



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**VÄLISSEINAL PAIKNEVATE VENTILATSIOONI  
HEITÕHU VÄLJAVISETE TOIMIVUSE  
MODELLEERIMINE**

**MODELING OF EXTERNAL WALL MOUNTED  
VENTILATION EXHAUST AIR OUTLETS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anastassia Kutšerova  
/nimi/

Üliõpilaskood 165157EAKI

Juhendaja: Ülar Palmiste, doktorant  
/nimi, amet/

*(Tiitellehe pöördel)*

## **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.

16. mai 2021. a

Autor: allkirjastatud digitaalselt

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatud nõuetele

16. mai 2021. a

Juhendaja: allkirjastatud digitaalselt

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Anastassia Kutšerova (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 29.12.1997),

1. annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
Välisseinal paiknevate ventilatsiooni heitõhu väljavisete toimivuse modelleerimine,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Ülar Palmiste,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonilise 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.

---

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

allkirjastatud digitaalselt (*allkiri*)

16.05.2021 (*kuupäev*)

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Anastassia Kutšerova, 165157EAKI (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: EAKI02/15 Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)  
Juhendaja(d): doktorant Ülar Palmiste, (+372) 58133340 (amet, nimi, telefon)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Välisseinal paiknevate ventilatsiooni heitõhu väljavisete toimivuse modelleerimine

(inglise keeles) Modeling of external wall mounted ventilation exhaust air outlets

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Välisseinal paiknevate ventilatsiooni heitõhu väljaviskeavade simulatsioonimudelite koostamine ja valideerimine
2. Uurida erinevate heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele
3. Uurida erinevate tuuletingimuste mõju saasteainete hajumisele

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade	14.02.2021
2.	Tutvumine tarkvaraga ANSYS Workbench	21.02.2021
3.	Esimese väljaviskeelemendi mudeli koostamine ja valideerimine	14.03.2021
4.	Teise väljaviskeelemendi mudeli koostamine ja valideerimine	08.04.2021
5.	Simulatsioonarvutuste tegemine ning tulemuste analüüs	25.04.2021
6.	Lõputöö vormistamine	15.05.2021

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "17" mai 2021a

**Üliõpilane:** Anastassia Kutšerova allkirjastatud digitaalsel "16" mai 2021a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu.....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	8
1.1 Saasteaine levimine ümber hoone.....	8
1.2 Ülevaade ventilatsioonistandarditest.....	10
1.3 Seinapealsed heitõhuseadmed .....	13
1.4 Saasteainete leviku modelleerimine.....	14
1.5 Tarkvara ANSYS.....	15
2 MEETODID .....	17
2.1 Geomeetria defineerimine .....	17
2.2 Arvutusvõrgu loomine.....	19
2.3 Mudeli seadistamine .....	21
2.4 Simulatsioonarvutus.....	23
2.5 Tulemuste analüüs .....	23
2.6 Mudeli valideerimine.....	23
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	26
3.1 EX1 mudeli valideerimine .....	26
3.2 EX2 mudeli valideerimine .....	31
3.3 EX1 heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele .....	37
3.4 EX2 heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele .....	39
3.5 EX1 otsetuule mõju saasteainete hajumisele .....	41
3.6 EX2 otsetuule mõju saasteainete hajumisele .....	42
3.7 EX1 külgtuule mõju saasteainete hajumisele .....	44
3.8 EX2 külgtuule mõju saasteainete hajumisele .....	46
KOKKUVÕTE .....	48
SUMMARY.....	50
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	52

## Lühendite ja tähiste loetelu

CFD – *Computational Fluid Dynamics*- Arvutuslik vedeliku dünaamika

EX1 – väljaviskeelement NPC160

EX2 – väljaviskeelement USSV160

EVS – Eesti Vabariigi standardid

FB - *Fractional bias* – murdosaline nihe

NMSE - *Normalized mean-square error* – normaliseeritud keskmine ruutviga

FAC2 - *The fraction of predictions within a factor of two of observations* – prognooside murd kahe vaatluse teguri piires

## SISSEJUHATUS

Ventilatsiooni heitõhk võib sisaldada erinevaid saasteaineid ja ebameeldivaid lõhnu, mille kontsentratsioon on suurem kui välisõhus. Projekteerimisel on oluline pöörata tähelepanu ventilatsiooni õhuvõtu ja heitõhu väljaviskeava paigutusele, et vältida heitõhu saasteainete sattumist õhu õhuvõtuavasse või inimeste viibimistsooni hoone ümbruses. Väljaviskeelementidel on erinev ehitus ja see mõjutab heitõhuvoolu hajumist väliskeskkonnas. Võib tekkida oht, et saastunud õhk jõuab hoonesse ventilatsiooni õhuvõtu ja muude avade kaudu tagasi.

Käesolevas lõputöös modelleeritakse kaks väljaviskeelementi ja loodud mudeleid kasutatakse simulatsioonarvutuste tegemiseks, et testida erinevate tegurite mõju heitõhu väljaviskejoas olevate saasteainete hajumisele. Uuritavate heitõhuelementide valik on tehtud seoses varem tehtud eksperimendiga. Tauno Meieri lõputöö „Välisseinal paiknevate ventilatsiooni õhuvõtu- ja väljaviske elementide minimaalse vahekauguse määramine“ eksperimendi mõõtetulemusi kasutati käesolevas lõputöös väljatöötatud CFD-mudelite valideerimiseks. Meieri töös on mõningaid lihtsustusi: tema töö raames keskendutakse ainult välisseinal teineteise suhtes ühel kõrgusel paiknevate õhuvõtu- ja väljaviskeelementide arvutusmetoodikate uurimisele, mille väljavisketemperatuur mõõtmiste ajal oli sama ruumi temperatuuriga.

Lõputöö eesmärk on:

- välisseinal paikneva heitõhu väljaviskeseadme detailse CFD-mudeli koostamine ja valideerimine
- erinevate saasteainete hajumist mõjutavate tegurite analüüsimine

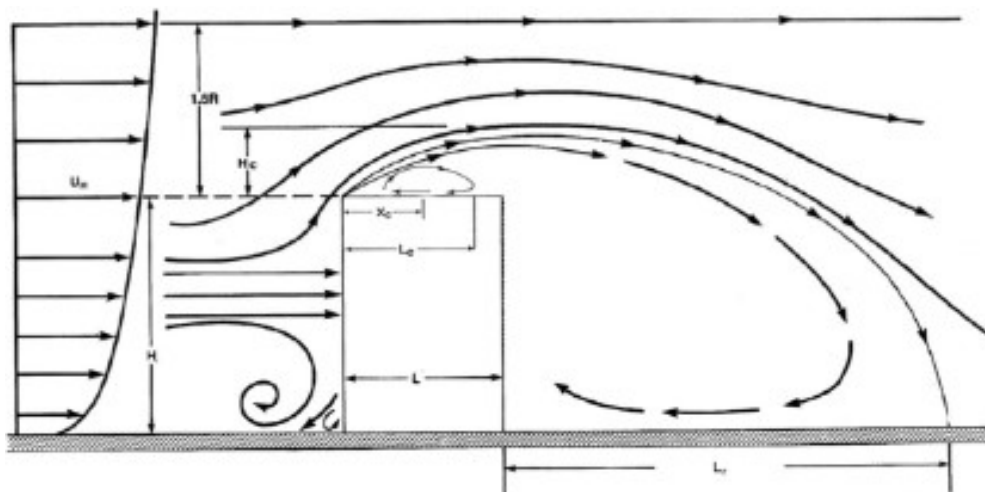
CFD-mudeli valideerimisel kasutati nii kvalitatiivset kui ka kvantitatiivset lähenemist. Käesolevas töös võrreldakse valideerimise käigus erinevaid  $k-\epsilon$  turbulentsi mudeleid ning valitakse edasiseks tegurite mõju uurimiseks neist kõige täpsem.

Lõputöö mudeleid simuleeritakse tarkvaras ANSYS Workbench. ANSYS koosneb erinevatest tarkvaradest ja heitõhu hajumise modelleerimiseks kasutatakse Fluent-simulatsiooni.

