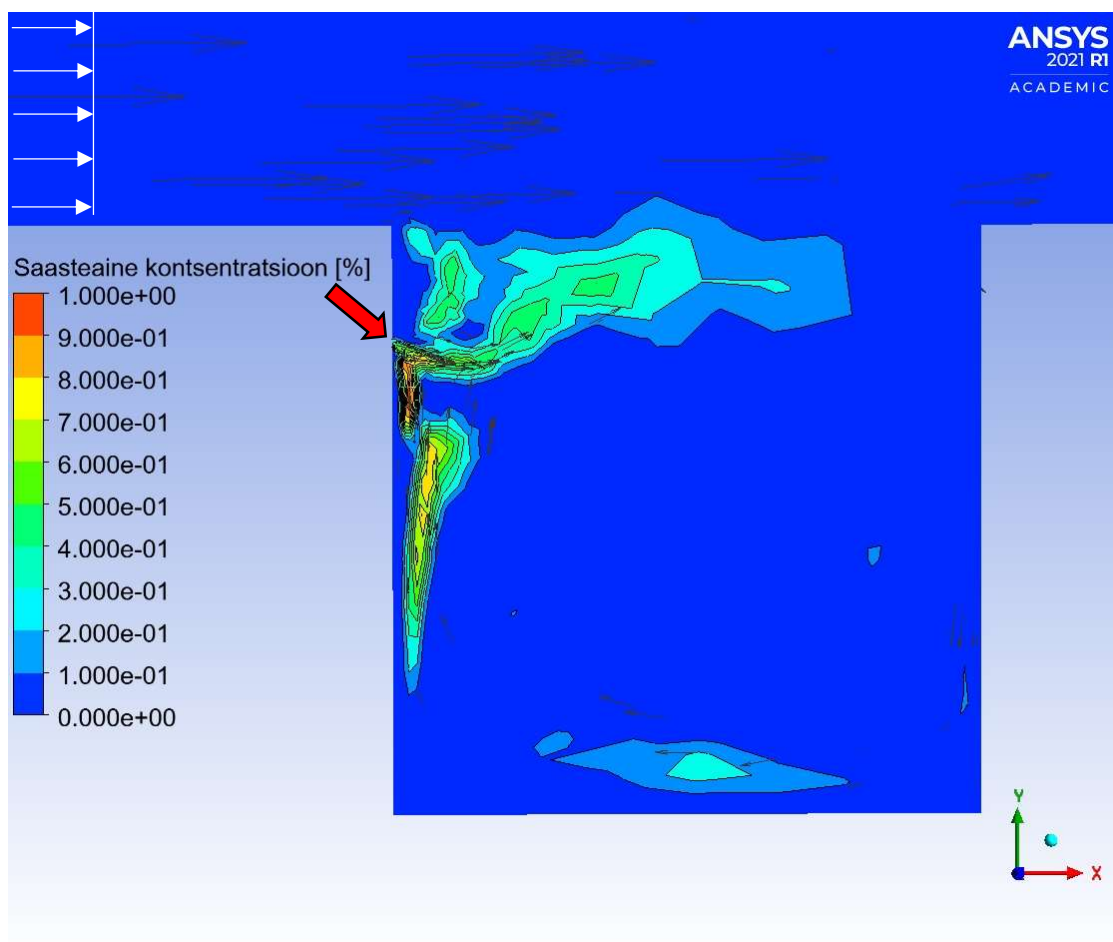
Joonis 3.26 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, ülemisel kolmandikul.

Väljaviske olukord nr 24

Joonisel 3.26 on kujutatud tasakaaluolukord, mis tekib kanjoniga risti puhuva dimensioonituule $U_{2H}/U_{ref}=1$ korral tänavakanjonis. Heitõhu väljaviske tsepter asub allatuult paikneva hoone fassaadil, suhtelisel kõrgusel $y/H=0,8$. Heitõhk väljub hoone fassaadilt 45° nurga all, suunaga maapinna poole, suhtelisel kiirusel $U_{2H}/U_{ref}=0,77$.

Kanjonis tekkiva pöörise tulemusel haaratakse heitõhk pöörisesse ning see hajub kanjoni peal olevasse õhuvoolu hulka. Erinevalt suurema kiirusega olukorrast tuulealuse hoone ülemisse nurka heitõhu saasteaine kontsentratsioone ei kogune, sest kanjoni kohal oleva madalama kiirusega voolamise puhul tekib kanjoni nurka lokaalne pööris, mis haarab sealt heitõhu kaasa.

Kõige suurem heitõhu kontsentratsioon (80...90%) asub heitõhu väljaviskeava taga.



Joonis 3.27 Ventilatsiooni väljaviske asukoht allatuult asuva hoone fassaadil, ülemisel kolmandikul.

3.3 Tulemuste hindamine

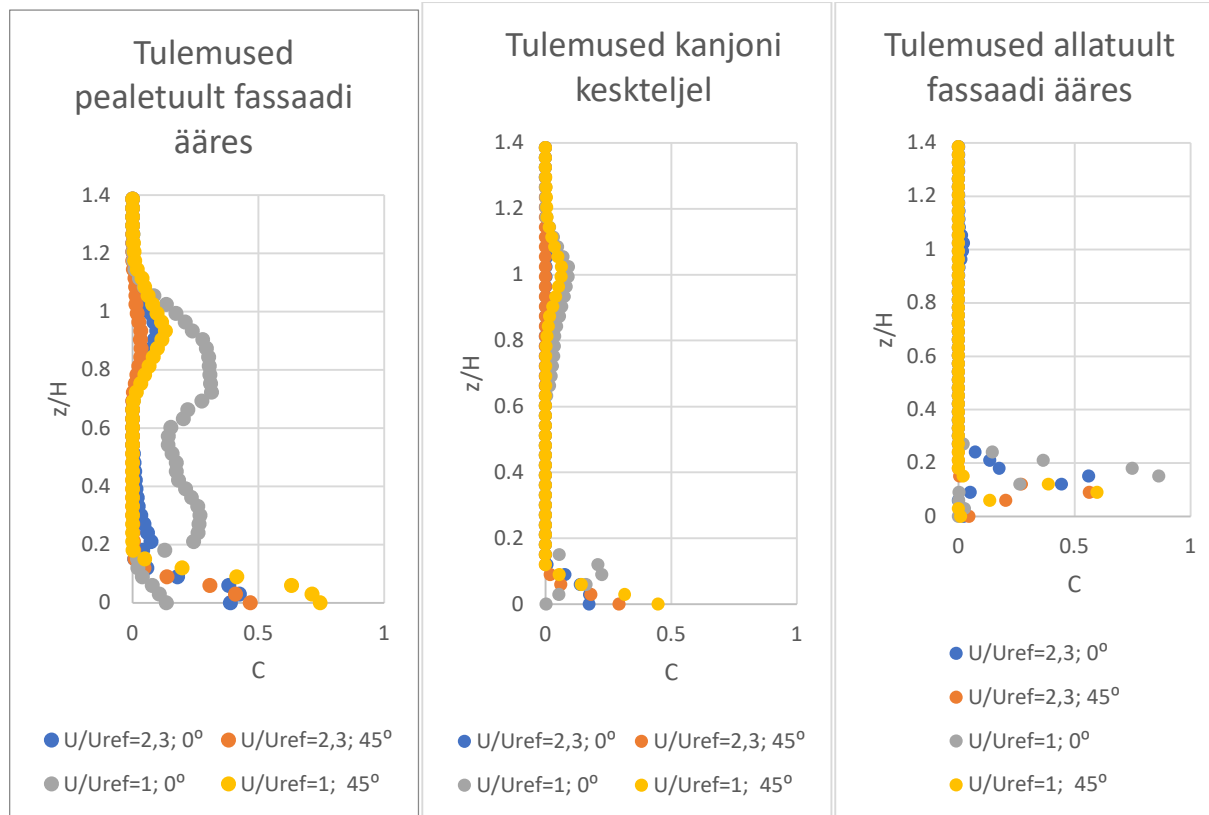
Graafikutel 3.1-3.6 on välja toodud saasteaine kontsentratsioonid, millel võrreldakse kanjonis tekkiva pöörise ja väljaviske koosmõju kanjoni kolmes ristlõikes. Horisontaalsel teljel on kujutatud kontsentratsioonide väärtuseid suhtarvuna. Vertikaalsel teljel on kujutatud uuritava punkti dimensioonitult kaugust kanjoni põhjast. Graafikutel on koondatud nelja erineva katse tulemused, kolmes kanjoni ristlõikes – allatuult fassaadi kõrval, pealetuult fassaadi kõrval ja kanjoni keskteljel. Vaadeldavad ristlõiked on toodud joonisel 2.3. Graafikutelt on võimalik hinnata, kuhu võivad konkreetse väljaviske asukoha korral tekkida kõrgemad heitõhu kontsentratsioonid.