# 1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Saasteaine levimine ümber hoone

Saasteaine hajumine atmosfääris sõltub erinevatest faktoritest, nagu saasteaine keemilised omadused, maapinna reljeef, meteoroloogilised tingimused ja saasteallika parameetrid. Kõikide mõjutegurite samaaegne arvesse võtmine CFD simulatsiooniarvutuses on keeruline ülesanne. Tuul on oluline meteoroloogiline parameeter, mis mõjutab suuresti saasteainete hajumist ümber hoone. Joonisel 1.1 on näidatud risti hoonega puhuva tuule põhjustatud õhu liikumise dünaamika ümber hoone. [1]

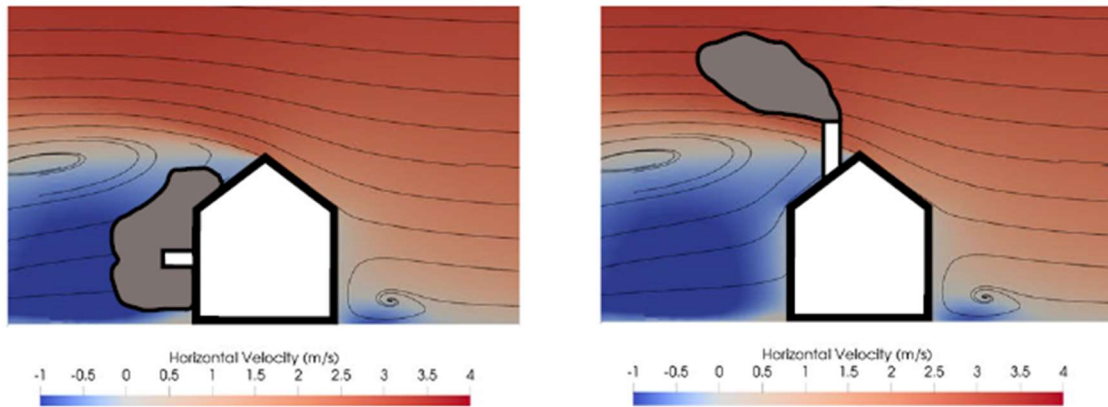


Joonis 1.1 Õhuvoolu liikumine ümber hoone [1]

Väljaviskeelemendi katusele paigaldamine aitab vältida saasteaine taassisenemist hoonesse läbi ventilatsiooni õhuvõtuavade või muude avade. Joonisel 1.2 on näha, kuidas katusele paigaldatud väljaviskeelement on seinale paigaldatud elemendist efektiivsem. Teatud juhtudel tekib vajadus lahendada heitõhu väljavise seinale paigaldatavate väljaviskeseadmetega. Horisontaalne ventilatsiooni kasutamine katuse ventilatsiooni asemel lihtsustaks ventilatsioonikanaleid ja on lihtsaim variant vanade majade renoveerimiseks, aga sellega kaasneb potentsiaalselt suurem risk heitõhu taassisenemiseks hoonesse. Kui õhuvool liigub väljaviskeava vastu, siis sellises olukorras tekib suur saasteaine kontsentratsioon õhuvõtuava juures. Õhuvoolu vastasliikumisel liigub heitõhk õhuvõtuavast eemale ja saasteaine kontsentratsioon väheneb. [2] [3]



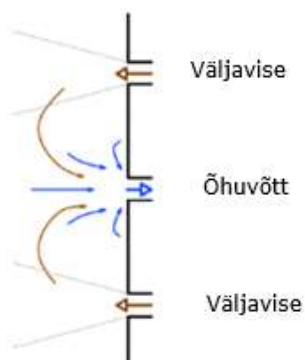
On olemas erinevaid kirjeldusi ja soovitusi, kuidas paigaldada elemendid horisontaalsele seinale. Aga tugevaim mõju heitõhu hajumisele on õhuvoolu turbulentsusel ja sellel, kuidas õhuvool on ümber hoone suunatud. [3]



Joonis 1.2. CFD-simulatsiooni abil kujutatud tuule voolujooned ümber hoone ja saasteainete hajumine sienal ja katusel paiknevast väljaviskest [4]

Heitõhk väljub välisseinal paiknevast väljaviskeseadmest turnulentse joana. Alguses liigub heitõhu juga seinapinna suhtes otse, kuid aeglustub ja hajub, kuna juga järkjärgult seguneb välisõhuga.

Päikeselistel päevadel võib tekkida situatsioon, kus päikesekiirgus soojendab hoone fassaadi ja hoone pinnatemperatuur tõuseb. Sellel olukorras tekitatakse konvektiivne vool suunaga üles. Sellised turbulentsed õhuvoolud mõjutavad, kuidas heitõhk sellises olukorras hajub. Joonisel 1.4 on näidatud horisontaalne väljavise ja õhuvõtuavade paiknemine, kuidas võib tekkida retsirkulatsioon nende vahel. [5]



Joonis 1.3 Skemaatiline joonis re-entrainment [5]

Kui tuul puudub ning temperatuuri erinevus väliskeskkonna ja heitõhu vahel ka puudub, siis on heitõhuvoolu suund otseselt proportsionaalne heitgaasi kiiruse, voolu ja väljaviskeelemendi nurgaga. Heitõhuvoolu suund on tihedalt seotud väljaviskeelemendi nurgaga välisseinal. Tavaliselt on väljaviskeelemendi nurk vahemikus 10 kuni 90 kraadi

seinapinna suhtes. Kui väljaviskeelemendil on 0–45-kraadine nurk horisontaaltasapinnast allapoole, võimaldab see heitõhu saasteainetel tõhusamalt hoone seinast eemale hajuda. Kui elemendi nurk on 60–90 kraadi horisontaaltasapinnast allapoole tekib seinaga juures saasteaine suhteliselt kõrge kontsentratsioon. Mida lähemale saasteained seinapinnale jäävad, seda rohkem jõuavad need tõenäoliselt õhuvõtuava juurde. [6] [7]

Tegurid, nagu tuul ja väljaviske elemendi nurk, on põhikomponendid, mis määravad, kui kaugel seinast saasteained hajuvad. Kui suurendada heitõhu kiirust 25%, hajub saastunud õhk kiiremini ja seinast kaugemale. Suurem kiirus võimaldab tuulel saasteaineid kiiremini hajutada, et vältida saasteinete sattumist hoonesse. [6]

On oluline mõelda milline konkreetne väljaviskerest paigaldada ja kuhu suunata väljaviskeõhu vool. Hoones, kus ei ole ainult üks õhuvõtu- ja väljaviskeelement, on vaja leida võimalus rajada väljaviskeelemendid hoone katusele või suunata väljaviskeõhu vool õhuvõtust eemale. [4]

## 1.2 Ülevaade ventilatsioonistandarditest

Ventilatsiooni heitõhu väljaviske projekteerimine sõltub suuresti heitõhus sisalduvatest saasteainetest. Tihti on saasteainete kompositsioon seotud otseselt hoonetes toimivate tegevuste ja protsessidega. Heitõhu väljaviske ja välisõhu sissevõtu paigutamiseks kasutatakse projekteerimisel heitõhu klassifikatsiooni süsteemi. Standardis EVS-EN 13779:2007 on kirjeldatud nelja heitõhu kategooriat ja nendega seotud ruumide tüüpe. Heitõhu klassifikatsioon on toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Heitõhu klassifikatsioon [8]

Kategooria	Õhu kirjeldus	Ruumi tüüp
EHA 1	Madal saasteainete kontsentratsioon peamiselt ehitusmaterjalidest, konstruktsioonidest ja inimestest. Ruum, kus suitsetamine on lubatud, on välistatud.	Kontor ja integreeritud väike panipaik, klassiruum, trepikoda, koridorid.
EHA 2	Keskmine saasteainete kontsentratsioon peamiselt ehitusmaterjalidest ja inimestest. Ruum, mis muidu on EHA1, kuid kus suitsetamine on lubatud.	Söögituba, köögid kuumade jookide valmistamiseks, hotellituba, riietusruum, liftiseadmete ruum.
EHA 3	Märkimisväärne saasteainete kontsentratsioon protsessidest, mis eraldavad niiskust või kemikaali. Õhu kvaliteet oluliselt halveneb.	WC, pesuruum, saun, köögid, printeriruum, suitsuruum, ilma rasvaeralduseta köögid ja elamute köögid.

Tabel 1.1 järg

EHA 4	Suur saasteainete kontsentratsioon, tervisele kahjulikke lõhnu ja lisandeid on kõrgemates kontsentratsioonides, kui on eluruumide siseõhus lubatud.	Professionaalsed rasvaeraldusega köögid, trükikoda, värvikamber, labori tõmbekapp, garaaž, transporditunnelid, mustapesuruum, prügiruum, suure intensiivsusega suitsuruumid.
-------	---	--

Õhuvõtu- ja heiteavade vahekaugus sõltub sellest, kas need on paigaldatud katusele või seinale, milline on õhu klassifikatsioon, ja ka õhu vooluhulgast. Arvutused on antud EVS-standardis.

Standardis EVS-EN 16798-3:2017 on valem õhukategooriale EHA1 ja EHA2, kus seinal paiknevad välisrestid ja õhuvõtuava on heiteavadest allpool või nendega ühekõrgusel [8]:

$$2l + \Delta h > 0,308 * \sqrt{q_v} \quad (1.1)$$

Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $\Delta h$  – restide kõrguste vahe, m,  
 $q_v$  – heitõhu hulk, l/s.

Samas olukorras on valem õhukategooriale EHA3 [8]:

$$l > 0,2 * \sqrt{B} \quad (1.2)$$

Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $B$  – heitgaasid, l/s.

Vahekaugus heitõhuklassi EHA1 ja EHA2 puhul, kui seinal paiknevad välisrestid ja õhuvõtuava on heiteavadest kõrgemal, arvutatakse järgmise valemiga [8]:

$$3,07l - \Delta h > 0,613 * \sqrt{q_v} \quad (1.3)$$

Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $\Delta h$  – restide kõrguste vahe, m,  
 $q_v$  – heitõhu hulk, l/s.

Samal ajal EVS 906:2018 standardis on toodud arvutusvalem EHA1 ja EHA2 kategooria, kus fassaadis paiknev õhuvõttuava on allpool või samal kõrgusel heitavaga teine valem [9]:

$$l + \Delta h > 0,613 * \sqrt{q_v} \quad (1.4)$$

Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $\Delta h$  – restide kõrguste vahe, m,  
 $q_v$  – heitõhu hulkk, l/s.

Kategooria EHA3 puhul kehtib samas olukorras valem [9]:

$$l + \Delta h > 1,250 * \sqrt{B} \quad (1.5)$$

Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $\Delta h$  – restide kõrguste vahe, m,  
 $B$  – heitgaasid, l/s.

Kategooria EHA4 puhul kehtib samas olukorras valem [9]:

$$l + 2,954 * \Delta h > 3,030 * \sqrt{B} \quad (1.6)$$

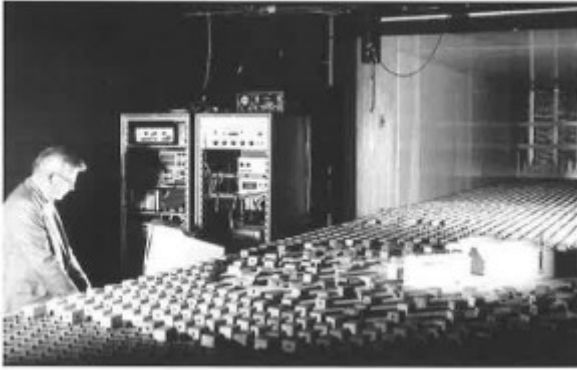
Kus  $l$  – mõlema ava keskpunkte ühendava sirgjoone pikkus, m,  
 $\Delta h$  – restide kõrguste vahe, m,  
 $B$  – heitgaasid, l/s.

Kategooriale EHA1 ja EHA2 on paar tingimust [9]:

- heitava kaugus külgnevast hoonest on vähemalt 8 meetrit
- heitava kaugus samal seinal asuvast sissevõtuavast on vähemalt 2 meetrit
- õhu kiirus heitavas on pidevalt vähemalt 2 m/s

Praktikas on ebaselge, kui täpsed on normdokumentides soovitatud minimaalsed vahekaugused ja analüütilised arvutusmeetodid, kuna nad reeglina ei võta arvesse selliseid mõjutegureid, nagu meteoroloogilised tingimused ja ümbritsev linnakeskkond ning fassaadi arhitektuurilised omadused ja välisrestide disain. Üks võimalus, kuidas saab optimaalset heitõhu väljaviske paigutust määrata ning erinevaid mõjutegureid arvestada, on arvutusliku vedeliku dünaamika (CFD) kasutamine simulatsioonide tegemiseks. [5, 10]

Olemasolevad tuuletunneli ja CFD uuringud, mis hindavad erinevates standardites esitatud projekteerimisjuhiste sobivust ja täpsust, käsitlevad paraku heitõhu väljaviske paigutust katusel ja seega on kirjanduses puudu uuringutest välisseinal asuvate heitõhuavade toimivuse kohta. [5, 10]



Joonis 1.4 Tuuletunneli hajumise uuring [10]

### 1.3 Seinapealsed heitõhuseadmed

Tänapäeval on seinapealsete heitõhuseadmete mudelid erineva ehitusega. Nende peamine erinevus on õhuvoolu väljaviskenurk ja efektiivne ala. [7]



Joonis 1.5 RVA välisrest [11]

On olemas restid, mis on varustatud katsevõrguga, ja seepärast on õhuvool suunatud 45 kraadi horisontaalsuunast allapoole. Sellised restid on joonisel 1.6.



Joonis 1.6 PANEIR välisrestid [12]

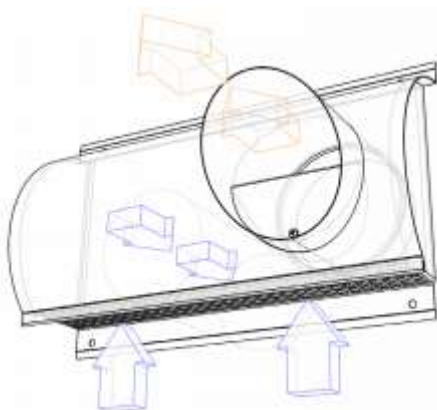
Joonisel 1.7 on toodud alternatiivne välisrestide ehitus. Külgedel on neil seinad ja õhuvool on sellisel restil suunatud otse seinast eemale, mis vähendab saasteainete kontsentratsiooni seina juures.

Raskusrest on näidatud joonisel 1.8. Resti labad sulguvad automaatselt raskusjõu toimel, takistades sellega vastupidist õhuvoolu ja vältides nii jahedama õhu sattumist ventilatsioonisüsteemi. [11]



Joonis 1.7 RVK raskusrest [11]

On olemas kombineeritud õhuvõtu-väljaviskerestid, joonisel 1.9 on näidatud erinevaid tüüpe. Joonisele 1.9 kujutatud restile ei ole sobivat juhendit ja standardit.



Joonis 1.8 RVC õhuvõtu-väljaviskerest ja RVD õhuvõtu-väljaviskerest [11]

## 1.4 Saasteainete leviku modelleerimine

Viimase 50 aasta jooksul on väikesest CFD platvormist arendatud globaalselt kasutatav tarkvara kus rajatakse kogu linnafüüsika olemus. Linnafüüsika on linnapiirkondade füüsikalised protsessid, teadus ja tehnika. Põhimõtteliselt on see soojuse ülekandmine

välis- ja sisekeskkonnas ning selle mõju inimestele, loomastikule, taimestikule. Linnafüüsika põhieesmärk on pakkuda tervislikku, mugavat ja jätkusuutlikku keskkonda väli- ja siseruumides, võttes arvesse kliima, energia ja majanduse piiranguid. [13, 14]

CFD modelleerimine annab palju võimalusi simuleerida erinevaid situatsioone. Vaja on vaid mõelda, milline lahendus igale probleemile kõige paremini sobib, sest igal lahendusel on oma eelised ja puudused. [13]

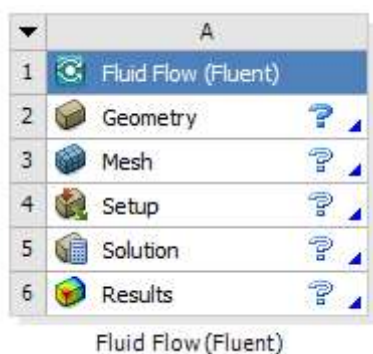
Turbulents koosneb voolu väljakõikumistest ajas ja ruumis ning selle protsessi simuleerimine on keeruline ülesanne, mida iseloomustatakse kolmemõõtmelisena, ebastabiilsena ja skaalade abil. [15] Seetõttu on kõige olulisem valida kõige sobivam turbulentsi mudel. [16]

Kõige laiemalt kasutatav turbulentsi mudel on standardne  $k-\epsilon$  mudel. RNG  $k-\epsilon$  mudel ja Realizable  $k-\epsilon$  mudel on  $k-\epsilon$  modifikatsioonid. Standardses  $k-\epsilon$  mudelis on lahendatud kaks osa diferentsiaalvõrrandit, turbulentne kineetiline energia  $k$  ja turbulentsi pöörise hajumine  $\epsilon$ . RNG ja Realizable  $k-\epsilon$  mudelis arvutatakse turbulentne viskoossus täiustatud meetodi abil. [15, 16]

## 1.5 Tarkvara ANSYS

Antud töös on kasutatud tarkvara ANSYS ja konkreetsemalt ANSYS Fluenti versiooni 2021 R1 Student. Ansys Fluent on tarkvara, millega on võimalik modelleerida vedelike ja gaaside turbulentset voolamist, keemilisi reaktsioone, põlemisprotsesse ja akustilisi efekte.

CFD modelleerimine Ansys Fluentiga koosneb viiest põhietapist: geometria defineerimine, arvutusvõrgu loomine, mudeli seadistamine, simulatsioonarvutus ja tulemuste analüüs.



Joonis 1.9. Ansys Fluenti etapid

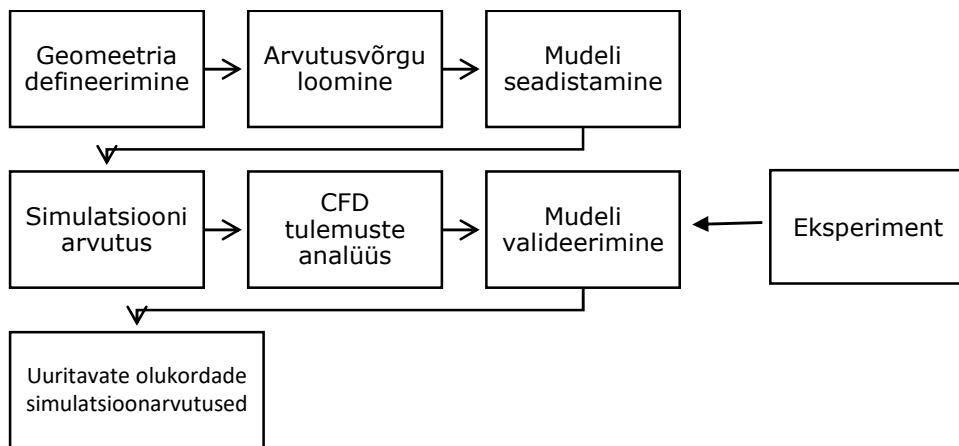
Geomeetria koostatakse kahes programmis: SolidWorks ja DesignModeler. SolidWorks tarkvaras disainitakse heitõhu elemendid ja väliskeskond. DesignModeler tarkvaras liidetakse need kaks parameetrit kokku.