Olukordades 1, 2, 7, 8, 13, 14, 19, 20, kus väljaviske asub suhtelisel kõrgusel $z/H=0,15$, on näha, et kõikide olukordade puhul (eriti madalama tuulekiiruse korral) tekib kanjoni põhjas märkimisväärne saasteaine reostus. Seda sama kinnitavad ka peatükis 3.2 väljatoodud väljaviske olukordade simulatsiooni joonised. Madalama tuulekiiruse korral võib heitõhu kontsentratsioon olla kanjoni põhjas kuni 80%. Sõltuvalt sellest, mida sisaldab heitõhk (nt köökide/sööklate lõhnad), võib see põhjustada kanjonis viibivatel inimestel ebamugavustunnet. Vaadeldes punktis 3 toodud vastavate olukordade graafikuid selgub, et teatud olukordades võib heitõhu saasteõhk liibuda vastasoleva hoone fassaadile, mis põhjustab heitõhu sisenemist hoonesse läbi potentsiaalselt avatud akende või õhuvõtuavade.

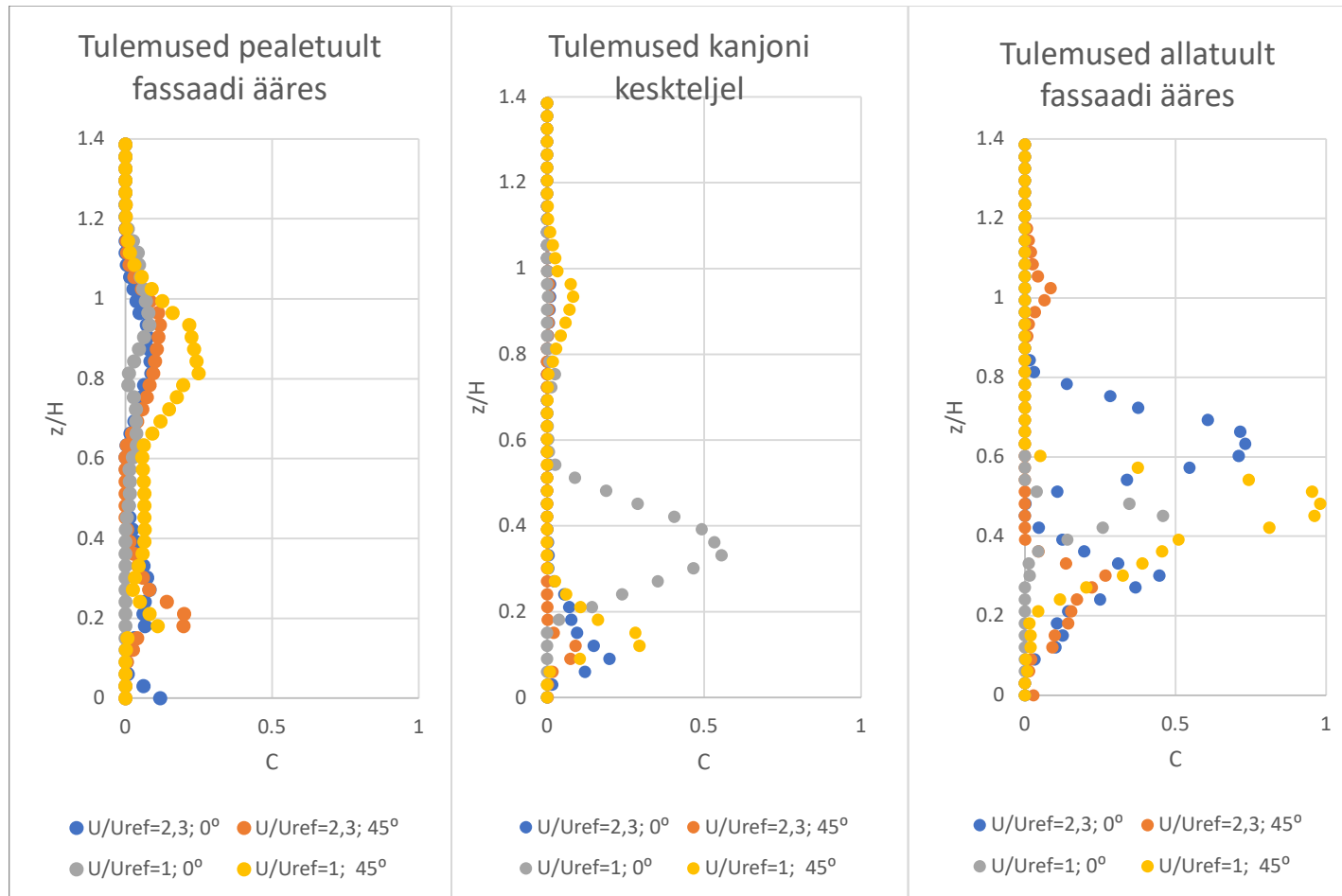
Olukordades 3, 4, 9, 10, 15, 16, 21, 22, kus väljaviske asub suhtelisel kõrgusel $z/H=0,5$, on näha, suurt rolli saasteaine levimisele mängib tuulekiirus. Kui tuule kiirus on aeglane, siis siseneb hoonest heidetav saastunud õhk tänavakanjoni sisemisse pöörisesse ning jääb sinna tsirkuleerima seni, kuni ajapikku sealt väljub. Suurema tuulekiiruse puhul haaratakse saasteaine pöörise välimisse osasse. Olukorras, kus väljaviske asub pealetuult fassaadil, liibub saastunud heitõhk hoone fassaadile, mis võib põhjustada saastunud õhu sattumist tagasi hoonesse.

Olukordades 5, 6, 11, 12, 17, 18, 23, 24, kus väljaviske asub suhtelisel kõrgusel $z/H=0,8$, on näha, et enamuse väljaviskatavast saastunud õhust liigub mööda pöörise välimist perimeetrit ja ei jää kauaks tänavakanjonisse tsirkuleerima. Olukorras nr 6, kus on tegemist aeglasema tuulekiirusega $U/U_{ref}=1$, väljaviske asub kanjoni allatuult fassaadil ja väljaviske joa suund on fassaadiga risti, satub saastunud õhk aga tänavakanjoni sisemisse pöörisesse. Mõningate juhtude puhul (nt 11 ja 23) jääb osa saastunud õhust pealetuult fassaadi katuse tasapinnas asuvasse madala tuulekiirusega tsooni pöörlema.

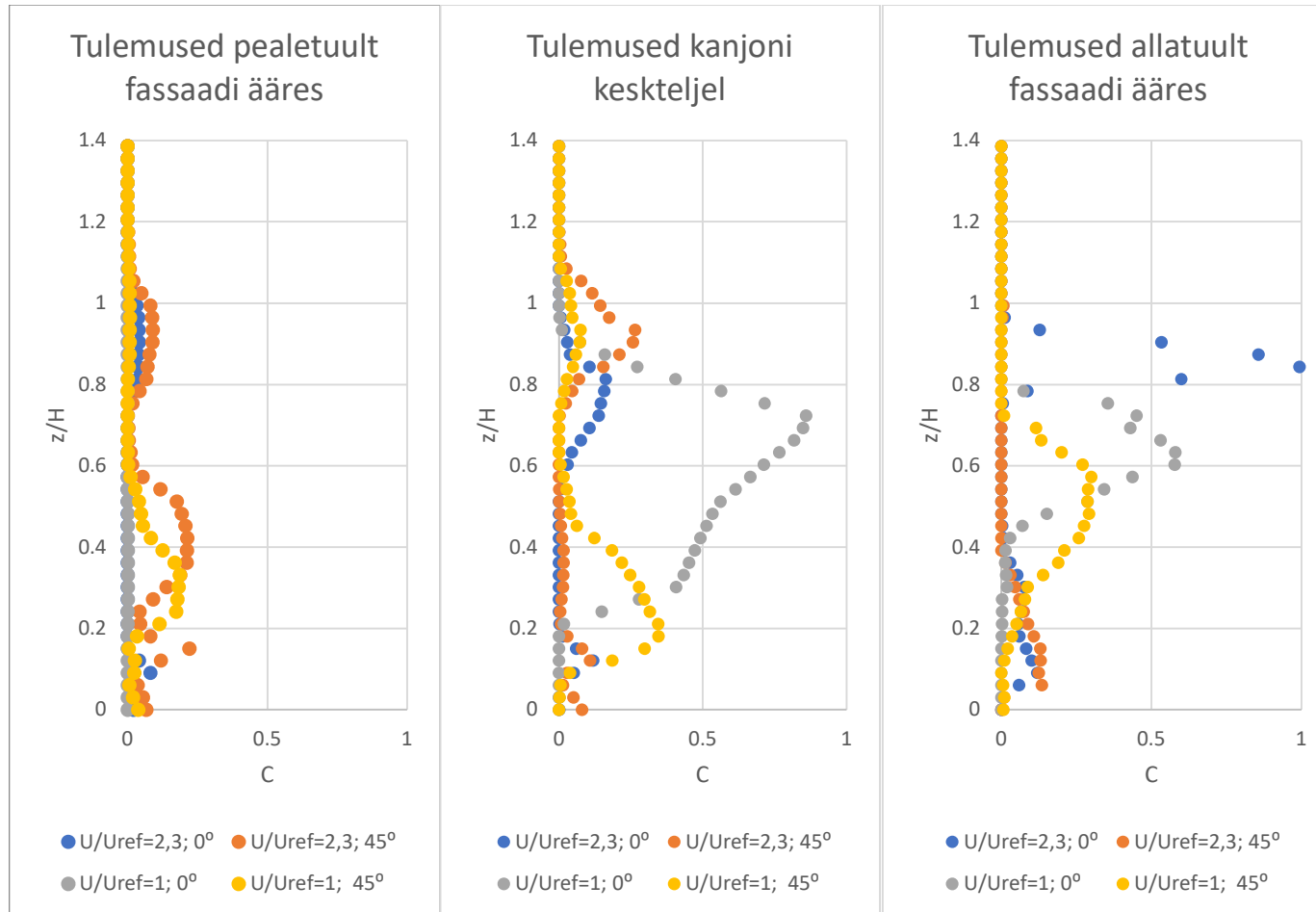
Graafik 3.1 Väljavise asub tänavakanjoni allatuult fassaadil, kõrgusel $0.15H$



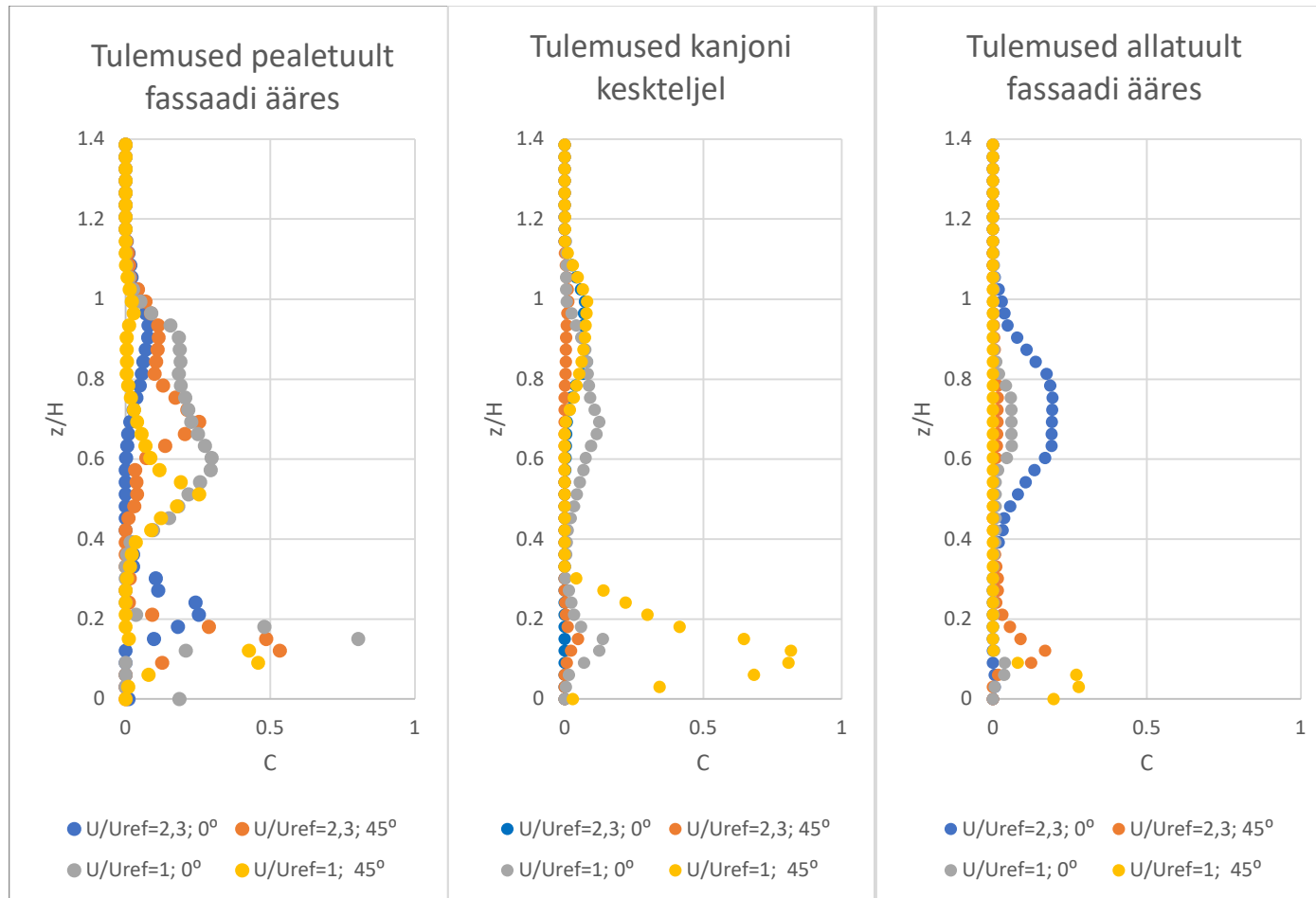
Graafik 3.2 Väljavise asub tänavakanjoni allatuult fassaadil, kõrgusel 0.5H



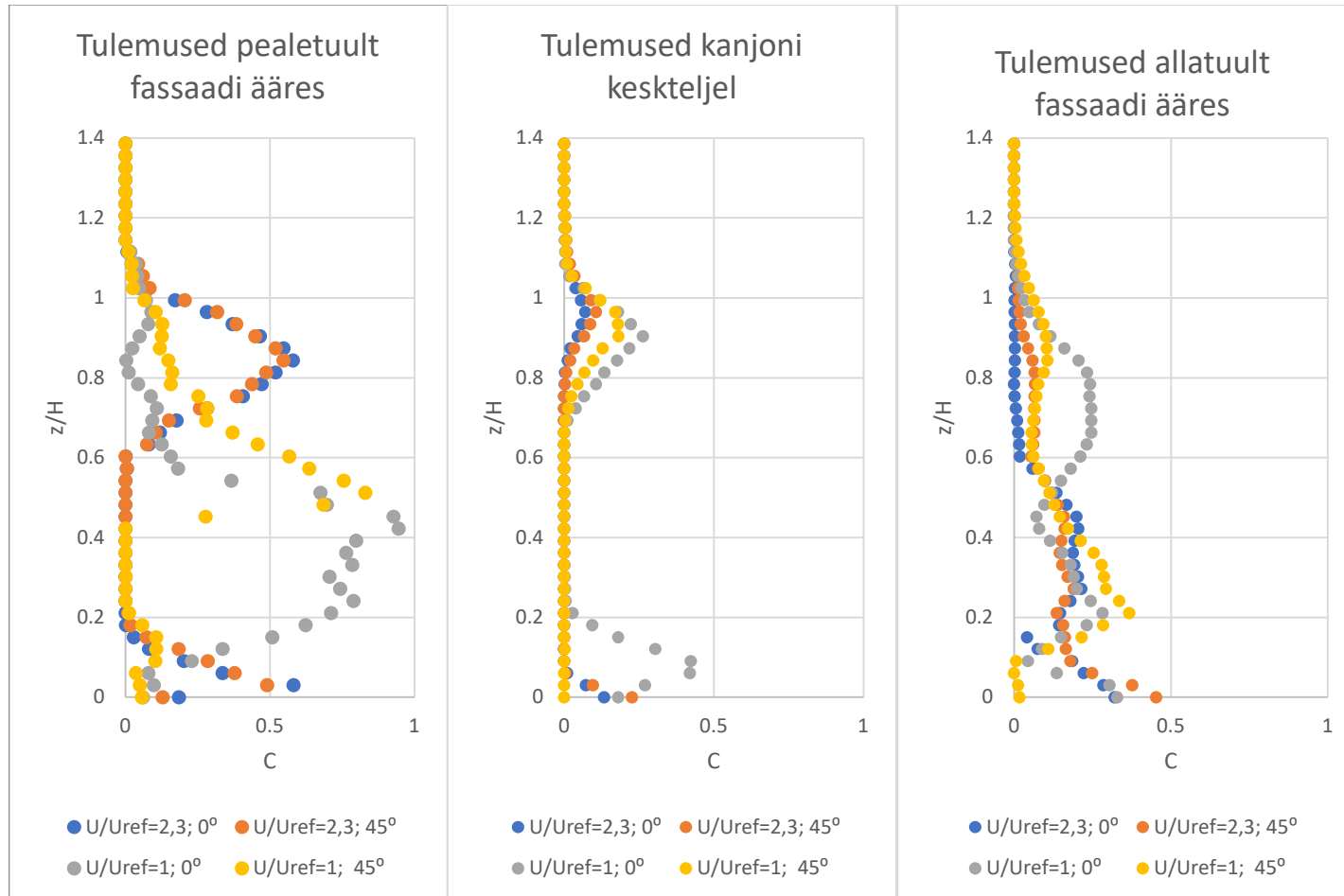
Graafik 3.3 Väljavise asub tänavakanjoni allatuult fassaadil, kõrgusel 0.8H