Võrgu moodustamine on simulatsiooniprotsessi oluline etapp. See mõjutab täpsust, lähenemist ja lahenduse kiirust. Selle protsessi lahendus toimub Mesh tarkvaras. Mudeli seadistus ja lahendus modelleeritakse tarkvaras Fluent. Kõik simulatsiooni parameetrid valitakse seal. Tulemust vaadatakse tarkvaras CFD, kus on võimalus teha erinevaid animatsioone.



## 2 MEETODID

Käesolevas töös koostatakse sein ja väljaviskeelemendi mudel, seadistatakse neid ja tehakse arvutus programmis ANSYS Fluent. Väljaviskeelemendi geometria disain vastab reaalsele mõõtmetele. Arvutusvõrgu loomine on lihtsustatud, sest töö analüüsiks kasutatakse programmi ANSYS õpilaste versiooni, mis võimaldab kasutada maksimaalselt 512 000 rakku. Mudeli seadistamises piiranguid pole, programmi laaditakse võrgu mudel ja sisestatakse piiritingimused, mis on võetud Tauno Meieri lõputöö eksperimendist. Kui kõik parameetrid on seadistatud, tehakse simulatsioonarvutus. Mudeli valideerimine toimub kvantitatiivse ja kvalitatiivse analüüsi teel, võetakse eksperimendi ja simulatsiooni tulemused ning võrreldakse neid. Joonisel 2.1 on skeem, kuidas modelleerimine samm sammult toimub.



Joonis 2.1. CFD modelleerimise skeem

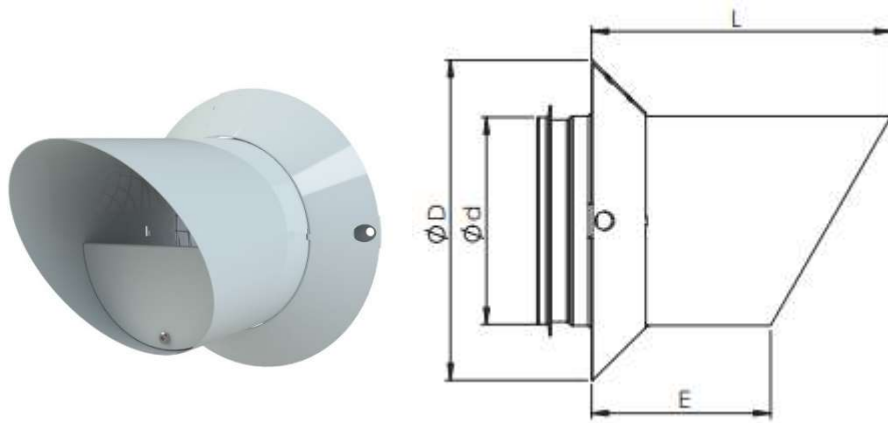
### 2.1 Geomeetria defineerimine

Lõputöös simuleeritakse kahte väljaviskeõhu elementi:

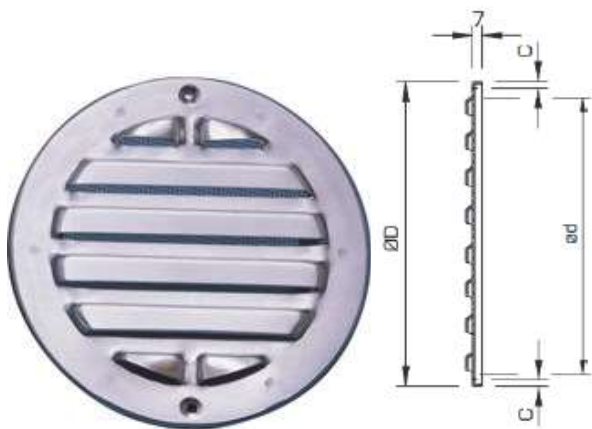
- NPC160 (ETS NORD) edaspidi nimetus EX1
- USSV160 (Fläkt Group) edaspidi nimetus EX2

Joonisel 2.2 on näidatud NPC mõõdud. Vasakul pildil on välja toodud poolringiga väljavisketoru, mille suurus on  $\varnothing d = 125$  mm. Lõputöös aga kasutatakse poolringita väljavisketoru suurusega  $\varnothing d = 160$  mm.

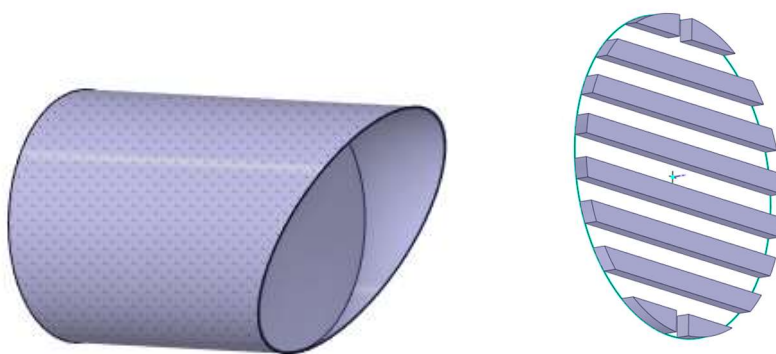
Joonisel 2.3 on USSV välisrest mõõduga  $\varnothing d = 160$  mm kaheksa väljaviskeavaga.



Joonis 2.2. NPC välisseina paigaldatav väljavisketoru.  $\varnothing d = 160$  mm,  $\varnothing D = 235$  mm,  $L = 255$  mm,  $E=163$  [11]



Joonis 2.3 USSV rest.  $\varnothing d = 160$  mm,  $\varnothing D = 185$  mm,  $c = 8$  mm [17]



Joonis 2.4 NPC160 ja USSV160 geometria tarkvaras

Väljaviskeõhu voolusuunad EX1 ja EX2 vahel erinevad, sest EX1 õhuvool on suunatud seinast otse. EX2 õhuvool suunatud rohkem seinä mööda alla. Tabelis 2.1 ja tabelis 2.2 on ümbritseva keskkonna mõõtmised.

Tabel 2.1 3D mudeli EX1 suurus

Ümbritsev keskkond	
Kõrgus	3,45 m
Laius	0,60 m
Sügavus	7,50 m
EX1 kõrgus	1,95 m

Tabel 2.2 3D mudeli EX2 suurus

Ümbritsev keskkond	
Kõrgus	3,45 m
Laius	0,60 m
Sügavus	2,00 m
EX1 kõrgus	1,95 m

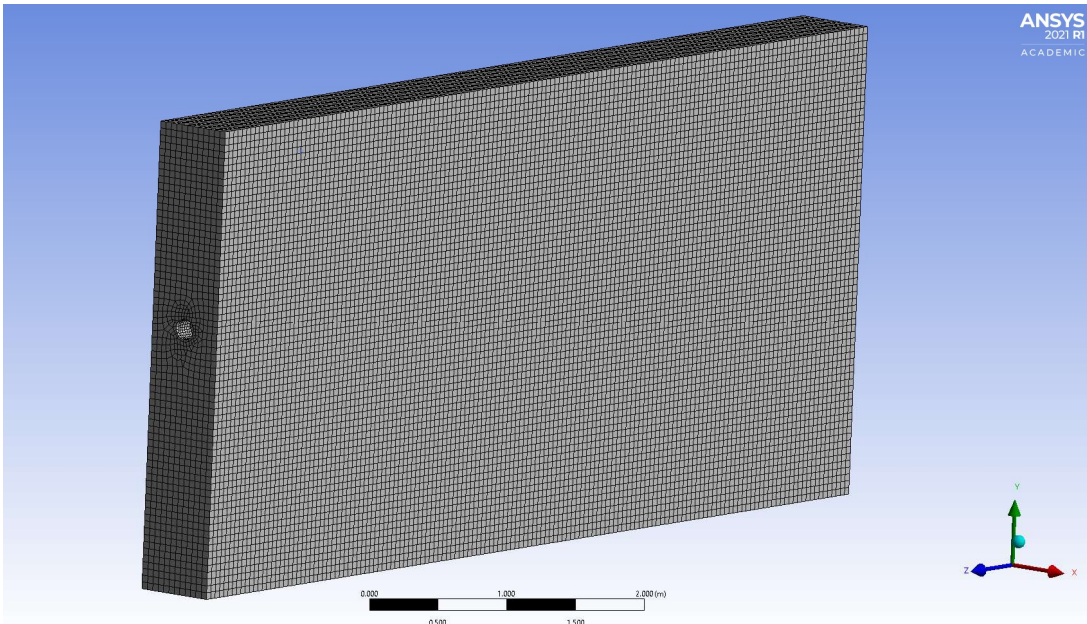
Kui geomeetria osa on DesignModeleris ja tarkvaras SpaceClaim valmis, laaditakse järgmise sammuna geomeetria tarkvarasse Mesh.