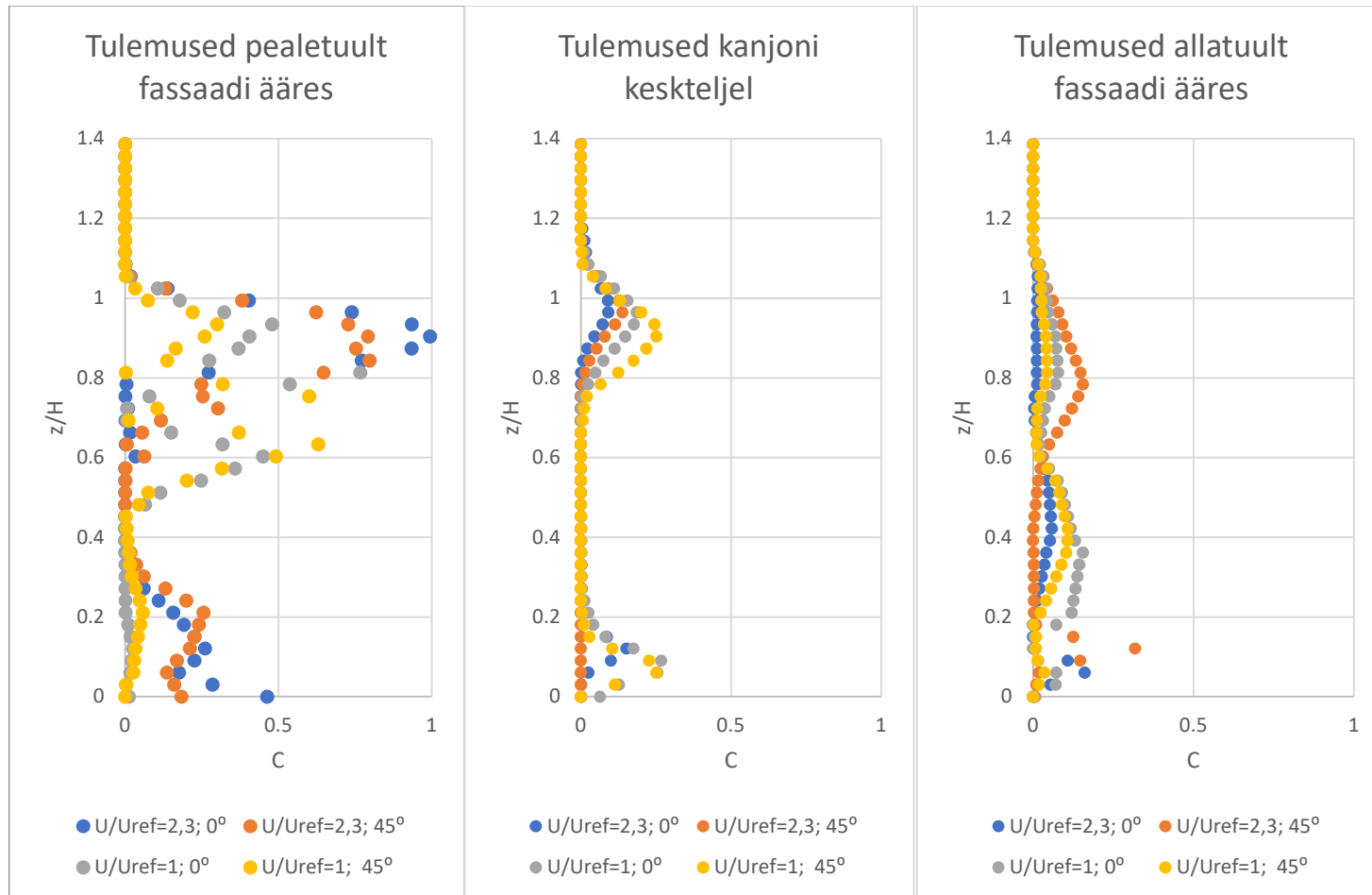
Graafik 3.4 Väljavise asub tänavakanjoni pealetuult fassaadil, kõrgusel 0.15H



Graafik 3.5 Väljavise asub tänavakanjoni pealetuult fassaadil, kõrgusel 0.5H



Graafik 3.6 Väljavise asub tänavakanjoni pealetuult fassaadil, kõrgusel $0.8H$



Ventilatsioonisüsteemide projekteerimisel on oluline, et hoonete heitõhu väljaviske- ja õhuvõtuavad oleks paigaldatud nii, et hoonest välja visatav õhk ei satuks tagasi hoonesse. Samuti peab jälgima, et heitõhk ei satuks ka teistesse lähedal asuvatesse hoonetesse.

Selleks, et hinnata hoone õhuhaarde asukohade paiknemist fassaadil, mille puhul saastunud heitõhk ei põhjustaks halbade lõhnade ning suure CO₂ sisaldusega õhu pääsemist hoonesse tagasi, on käesolevas töös hinnatud lahjendusteguri väärtusi modelleeritud tänavakanjonis. Lahjendustegur on väljaviskeava ees oleva saasteaine kontsentratsiooni suhe vaadelavas punktis olevasse saasteaine kontsentratsiooni.

$$DF = C_{\text{väljavise}} / C_{\text{uuritav punkt}}, \quad (3.1)$$

kus DF – lahjendustegur, $C_{\text{väljavise}}$ – saasteaine kontsentratsioon väljaviskeava ees, $C_{\text{uuritav punkt}}$ – saasteaine kontsentratsioon uuritavas mudeli punktis.

Lisas 1 ja näidisenä tabelis 3.2 on tulemused, milles on välja toodud lahjendustegurid kõikides töös uuritud väljaviskeavade asukohtade korral hoone fassaadidel. Tabelis on toodud saasteaine kontsentratsioonid väljaviskeava ees ja erinevatel kõrgustel tänavakanjoni põhjast. Andmed on võetud mudelist 1 mm kaugusel fassaadist. Nende andmete järgi on arvutatud lahjendustegurid, mida on võrreldud ASHRAE soovitusetega erinevate heitõhu klassidega. R. L. Petersen et al. töid 2016. aastal artiklis välja ASHRAE klassidele vastavad minimaalsed lubatud heitõhu lahjendusteguri väärtused, mille puhul võib õhku kasutada hoone värske õhuga varustamiseks[27].

Tabel 3.1 – Lahjendustegurid ASHRAE standardi kohaselt [27]

Heitõhu klass	Minimaalne lahjendustegur DF
Klass 1	5
Klass 2	10
Klass 3	50
Klass 4	300

Käesolevas töös kasutati tabelis 3.1 toodud väärtuseid hindamaks tänavakanjonist värske õhu kasutamise võimalikkust.

Vastavalt soovitusetele peab klass 3 omadustega õhu puhul olema lahjendustegur vähemalt 50, klass 4 omadustega õhu puhul minimaalselt 300. Lisa 1 tabelites on klassile 4 sobilikud õhuvõtukohad tähistatud rohelisega ja klassile 3 sobilikud

õhuvõtukohad on tähistatud sinisega, kusjuures sobivad ka rohelisega tähistatud asukohad, sest klass 4 nõuded on klass 3 nõuetest karmimad. Klass 2 omadustega (tähistatud oranži värviga) õhu puhul on minimaalne vajalik lahjendustegur 10 ning klass 1 omadustega (tähistatud kollasega) õhu puhul minimaalselt 5. Kõigile madalama klassi omadustega õhu puhul sobivad kõrgema klassi omadustega õhu potentsiaalsed õhuvõtu asukohad. Punasega on tähistatud alad, kus lahjendustegur ei vasta ühegi heitõhu klassi nõuetele, mistõttu pole soovitatav nendesse asukohtadesse õhuhaardeid paigaldada.

Käesolevas töös modelleeriti tänavakanjoni mudelis, mille puhul on üks fassaad alati allatuult ning teine fassaad pealetuult. Reaalses elus võib tuul puhuda üle tänava kanjoni mõlemat pidi, seega väljaviske asukohtade valikul peab arvestama mõlemat pidi puhuva tuulega. Tabelis kõrvutatakse juhud, kus väljaviske asub konkreetsel kõrgusel mõlemal pool tänavakanjoni seinas. Nii saab hinnata saasteaine kontsentratsioonide levikut juhul, kui väljaviske asub tänavakanjonis nii allatuult kui ka pealetuult fassaadil. Lisaks tuleb samaaegselt vaadelda erinevate tuulekiirustega modelleeritud olukordi (nt tabel L1.1.1 ja L1.1.2 on esitatud sama väljaviske olukord, kahe erineva tuulekiiruse korral).

Sobilikud õhuhaarde asukohad klass 4 õhule on need, kus tabelipaaris on samal kõrgusel ja erinevate tuulesuundade korral tabelilahter roheline. Klass 3 õhule sobilikud õhuhaarde asukohad on need, kus tabelipaaris samal kõrgusel asetsevad lahtrid on rohelised ja/või sinised jne.

Vaadates tabelleid L1.1.1 ja L1.1.2 (väljaviske asukoht fassaadi alumisel kolmandikul, väljaviske juga suunatud risti fassaadiga) ei ole võimalik leida ühegi saasteaine klassi puhul kohta fassaadil, kus ASHRAE soovitude järgi oleks kõikidel juhtudel lahjendustegur piisav, et õhuhaardesse ei satuks saastunud õhku või ebameeldivat lõhna. See tähendab, et tänavakanjoni alumisse osasse ei ole mõistlik heitõhku hoonest juhtida, sest see satub paratamatult kanjonis olevate inimeste viibimistsooni või lähedalasuvatesse õhuhaardesse.

Tabel 3.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,15$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=1$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	1894	0.19	5	0.00	*	0.00	244212
0.06	0.00	*	0.03	29	0.00	*	0.02	51
0.12	0.01	109	0.02	53	0.00	15954	0.04	23
0.18	0.45	2	0.25	4	0.01	68	0.05	19
0.24	0.62	2	0.11	9	0.00	*	0.03	30
0.30	0.41	2	0.04	24	0.00	*	0.02	63
0.36	0.41	2	0.00	*	0.00	*	0.01	173
0.42	0.25	4	0.00	*	0.00	*	0.00	285
0.48	0.10	10	0.00	1723654	0.00	*	0.00	799
0.54	0.09	11	0.00	179179	0.00	*	0.00	1267
0.60	0.16	6	0.00	32756	0.00	45577	0.00	597
0.66	0.21	5	0.00	16479	0.00	23169	0.00	390
0.72	0.19	5	0.00	221	0.00	60445	0.00	310
0.78	0.16	6	0.01	86	0.00	3984	0.00	386
0.84	0.11	9	0.01	68	0.00	739	0.00	587
0.90	0.07	14	0.01	83	0.00	482	0.00	977
0.96	0.02	47	0.01	106	0.00	399	0.00	2362
1.02	0.00	2001193	0.00	*	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Vaadeldes väljavõtte asukohti hoone keskel ja ülemisel kolmandikul on näha, et lahjendustegurid kasvavad ja võimalusi õhuvõtu kohtadeks tekib mõningal määral juurde. Näiteks tabelites L1.3.1 ja L1.3.2 on suhtelisel kõrgusel $z/H=0,6$ lahjendusteguri väärtused piisavalt väikesed, et sinna saaks paigaldada heitõhuklass 3 järgi õhuhaarde.

Tabelites L1.4.1-L1.6.2 on väljatoodud väljaviske olukorrad, kus väljavisatav juga on 45° võrra alla poole suunatud. Selles valimis leidub potentsiaalseid õhuhaarde asukohti ka olukorras, kus väljavise asub suhtelisel kõrgusel $z/H=0,15$. Sarnaselt eelmises lõigus kirjeldatule, satuvad klass 3 ja 4 vastavad madalad lahjendusteguri väärtused fassaadi suhtelisele kõrgusele $z/H=0,6$.

On näha, et olukordades, kus väljavise on 45° nurga all, on lahjendusteguri väärtused suuremad ehk saastunud õhu kontsentratsioon kanjonis on väiksem.

Vaadates modelleerimise tulemusi võib väita, et selleks, et tagada paremat õhukvaliteeti tänavakanjonis ja vältida saastunud õhu tagasi sattumist hoonesse, ei ole mõistlik heitõhku välja visata hoone fassaadi alumiselt kolmandikult.

Modelleeritud tulemustest selgus, et erinevate tuulesuundade ja tuulekiiruste puhul jõuab saastunud heitõhk paratamatult mingil hetkel kõikidesse hoone fassaadi punktidesse. Seetõttu on tänavakanjonis ventilatsiooni õhuvõttude projekteerimisel kaaluda võimalust õhuvõtt paigaldada hoone katusele. Vaadates kõikide tabelite andmeid on näha, et katusele õhuvõtu korral on lahjendustegur sobiv ka klassi 4 omadustega heitõhu korral.

JÄRELDUSED

Teostatud töö tulemusena saab välja tuua järgmised järeldused:

1. Ansys Fluent modelleerimisprogrammi abil on võimalik koostada tänavakanjoni mudel, mis on identne tuuletunnelis füüsiliselt katsetatud mudeliga.
2. Ansys Fluent programmis on võimalik modelleerida õhu voolamist tänavakanjonis, mille abil saab kirjeldada õhu liikumist tänavakanjonis erinevate väljaviske olukordade puhul.
3. Ansys Fluent Student versiooni piirangud seavad ette mudelruumi punktide mahu piirangu, mis takistab väga mahukate arvutusmodelite koostamist.
4. Võrreldes kolme erinevat väljaviske kõrgust fassaadil saab väita, et olukord, kus väljavise asub alumisel fassaadi kolmandikul, jõuab saastunud heitõhk inimeste viibimistsooni.
5. Modelleerimiste tulemustest selgub, et tuule liikumiskiirusel üle kanjoni on oluline mõju heitõhu levimisele ja hajumisele tänavakanjonis. Olukorras, kus tuulekiirus on suurem, muutub üle kanjoni puhuvast tuulest tekkinud pöörise domineerivaks ja saastunud heitõhk liibub hoonete fassaadidele. Olukorras, kus tuulekiirused üle kanjoni on madalamad, on heitõhu väljaviske joa kiirus tuulekiirusega ligilähedane, mistõttu võib saastunud õhk jõuda kanjoni keskosasse. Seega madalamate kiiruste puhul on heitõhu levik laialdasem, ent heitõhu kontsentratsioonid fassaadidel madalamad.
6. Kui heitõhu joa suund on risti fassaadiga, siis suundub saastunud õhk tihti tänavakanjonis oleva pöörise sisemisse osasse, mistõttu jääb see sinna tsirkuleerima. Kui heitõhu joa suund on suunatud 45 kraadi võrra madalamale, siis suundub saastunud õhk tänavakanjonis oleva pöörise välimisse osasse, mistõttu liibub see vastu fassaadi ja liigub inimeste viibimistsooni kanjonis.
7. Modelleerimine kinnitab standardi 906:2018 piirangut, et sõltuvalt lahjendusteguri väärtustest tohib kõrgemat, kui klass 2 väljaviske õhku juhtida vaid katusele.

Käesolevas töös teostatud modelleerimiste ja läbi töötatud teoreetilise materjali alusel võib välja pakkuda täiendavaid uurimussuundi:

- Uurida olukorda, kus tänavakanjoni puhul pole tegemist lõpmata pika kanjoniga, vaid on hoonetel otsad ja vahed, kus tekivad lisaks primaarsele kanjoniga risti voolamise tsirkulatsioonile ka hoone mõlema külje ümber pöörised.
- Samuti võiks vaadelda olukorda, kus hoonete kõrgused tänavakanjoni ühel küljel pole võrdsed.

- Uurida olukorda, kus lisaks hoonete heitõhule on saasteaine emissioonid ka transpordist tulenevalt tänavakanjoni põhjas.
- Uurida olukorda, kus väljaviskeid on tänavakanjonis rohkem kui üks.
- Kui puuduvad Ansys Fluent Student versiooni piirangud, on võimalik modelleerida ka reaalseste suurustega tänavakanjoni.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti saasteainete leviku dünaamikat sõltuvalt heitõhu väljaviste paigutusest siledal fassaadil ning testiti heitõhu väljaviske suuna mõju saasteainete levimisele. Mudelkatsed valideeriti Surrey Ülikoolis asuva EnFlo tuuletunnelis tehtud füüsilisel mudelil tehtud katsetega.