## 2.2 Arvutusvõrgu loomine

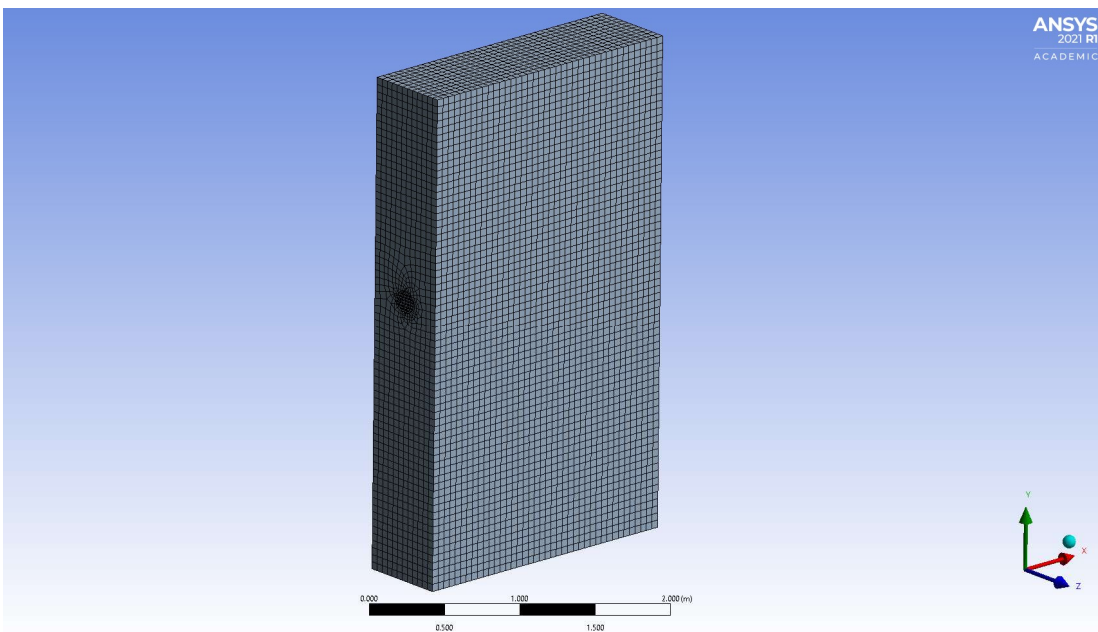
Arvutusvõrgu loomine on oluline etapp, kus soovitakse kasutada kuusnurkseid rakke tetraeedriliste rakkude asemel. Kuusnurksed rakud annavad arvestuse jooksul vähem vigu. Lisaks peaksid võrgujooned seinas olema seinaga risti, mis viitab sellele, et tetraeedrilisi rakke ei tohiks seinte peal kasutada. [6, 13]

Numbrilise arvutamise täpsuses ja stabiilsuses mängib võrgu kvaliteet olulist rolli. Seetõttu on võrgusilma kvaliteedi kontrollimine oluline samm, et saada korrektne simulatsioon. [18]

Arvutusvõrgu loomiseks kasutatakse iga võrgu minimaalset suurust 0,05 meetrit.



Joonis 2.5. EX1 võrgu mudel

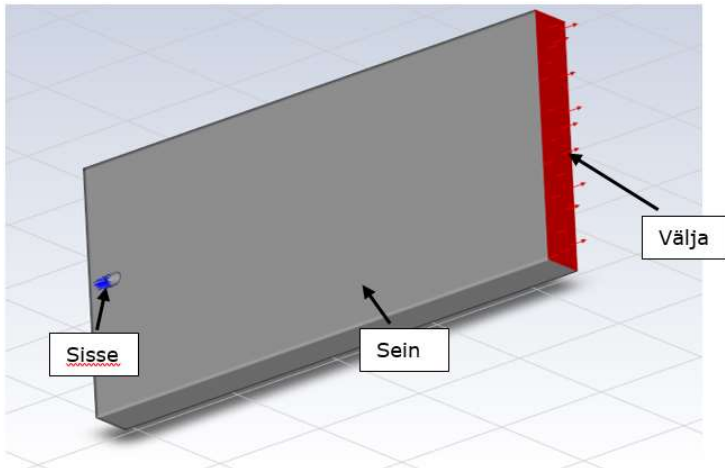


Joonis 2.6 EX2 võrgu mudel

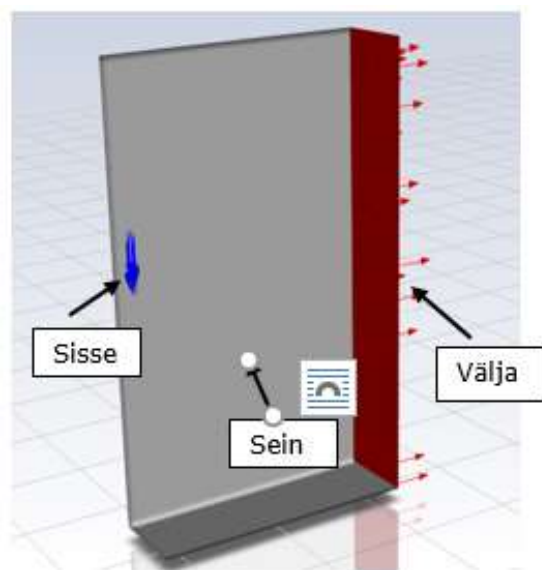
Kui arvutusvõrk on genereeritud, siis järgmise sammuna on näidata sisenemise-väljumise sektsioonid. Antud mudelis on väljaviskeelemendi auk sisenemissektsioon ja väljumissektsioon on tagasein.

## 2.3 Mudeli seadistamine

Tarkvarasse Fluent laaditakse tehtud arvutusvõrgu mudel ja programmi ANSYS versioonis Student on rakkude arvu piirang (512 000). Selles etapis sisestatakse piiritingimused ning mudeli tingimused.



Joonis 2.7 EX1 Piiritingimused



Joonis 2.8 EX2 Piiritingimused

Tabel 2.3 EX1 Piirtingimused

	Piirtingimused	Väärtused
Sisse	Kiirus	2,5 m/s
	Turbulentsi intensiivsus	5%
	Hüdrauliline diameeter	0,16 m
	Aine kontsentratsioon	1
	Temperatuur	16 °C
Välja	Rõhk	Nullrõhk
Sein	Temperatuur	16 °C
	Aine kontsentratsioon	0

Tabel 2.4 EX2 Piirtingimused

	Piirtingimused	Väärtused
Sisse	Kiirus	2,5 m/s
	Turbulentsi intensiivsus	5%
	Hüdrauliline diameeter	0,08 m
	Aine kontsentratsioon	1
	Temperatuur	16 °C
Välja	Rõhk	Nullrõhk
Sein	Temperatuur	16 °C
	Aine kontsentratsioon	0

Mudelis on kaks gaasi. Esiteks õhk, mille parameetrid on võetud tarkvara andmebaasist. Teiseks aine, mis on märkegaas, mille tihedus on sarnane CO<sub>2</sub> omale, aga selle aine tihedus leitakse empiirilisel kontrollarvutuste teostamisega. Kontsentratsiooni hindamiseks ruumis on kasutatud valemit:

$$f = (C_r - C_0)/(C_{ex} - C_0) \quad (2.1)$$

Kus  $f$  – aine kontsentratsioon, %

$C_r$  – on mõõdetud määrgistusgaasi kontsentratsioon mõõtepunktis (ppm)

$C_{ex}$  – on väljaviske kontsentratsioon (ppm)

$C_0$  – on määrgistusgaasi taustkontsentratsioon (ppm)

Kuna märgistusgaasi kontsentratsioon on arvatud, on tulemused sellised, et märgistusgaasi kontsentratsioon algolukorras on 100% ja väliskeskkonnas 0%.

Antud töös valitakse eksperimendi jaoks sobivaim k- $\epsilon$  turbulentsimudel. Neid on olemas kolme tüüpi: mudelid Standard, RNG ja Realizable. Nende konstandid ja andmed on toodud tabelis 2.5.