Töös modelleeriti 24 erinevat ventilatsiooni väljaviske olukorda. Käsitleti kuut erinevat väljaviske asukohta, mis asetsesid tänavakanjoni allatuult ja pealetuult fassaadidel. Saasteaine kolded paiknesid fassaadil kolmel erineval kõrgusel – esimesel, teisel ja kolmandal kolmandikul. Igas väljaviske asukohas modelleeriti õhu voolamist kanjonis kahel juhul – kui väljaviske juga on risti fassaadiga ning olukorras, kus väljaviske juga on suunatud 45 kraadi võrra alla poole.

Modelleerimiste tulemustest selgus, et olukord, kus väljaviske asub alumisel fassaadi kolmandikul, jõuab saastunud heitõhk enim inimeste viibimistsooni. Kui väljaviskeava asub hoone fassaadi keskel või ülemisel kolmandikul, siis on inimeste viibimistsoonis madalamad saasteaine kontsentratsioonid. Lisaks selgub, et tuule liikumiskiirusel üle kanjoni on oluline mõju heitõhu levimisele ja hajumisele tänavakanjonis. Suurema tuulekiiruse korral muutub üle kanjoni puhuvast tuulest tekkinud pöörise domineerivaks ja saastunud heitõhk liibub hoonete fassaadidele. Madalamate tuulekiiruste puhul on heitõhu väljaviske joa kiirus tuulekiirusega ligilähedasem, mistõttu võib saastunud õhk jõuda kanjoni keskosasse. Seega on heitõhu levik laialdasem, ent heitõhu kontsentratsioonid fassaadidel madalamad.

Heitõhu joa suunast lähtuvalt leiti, et olukorras, kui joa suund on risti fassaadiga, suundub saastunud õhk tihti tänavakanjonis oleva pöörise sisemisse osasse, mistõttu jääb see sinna tsirkuleerima. Kui heitõhu juga on suunatud 45 kraadi võrra madalamale, suundub saastunud õhk tänavakanjonis oleva pöörise välimisse osasse, mistõttu liibub see vastu fassaadi ja liigub inimeste viibimistsooni kanjonis.

Vaadeldes lahjendustegureid fassaadi vahetus läheduses selgus, et arvestades standardi EVS 906:2018 ja ASHRAE soovitusi, ei tohiks heitõhuklass 3 ja 4 omadustega väljaviskeõhku fassaadilt välja suunata, kui seal paikneb ka ventilatsiooni õhuhaare. Paraku ei ole see alati võimalik, kuna tihti, eriti kortermajade puhul, asuvad korteripõhised õhuvõtu- ja heitavad iga korteri fassaadil.

Lõputöö lähteülesandega püstitatud töö eesmärgid on täidetud ning töös on antud ka soovitusi edaspidisteks uuringuteks.

SUMMARY

The thesis studied the location dependent pollutant dispersion from exhaust air outlets on a smooth façade. In addition, the effect of exhaust air discharge direction on the distribution of pollutants was investigated. The model tests were validated by tests performed on a physical model in the EnFlo wind tunnel at the University of Surrey.

In the study 24 different ventilation exhaust situations were modelled. Six different discharge locations were considered, located on the windward and leeward façades of the street canyon. The exhaust air discharges were located on the façade at three different heights – on the first, second and third thirds. At each discharge location, air flow was modelled in two cases – first, when the discharge jet is perpendicular to the façade and secondly, in a situation where the discharge jet is directed 45 degrees downwards.

The results of the modelling showed that the situation where the discharge is located in the lower third of the façade, the polluted exhaust air reaches the human occupied zone. On the other hand, when the outlet is located in the middle of the façade or on the upper third of the building, there will be lower concentrations of polluted air in the human occupied zone. In addition, it appears that the windspeed across the canyon has a significant effect on the distribution and dispersion of exhaust air in the street canyon. At higher wind speeds, the vortex created by the wind blowing over the canyon becomes dominant and the polluted exhaust air adheres to the façades of the buildings. At lower wind speeds, the exhaust air jet speed is in the same order of magnitude to the wind speed, which can cause contaminated air to reach the centre of the canyon. Thus, the distribution of exhaust air is wider, but the concentrations of exhaust air on the facades are lower.

Based on the direction of the exhaust jet, it was found that in a situation where the direction of the jet is perpendicular to the façade, the polluted air often reaches to the inner part of the vortex of the street canyon, and remains circulating there. When the exhaust jet is directed 45 degrees downwards, the polluted air travels to the outer part of the vortex in the street canyon, where it adheres to the façade and moves to the human occupied zone of the canyon.

Examination of the dilution factors in the immediate vicinity of the façade revealed that, taking into account the recommendations of EVS 906:2018 and ASHRAE, class 3 and 4 exhaust air should not be directed out of the façade, if there is a ventilation air intake. Unfortunately, this is not always possible, especially in the case of apartment buildings,

where the ventilation is apartment-based and air intakes and exhausts are located on the façade of each apartment.

The objectives of the thesis have been met and recommendations for further research have been given in the thesis.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] K. Ahmad, M. Khare, and K. K. Chaudhry, "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - A review," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 93, no. 9, pp. 697–717, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jweia.2005.04.002.
- [2] C. Gromke and B. Ruck, "Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon-Experimental investigation of the flow and concentration field," *Atmos. Environ.*, 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.043.
- [3] C. Gromke, R. Buccolieri, S. Di Sabatino, and B. Ruck, "Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations - Evaluation of CFD data with experimental data," *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 37, pp. 8640–8650, 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.019.
- [4] S. Vardoulakis, B. E. A. Fisher, K. Pericleous, and N. Gonzalez-Flesca, "Modelling air quality in street canyons: A review," *Atmos. Environ.*, vol. 37, no. 2, pp. 155–182, Jan. 2003, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00857-9.
- [5] K. Ahmad, M. Khare, and K. K. Chaudhry, "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections-a review," 2005, doi: 10.1016/j.jweia.2005.04.002.
- [6] N. Reiminger, J. Vazquez, N. Blond, M. Dufresne, and J. Wertel, "CFD evaluation of mean pollutant concentration variations in step-down street canyons," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 196, no. November, 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2019.104032.
- [7] D. Cui, X. Li, Y. Du, C. M. Mak, and K. Kwok, "Effects of envelope features on wind flow and pollutant exposure in street canyons," *Build. Environ.*, vol. 176, no. April, p. 106862, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106862.
- [8] H. Liu, X. Xiong, M. Jin, and L. Shi, "Investigation of air flow and pollutant dispersion in street canyon," *E3S Web Conf.*, vol. 136, pp. 3–7, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201913605002.
- [9] D. Marucci and M. Carpentieri, "Dispersion in an array of buildings in stable and convective atmospheric conditions," *Atmos. Environ.*, vol. 222, p. 117100, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117100.

- [10] S. E. Nicholson, "A pollution model for street-level air," *Atmos. Environ.*, vol. 9, no. 1, pp. 19–31, Jan. 1975, doi: 10.1016/0004-6981(75)90051-7.
- [11] A. W. M. Yazid, nor A. C. Sidik, S. M. Salim, and K. M. Saqr, "A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies," *Simulation*, vol. 90, no. 8, pp. 892–916, 2014, doi: 10.1177/0037549714528046.
- [12] A. W. M. Yazid, nor A. C. Sidik, S. M. Salim, and K. M. Saqr, "A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies," *Simulation*, vol. 90, no. 8, pp. 892–916, 2014, doi: 10.1177/0037549714528046.
- [13] J. Zhong, "Modelling air pollution within a street canyon," no. September, p. 255, 2016, [Online]. Available: <http://etheses.bham.ac.uk/6491/>.
- [14] J. F. B. Multu Sumer, *Hydrodynamics around cylindrical structures*. 1997.
- [15] H. Mayer, "Mayer: Cities," *Atmos. Environ.*, vol. 33, no. 24, pp. 4029–4037, 1999.
- [16] T. Meier, "Välisseinal paiknevate ventilatsiooni õhuvõtu- ja väljaviske elementide minimaalse vahekauguse määramine," 2020.
- [17] D. Marucci and M. Carpentieri, "Effect of local and upwind stratification on flow and dispersion inside and above a bi-dimensional street canyon," *Build. Environ.*, vol. 156, no. November 2018, pp. 74–88, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.013.
- [18] D. C. Marucci, "Enflo windtunnel experiments on street-canyon," 2019.
- [19] A. McNabola, B. M. Broderick, and L. W. Gill, "A numerical investigation of the impact of low boundary walls on pedestrian exposure to air pollutants in urban street canyons," *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 2, pp. 760–769, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.036.
- [20] A. Walton and A. Y. S. Cheng, "Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon - Part II: Idealised canyon simulation," *Atmos. Environ.*, vol. 36, no. 22, pp. 3615–3627, Aug. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00260-1.
- [21] A. Walton, A. Y. S. Cheng, and W. C. Yeung, "Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon - Part I: Comparison with field data,"

- Atmos. Environ.*, vol. 36, no. 22, pp. 3601–3613, Aug. 2002, doi:
10.1016/S1352-2310(02)00259-5.
- [22] "Ansys Fluent Guide." .
- [23] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, 7th editio. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1979.
- [24] Y. . Cengel and J. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd editio. McGraw-Hill Education, 2013.
- [25] "Carpentieri, Matteo; Marucci, Davide; Hayden, Paul (2019): Local and incoming stratification. figshare. Dataset.
[https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7804454.v2.](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7804454.v2)"
- [26] S. Hanna and J. Chang, "Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation," *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 116, no. 3–4, pp. 133–146, 2012, doi: 10.1007/s00703-011-0177-1.
- [27] R. L. Petersen, J. Ritter, A. Bova, and J. Carter, "Simplified procedure for calculation exhaust/intake Shaping Tomorrow ' s Built Environment Today," 2016.