Tabel 2.5 Turbulentsimudeli konstandid

	<b>Standard k- <math>\epsilon</math> mudel</b>	<b>RNG k- <math>\epsilon</math> mudel</b>	<b>Realizable k- <math>\epsilon</math> mudel</b>
$C_{1\epsilon}$	1,44	1,42	Analüütiline valem
$C_{2\epsilon}$	1,92	1,68	1,90
$C_{\mu}$	0,09	0,0845	Analüütiline valem
$\sigma_k$	1,0	Analüütiline valem	1,0
$\sigma_{\epsilon}$	1,3	Analüütiline valem	1,2

## 2.4 Simulatsiooniarvutus

Simulatsiooni arvutusmeetod on SIMPLE, mis leitakse hübriidarvutusega. See on meetod kus muutujad, nagu temperatuur, turbulents, aine fraktsioonid leitakse automaatselt kindlate parameetrite abil, mis olid süsteemis juba olemas. Hübriidarvutus sobib olukorras, kus mudel valideeritakse. Kuid järgmises simulatsioonis, kui mudel on juba valideeritud, kasutatakse standardset arvutust. Sellises olukorras võib muuta erinevaid parameetreid, nagu keskkonna temperatuur, õhu sarnane märkegaasi sisaldus või lisada õhuvoolu kiiruse erinevatest suundadest.

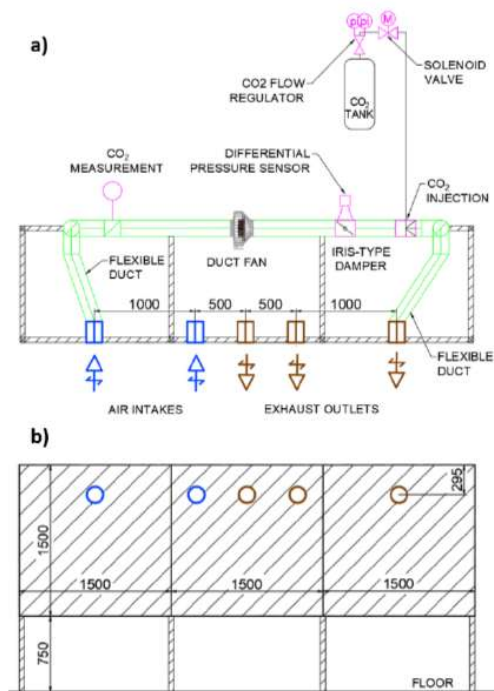
## 2.5 Tulemuste analüüs

Pärast simulatsiooniarvutusi laaditakse andmed CFD järeltöötluse tarkvaramoodulisse, kus visualiseeritakse simulatsiooni tulemused. Seejärel luuakse paneel, valitakse konkreetsed punktid ning võetakse neist andmed.

## 2.6 Mudeli valideerimine

Tuginedes Tauno Meieri lõputöös „Välisseinal paiknevate ventilatsiooni õhuvõtu- ja väljaviske elementide minimaalse vahekauguse määramine“ kirjeldatud eksperimendile, valideeritakse mudelid. Meieri töös oli järgmisi lihtsustusi:

- Töö raames keskendutakse ainult välisseinal teineteise suhtes ühel kõrgusel paiknevate õhuvõtu- ja väljaviskeelementide arvutusmetoodikate uurimisele
- Väljaviske temperatuur mõõtmiste ajal oli sama, mis ruumi temperatuur
- Ühel fassaadil paikneva mitme õhuvõtu- ja väljaviskeelemendi koosmõju ei uuritud



Joonis 2.9. Eksperimendi skeem a) pealtvaade b) eestvaade [19]

Joonisel 2.9 on näidatud, kuidas väljaviskeelemendid on eksperimendi ajal paigaldatud. Heitõhu hajumise eksperimendi jaoks ehitati mõõtestend, kus uuriti väljaviskeelementide õhujuga erinevate õhuhulkade juures ning õhujuga markeeriti CO2-anduriga ja visuaalselt. [4]

Kvalitatiivse meetodi puhul kontrollitakse, kas visuaalselt heitõhu joa dünaamika vastab eksperimendile. Kvantitatiivne meetod võrdleb simulatsiooni ja eksperimendi arvulist heitõhu gaasi hajumist.

Kvantitatiivses meetodis kasutatakse kvalitatiivse tulemuse näitaja murdosalist nihet (*the fractional bias*): [20] [21]

$$FB = 2(\bar{C}_0 - \bar{C}_p) / (\bar{C}_0 + \bar{C}_p) \quad (2.1)$$

Kus  $C_0$  - muutuja, alaindeks 0 tähistab mõõdetud väärtust  
 $C_p$  - muutuja, alaindeks p tähistab simuleeritud väärtust  
 $\bar{C}_0$  - ülariba tähistab keskmist väärtust



Aktsepteerimiskriteerium on:  $-0,3 < FB < 0,3$  ja seda soovitati edasi analüüsida. Kui kõik mõõdikud jäävad aktsepteeritavatesse piiridesse, näitab see, et simulatsioonimudelid sobivad õhuvoolu ja saasteainete hajumise prognoosimiseks. Eesmärk on saada FB-väärtuseks null, sest see tähendab et mudel on ideaalne. [20] [21]

Samal ajal kasutatakse veel kvantitatiivses meetodis NMSE ja FAC2:

$$NMSE = (\bar{C}_0 - \bar{C}_p)^2 / (\bar{C}_0 * \bar{C}_p) \quad (2.2)$$

Kus  $C_0$  – muutuja, alaindeks 0 tähistab mõõdetud väärtust  
 $C_p$  – muutuja, alaindeks p tähistab simuleeritud väärtust  
 $\bar{C}_0$  – ülariba tähistab keskmist väärtust

$$FAC2 = \bar{C}_0 / \bar{C}_p \quad (2.3)$$

Kus  $C_0$  – muutuja, alaindeks 0 tähistab mõõdetud väärtust  
 $C_p$  – muutuja, alaindeks p tähistab simuleeritud väärtust  
 $\bar{C}_0$  – ülariba tähistab keskmist väärtust

Aktsepteerimiskriteerium NMSE on kui väärtus on alla 1,5. Mudelit käsitletakse ideaalsena, kui väärtus võrdub nulliga. FAC2 on teistpidi, mudelit käsitletakse ideaalsena, kui väärtus võrdub 1-ga (100%). FAC2 aktsepteerimiskriteerium  $0,5 < FAC2 < 2$ . [20] [21]

Kvalitatiivsel meetodil tehakse ristlõige sellises asukohas, kust eksperimendi ajal andmeid võeti. Igal ristlõikel on olemas andmeid erinevate kõrguste kohta. Kõigepealt analüüsitakse iga ristlõiget jooniste abiga ja edasi arvutatakse näitajad FB, NMSE, FAC2.

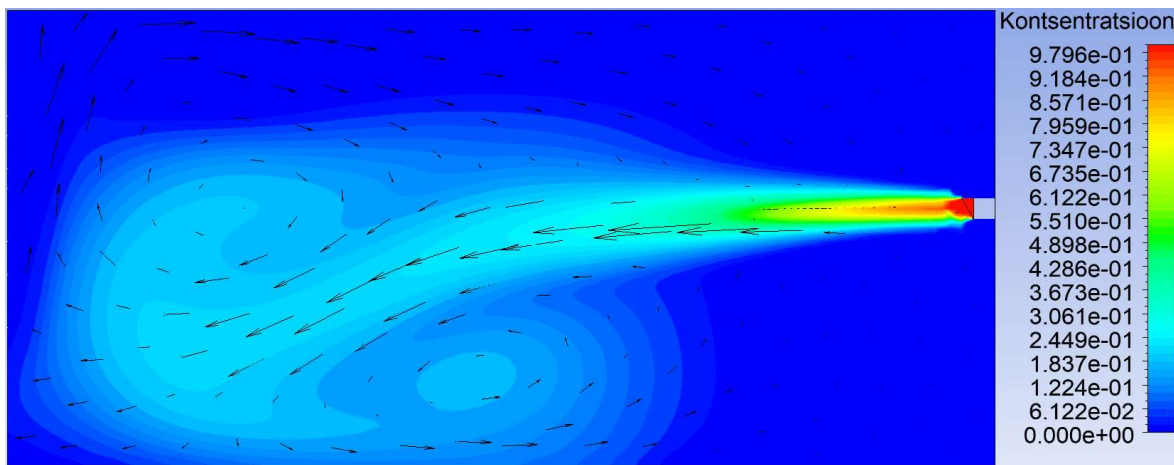
## 3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

### 3.1 EX1 mudeli valideerimine

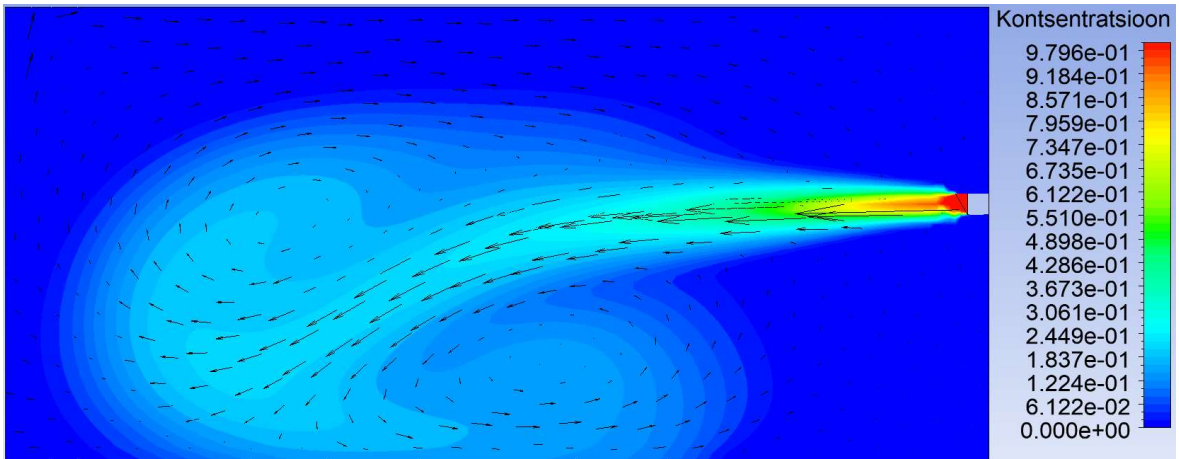
Kõigepealt tehti visuaalne valideerimine ja seejärel simuleeriti EX1 kasutades kolme turbulentsimudelit ning heitõhu väljaviskekiirust 2,5 m/s. Valideerimise eesmärk on võrrelda turbulentsimuleid ja analüüsida, millise turbulentsimuliga saavutatakse eksperimendile kõige lähendasemad tulemused. Joonisel 3.1 on visuaalne illustreeritud eksperiment EX1 2,5 m/s, on näha kuidas õhuvool hajub.



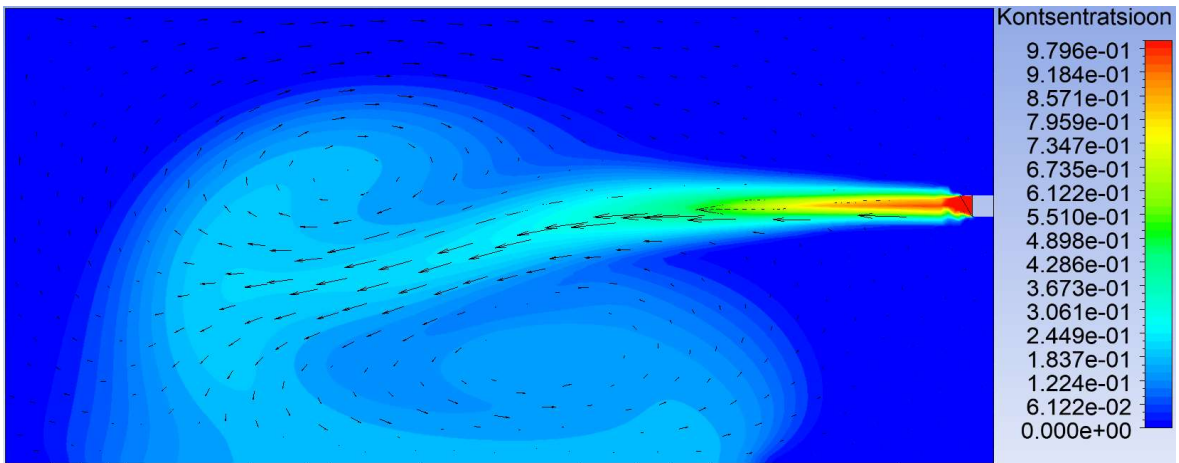
Joonis 3.1 EX1 eksperimendi tulemus



Joonis 3.2 EX1 k-ε mudel Realizable



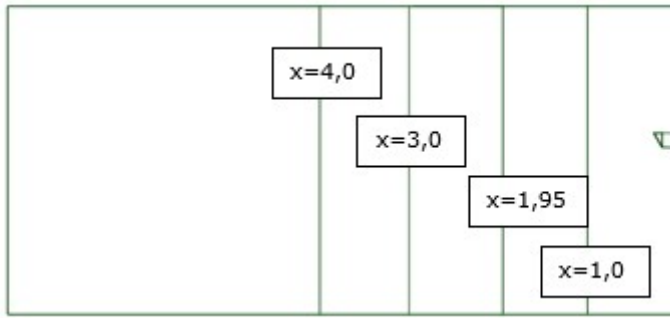
Joonis 3.3 EX1 k-ε mudel Standard



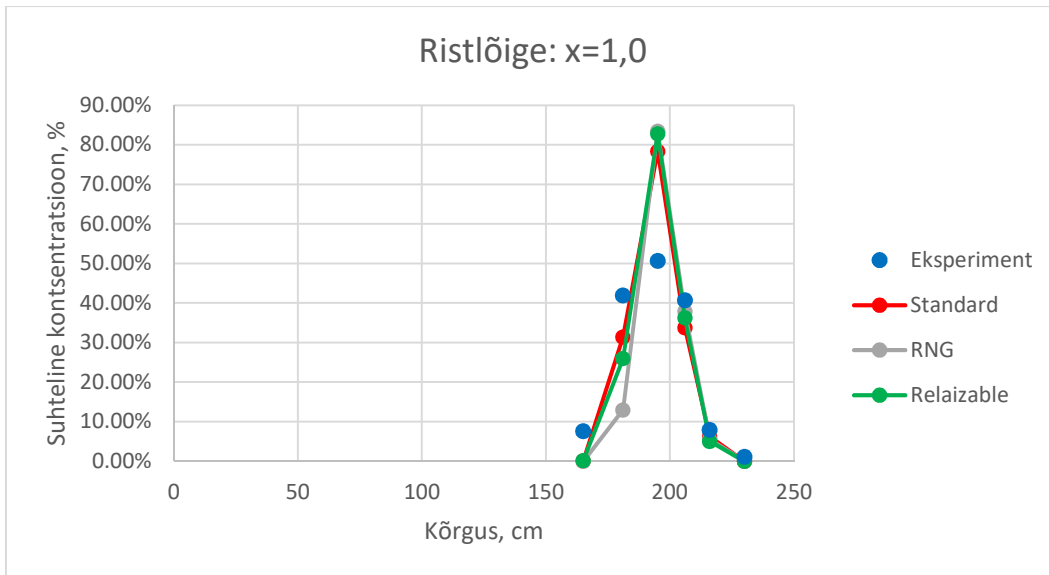
Joonis 3.4 EX1 k-ε mudel RNG

Joonisel 3.2, 3.3, 3.4 on välja toodud heitõhu hajumine väliskeskkonnas. Joonisel 3.2 on õhuvool suunatud rohkem otse ja voolu lõpus turbulentsi ei teki, mida aga ei saa öelda joonise 3.3 ja 3.4 kohta. Eelmainitud joonistel on näha kuidas vool liigub allapoole. Võib järeldada, et mudel k-ε Realizable vastab kõige enam käesoleva eksperimendi tulemustele.

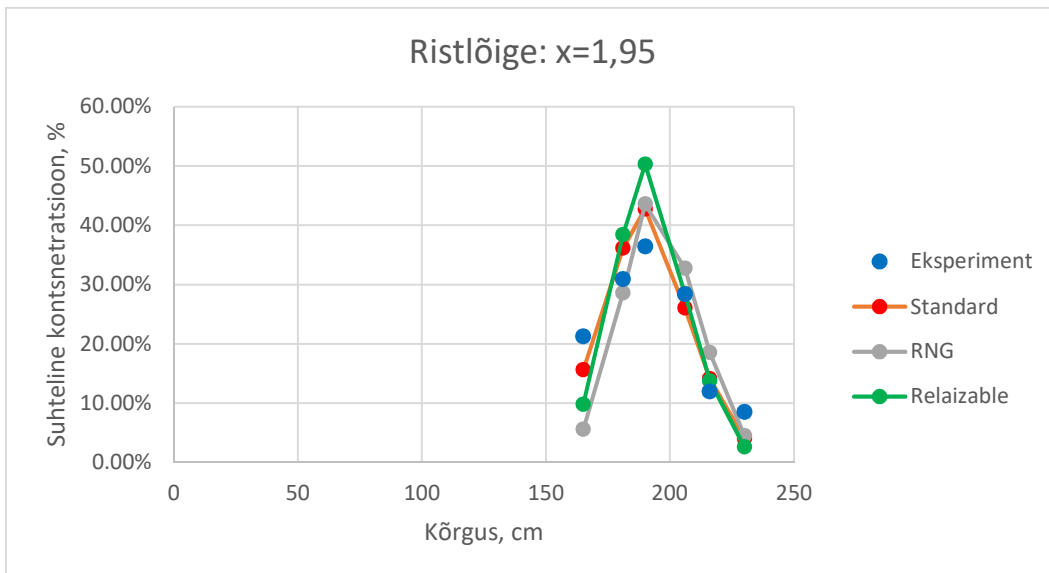
Kvantitatiivse meetodi kasutamisel järeldati, et mudel k-ε Realizable annab parima tulemuse. Tulemust kontrollitakse ka kvalitatiivse meetodiga. Selleks tehakse neli ristlõiget: 1,0 m, 1,95 m, 3,0 m ja 4,0 m kaugusel seinast. Joonisel 3.5 on näha ristlõigete asendid, igaüht analüüsitakse eraldi.