LISAD

Lisa 1 – lahjendustegurid potentsiaalsete sissepuhkeavade leidmiseks fassaadil

Tabel L1.1.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,15$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=1$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	1894	0.19	5	0.00	*	0.00	244212
0.06	0.00	*	0.03	29	0.00	*	0.02	51
0.12	0.01	109	0.02	53	0.00	15954	0.04	23
0.18	0.45	2	0.25	4	0.01	68	0.05	19
0.24	0.62	2	0.11	9	0.00	*	0.03	30
0.30	0.41	2	0.04	24	0.00	*	0.02	63
0.36	0.41	2	0.00	*	0.00	*	0.01	173
0.42	0.25	4	0.00	*	0.00	*	0.00	285
0.48	0.10	10	0.00	1723654	0.00	*	0.00	799
0.54	0.09	11	0.00	179179	0.00	*	0.00	1267
0.60	0.16	6	0.00	32756	0.00	45577	0.00	597
0.66	0.21	5	0.00	16479	0.00	23169	0.00	390
0.72	0.19	5	0.00	221	0.00	60445	0.00	310
0.78	0.16	6	0.01	86	0.00	3984	0.00	386
0.84	0.11	9	0.01	68	0.00	739	0.00	587
0.90	0.07	14	0.01	83	0.00	482	0.00	977
0.96	0.02	47	0.01	106	0.00	399	0.00	2362
1.02	0.00	2001193	0.00	*	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.1.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus z/H=0,15; joa suund 0°; U/U_{ref}=2,3

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.19	5	0.40	2	0.00	*	0.00	32287
0.06	0.03	29	0.49	2	0.00	*	0.00	210
0.12	0.02	53	0.55	2	0.00	*	0.01	92
0.18	0.25	4	0.60	2	0.01	82	0.01	82
0.24	0.11	9	0.62	2	0.00	*	0.01	151
0.30	0.04	24	0.62	2	0.00	*	0.00	217
0.36	0.00	*	0.59	2	0.00	*	0.00	271
0.42	0.00	*	0.57	2	0.00	239	0.00	460
0.48	0.00	1723654	0.54	2	0.01	135	0.00	1532
0.54	0.00	179179	0.54	2	0.00	317	0.00	140718
0.60	0.00	32756	0.53	2	0.00	1358	0.00	51126
0.66	0.00	16479	0.49	2	0.00	11424	0.00	31238
0.72	0.00	221	0.43	2	0.00	29719	0.00	23600
0.78	0.01	86	0.38	3	0.00	11941	0.00	236
0.84	0.01	68	0.30	3	0.00	3895	0.01	88
0.90	0.01	83	0.22	5	0.00	3928	0.02	48
0.96	0.01	106	0.15	7	0.00	7682	0.03	32
1.02	0.00	*	0.05	19	0.01	67	0.05	19

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.2.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,5$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=1$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	*	0.00	*	0.00	273	0.00	273
0.06	0.00	*	0.00	*	0.00	1207	0.40	2
0.12	0.00	*	0.00	*	0.00	394	0.34	3
0.18	0.00	*	0.00	*	0.00	470	0.28	4
0.24	0.00	*	0.00	*	0.00	292	0.18	6
0.30	0.00	*	0.00	*	0.00	373	0.08	12
0.36	0.00	*	0.00	*	0.01	160	0.03	34
0.42	0.00	*	0.00	*	0.08	13	0.02	48
0.48	0.79	1	0.00	*	0.99	1	0.01	99
0.54	0.00	*	0.00	*	0.11	9	0.00	*
0.60	0.00	*	0.00	*	0.01	89	0.00	36091702
0.66	0.00	*	0.00	*	0.07	14	0.00	18645028
0.72	0.00	*	0.00	*	0.05	21	0.00	15194336
0.78	0.00	*	0.00	*	0.08	13	0.00	17608517
0.84	0.00	*	0.00	*	0.06	17	0.00	20934824
0.90	0.00	*	0.00	*	0.03	33	0.00	32627066
0.96	0.00	*	0.00	*	0.03	36	0.00	79237419
1.02	0.00	2010972	0.00	*	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.2.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,5$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=2,3$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	*	0.02	65	0.20	5	0.47	2
0.06	0.00	*	0.00	257	0.49	2	0.41	2
0.12	0.00	*	0.00	546	0.50	2	0.35	3
0.18	0.00	493	0.00	*	0.60	2	0.29	3
0.24	0.03	37	0.00	*	0.67	1	0.18	6
0.30	0.09	11	0.00	*	0.69	1	0.06	16
0.36	0.12	9	0.00	*	0.76	1	0.02	42
0.42	0.12	8	0.00	*	0.74	1	0.02	59
0.48	0.82	1	0.00	*	1.00	1	0.01	110
0.54	0.00	126489	0.00	*	0.87	1	0.00	516
0.60	0.07	14	0.00	*	0.50	2	0.00	685
0.66	0.34	3	0.00	*	0.24	4	0.00	1020
0.72	0.46	2	0.00	*	0.14	7	0.00	1347
0.78	0.20	5	0.00	*	0.39	3	0.00	722
0.84	0.04	25	0.00	*	0.54	2	0.00	493
0.90	0.01	112	0.00	*	0.45	2	0.00	682
0.96	0.01	173	0.00	*	0.28	4	0.00	1296
1.02	0.00	*	0.00	*	0.04	28	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.3.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,8$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=1$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	*	0.00	*	0.00	1469	0.00	1775
0.06	0.00	*	0.00	*	0.01	196	0.02	53
0.12	0.00	*	0.00	*	0.01	94	0.04	25
0.18	0.00	*	0.00	*	0.03	33	0.06	17
0.24	0.00	*	0.00	*	0.06	17	0.07	14
0.30	0.00	*	0.00	*	0.07	14	0.09	11
0.36	0.00	*	0.00	*	0.07	14	0.10	10
0.42	0.00	1538121	0.00	*	0.06	17	0.10	10
0.48	0.00	1855	0.00	*	0.04	27	0.10	10
0.54	0.00	791	0.00	*	0.01	78	0.08	13
0.60	0.00	*	0.00	*	0.00	3218	0.05	22
0.66	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.01	68
0.72	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.01	112
0.78	0.73	1	0.00	*	0.83	1	0.00	229
0.84	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.00	4181703
0.90	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.00	6224635
0.96	0.00	*	0.00	*	0.00	229	0.00	12170306
1.02	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.3.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,8$; joa suund 0° ; $U/U_{ref}=2,3$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	1802708	0.00	823	0.59	2	0.00	114733
0.06	0.00	47665	0.00	*	0.41	2	0.03	36
0.12	0.00	406478	0.00	*	0.25	4	0.06	16
0.18	0.00	2148777	0.00	*	0.14	7	0.08	12
0.24	0.00	44340196	0.00	*	0.08	13	0.08	13
0.30	0.00	676	0.00	*	0.09	11	0.07	13
0.36	0.00	336	0.00	*	0.14	7	0.05	20
0.42	0.00	335	0.00	*	0.29	3	0.03	34
0.48	0.01	192	0.00	*	0.34	3	0.01	119
0.54	0.01	123	0.00	*	0.19	5	0.00	381
0.60	0.00	608	0.00	*	0.04	24	0.00	474
0.66	0.00	*	0.00	*	0.37	3	0.00	626
0.72	0.10	10	0.00	*	0.92	1	0.01	162
0.78	1.00	1	0.00	*	0.99	1	0.01	86
0.84	0.00	*	0.00	*	0.65	2	0.02	60
0.90	0.29	3	0.00	*	0.54	2	0.01	82
0.96	0.71	1	0.00	*	0.57	2	0.01	131
1.02	0.00	*	0.00	*	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.4.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus z/H=0,15; joa suund 45°; U/U_{ref}=1

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.02	62	0.58	2	0.00	*	0.22	4
0.06	0.00	11547	0.46	2	0.00	*	0.19	5
0.12	0.03	29	0.29	3	0.04	26	0.12	8
0.18	0.00	*	0.16	6	0.03	39	0.06	15
0.24	0.02	57	0.12	9	0.00	*	0.03	37
0.30	0.00	*	0.07	14	0.00	*	0.01	190
0.36	0.00	*	0.05	20	0.00	*	0.00	427
0.42	0.00	*	0.05	18	0.00	*	0.00	726
0.48	0.00	*	0.07	14	0.00	*	0.00	2417
0.54	0.00	*	0.05	19	0.00	*	0.00	7906
0.60	0.00	*	0.04	28	0.00	*	0.00	2872
0.66	0.00	*	0.10	10	0.00	*	0.00	1755
0.72	0.00	*	0.16	6	0.00	*	0.00	1337
0.78	0.00	*	0.22	4	0.00	*	0.00	824
0.84	0.00	34197	0.17	6	0.00	*	0.00	596
0.90	0.00	84673	0.14	7	0.00	*	0.01	190
0.96	0.00	133267	0.11	9	0.00	*	0.00	2495
1.02	0.00	*	0.04	23	0.00	*	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.4.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus z/H=0,15; joa suund 45°; U/U_{ref}=2,3

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.04	25	0.34	3	0.00	*	0.00	3233232
0.06	0.01	144	0.35	3	0.00	*	0.00	256
0.12	0.03	29	0.34	3	0.03	40	0.01	112
0.18	0.00	*	0.32	3	0.00	*	0.01	108
0.24	0.09	11	0.27	4	0.00	*	0.00	342
0.30	0.00	*	0.22	5	0.00	152189	0.00	*
0.36	0.00	*	0.18	6	0.01	119	0.00	*
0.42	0.00	*	0.16	6	0.04	26	0.00	*
0.48	0.00	*	0.15	7	0.06	18	0.00	*
0.54	0.00	*	0.09	11	0.07	15	0.00	*
0.60	0.00	*	0.03	32	0.06	17	0.00	*
0.66	0.00	16601699	0.01	68	0.04	28	0.00	*
0.72	0.00	13392977	0.02	46	0.02	66	0.00	*
0.78	0.00	*	0.03	35	0.01	164	0.00	*
0.84	0.00	*	0.04	24	0.02	56	0.00	*
0.90	0.00	*	0.03	34	0.02	53	0.00	*
0.96	0.00	*	0.02	55	0.01	84	0.00	*
1.02	0.00	*	0.00	274	0.08	13	0.00	*

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.5.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus z/H=0,5; joa suund 45°; U/U_{ref}=1

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Möötepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	*	0.00	*	0.00	290	0.02	60
0.06	0.00	*	0.00	19618	0.00	*	0.05	19
0.12	0.00	*	0.00	8631	0.00	*	0.10	10
0.18	0.00	*	0.00	5648	0.00	*	0.14	7
0.24	0.00	*	0.00	4809	0.00	*	0.10	10
0.30	0.00	*	0.00	4187	0.00	*	0.07	15
0.36	0.00	*	0.00	625	0.00	*	0.06	16
0.42	0.17	6	0.01	152	0.14	7	0.04	23
0.48	0.95	1	0.01	87	1.00	1	0.02	47
0.54	0.08	13	0.02	66	0.00	384	0.00	395266
0.60	0.25	4	0.02	63	0.00	11994	0.00	628397
0.66	0.68	1	0.02	60	0.09	12	0.00	1531947
0.72	0.31	3	0.01	72	0.04	27	0.00	770648
0.78	0.06	16	0.01	123	0.05	21	0.00	255788
0.84	0.01	151	0.00	410	0.05	19	0.00	153342
0.90	0.04	28	0.00	819	0.05	21	0.00	6979
0.96	0.02	46	0.00	1974	0.03	32	0.00	3388
1.02	0.00	*	0.00	1511	0.01	100	0.00	147031

* Iõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.5.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus z/H=0,5; joa suund 45°; U/U_{ref}=2,3

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.01	159	0.00	*	0.00	224	0.45	2
0.06	0.00	*	0.00	*	0.08	12	0.39	3
0.12	0.00	*	0.00	*	0.13	8	0.33	3
0.18	0.00	17895	0.00	51375	0.14	7	0.27	4
0.24	0.00	1496	0.00	5028	0.13	8	0.16	6
0.30	0.01	94	0.00	2643	0.35	3	0.05	21
0.36	0.08	12	0.00	2001	0.69	1	0.01	75
0.42	0.08	13	0.00	1706	0.69	1	0.01	93
0.48	0.99	1	0.00	1597	0.97	1	0.01	116
0.54	0.00	*	0.00	1124	0.97	1	0.01	153
0.60	0.00	*	0.00	563	0.60	2	0.00	264
0.66	0.00	*	0.00	376	0.16	6	0.00	965
0.72	0.00	*	0.00	280	0.14	7	0.00	569
0.78	0.00	*	0.00	220	0.14	7	0.01	142
0.84	0.00	*	0.01	182	0.15	7	0.01	81
0.90	0.00	*	0.00	272	0.14	7	0.04	23
0.96	0.00	*	0.00	652	0.13	8	0.08	13
1.02	0.00	*	0.00	1169	0.05	19	0.01	79

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.6.1 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,8$; joa suund 45° ; $U/U_{ref}=1$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	427	0.01	163	0.00	*	0.00	8776395
0.06	0.00	8138	0.01	176	0.00	8956	0.01	95
0.12	0.00	16854	0.00	274	0.00	4244	0.02	43
0.18	0.00	1593	0.00	353	0.00	253	0.03	30
0.24	0.00	682	0.00	456	0.01	95	0.04	25
0.30	0.00	455	0.00	929	0.02	48	0.05	20
0.36	0.00	327	0.00	8095	0.03	36	0.03	30
0.42	0.00	361	0.00	15103	0.02	53	0.02	50
0.48	0.00	840	0.00	*	0.01	156	0.01	141
0.54	0.00	2769	0.00	*	0.00	2081	0.00	348
0.60	0.00	9947	0.00	*	0.00	*	0.00	624
0.66	0.00	*	0.00	*	0.00	698	0.00	2988
0.72	0.00	*	0.00	*	0.06	17	0.00	3184
0.78	0.00	2283449	0.94	1	0.93	1	0.00	2570
0.84	0.00	1009705	0.00	*	0.00	*	0.00	2192
0.90	0.00	902234	0.00	*	0.00	*	0.00	3374
0.96	0.00	1151243	0.00	*	0.00	5888	0.00	7326
1.02	0.00	3298958	0.00	*	0.00	*	0.00	523

* lõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule

Tabel L1.6.2 Väljaviske olukord: Suhteline kõrgus $z/H=0,8$; joa suund 45° ; $U/U_{ref}=2,3$

Olukord	Tuulesuund 0°				Tuulesuund 180°			
	Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad		Parempoolne fassaad		Vasakpoolne fassaad	
Kontsentratsioon C väljaviske ava ees:	1.00		1.00		1.00		1.00	
Mõõtepunkti kõrgus z/H	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF	Kontsentratsioon C [%]	Lahjendustegur DF
0.00	0.00	8353	0.00	257	0.18	6	0.02	55
0.06	0.00	616	0.00	806	0.11	9	0.04	23
0.12	0.00	840	0.00	2647	0.05	21	0.07	15
0.18	0.00	245	0.00	*	0.01	80	0.07	14
0.24	0.01	130	0.00	*	0.00	730	0.04	25
0.30	0.08	12	0.00	*	0.00	1279	0.02	50
0.36	0.17	6	0.00	*	0.00	238	0.01	82
0.42	0.20	5	0.00	*	0.02	56	0.01	148
0.48	0.19	5	0.00	*	0.06	18	0.00	735
0.54	0.00	*	0.00	*	0.06	17	0.00	67246
0.60	0.15	7	0.00	*	0.01	88	0.00	29807
0.66	0.22	5	0.00	*	0.00	1550	0.00	19147
0.72	0.58	2	0.00	*	0.47	2	0.00	3475
0.78	1.00	1	0.00	9587820	0.91	1	0.00	1765
0.84	0.00	*	0.00	3001642	0.39	3	0.00	1189
0.90	0.00	320	0.00	2370157	0.32	3	0.00	1013
0.96	0.01	118	0.00	4936565	0.29	3	0.00	882
1.02	0.00	*	0.00	268496	0.00	*	0.00	*

* Iõpmata suur suurus

Ebasobiv sissepuhke asukoht
Asukoht sobib ASHRAE 1 klass õhule
Asukoht sobib ASHRAE 2 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 3 klass (ja madalam) õhule
Asukoht sobib ASHRAE 4 klass (ja madalam) õhule