Joonis 3.5 EX1 ristlõike jooned



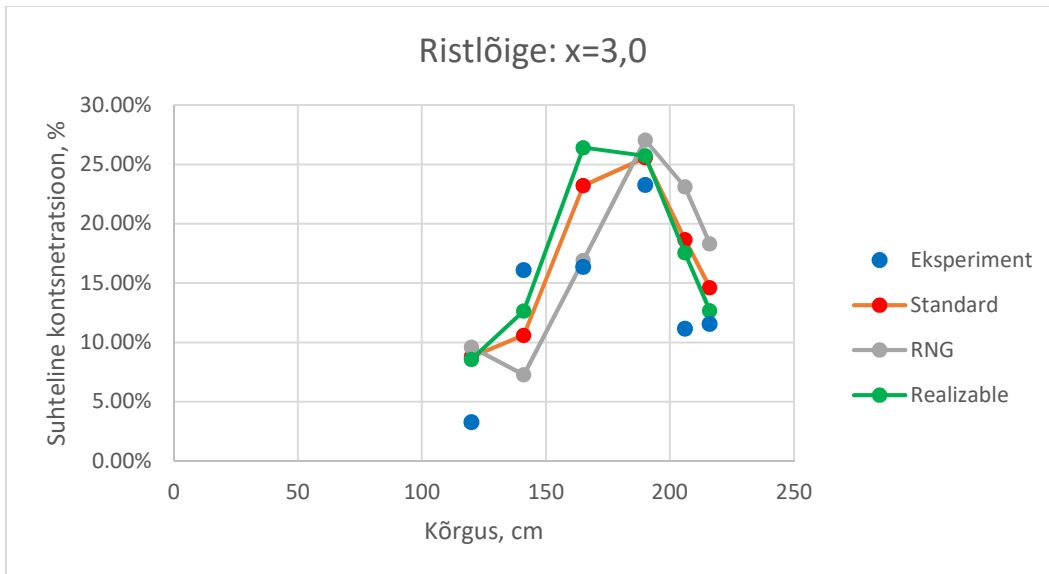
Joonis 3.6 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=1,0$  m



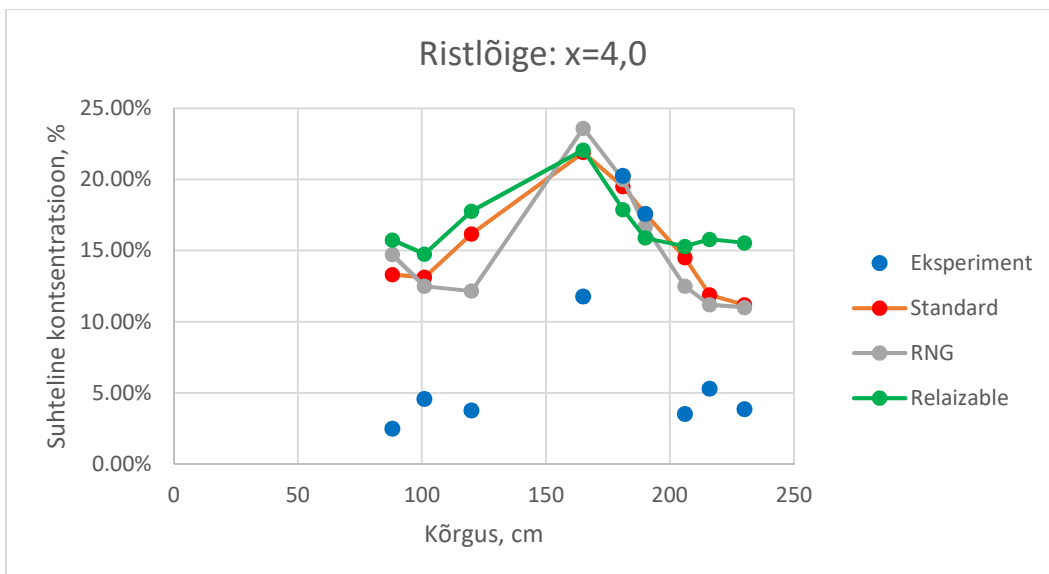
Joonis 3.7 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=1,95$  m

Joonisel 3.6 ja 3.7 on näha, et kõigi kolme mudeli turbulentsus on ligilähedane eksperimendi tulemustele, mis tähendab, et nende ristlõigete kaugus seinast

simulatsiooni arvutamisel on täpne. Joonis 3.7 näitab, et mudel  $k-\varepsilon$  RNG on eksperimendi tulemustele võrreldes mudeliga  $k-\varepsilon$  Realizable kõige lähemal.



Joonis 3.8 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=3,0$  m



Joonis 3.9 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=4,0$  m

Joonisel 3.8 ja 3.9 on näha, et simulatsiooni ja eksperimendi tulemusel on suured kõrvalekaldeid võrreldes joonistega 3.6 ja 3.7. Arvestades kõrvalekaldeid, on mudel  $k-\varepsilon$  RNG kolmest turbulentsi mudelist eksperimendi tulemustele kõige lähemal. Joonise 3.9 kõrvalekallet, mis asub 1 meetri raadiuses ning 2 meetrit ja kõrgemal, võib seletada asjaoluga, et eksperimendi ajal on võetud andmete keskmine, mis võib mõjutada lõplikku tulemust.

Tabel 3.1 FB väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
x = 1,0	0,0026	0,0711	-0,0002
x = 1,95	-0,0088	0,0286	-0,0420
x = 3,0	-0,2146	-0,2224	-0,2352
x = 4,0	-0,6206	-0,5886	-0,6919
Keskmine väärtus	-0,2104	-0,1778	-0,2423

On arvatud iga ristlõike FB väärtus ja nende keskmine. Tabelis 3.1 on näha, et esimesel ristlõikel on 1,0 meetri juures kõige väiksem väärtus mudelil Realizable. Kui on arvatud keskmine väärtus, siis on hästi näha, et mudel RNG on kolmest turbulentsi mudelist nullile kõige lähemal, mis tähendab, et see mudel vastab kõige rohkem eksperimendi tulemustele. Tabelis 3.2 on näha, et kõige nullilähedasem väärtus on mudeli RNG puhul, aga mudel Standard on ka väga lähedal. Tabelis 3.2 on näha, et mudelil Realizable on kõige väiksem väärtus, mis tähendab et see ei sobi, kuna RNG-mudelil on parem tulemus.

Tabel 3.2 NMSE väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
x = 1,0	0,0	0,0051	0,0
x = 1,95	0,0001	0,0008	0,0018
x = 3,0	0,0466	0,0501	0,0561
x = 4,0	0,4262	0,3793	0,5438
Keskmine väärtus	0,1182	0,1088	0,1504

Tabel 3.3 FAC2 väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
x = 1,0	1,0026	1,0737	0,9998
x = 1,95	0,9912	1,0290	0,9589
x = 3,0	0,8062	0,7999	0,7895
x = 4,0	0,5264	0,5452	0,4859
Keskmine väärtus	0,8316	0,8620	0,8085

Tuginedes kvantitatiivsele ja kvalitatiivsele meetodile, võib öelda, et mudel k-ε RNG kajastab kõige paremini simulatsiooni tulemust. Vastavalt käesoleva töö järgmistele analüüsidele EX-1 kasutatakse mudelit k-ε RNG. Tabelis 3.4 on näidatud valideerimismeetodi tulemust ja aktsepteerimiskriteeriumeid.

Tabel 3.4 Kontsentratsiooni tulemuste valideerimismõõdikud

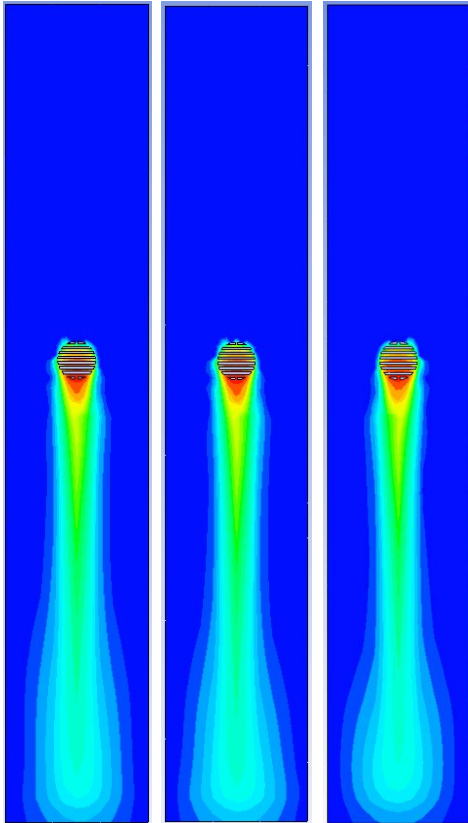
Valideerimise mõõdik	Mudeli RNG tulemus	Aktsepteerimiskriteerium	Ideaalne väärtus
FB	-0,1778	$-0,3 < FB < 0,3$	0
NMSE	0,1088	$NMSE < 1,5$	0
FAC2	0,8620	$0,5 < FAC2 < 2$	1

### 3.2 EX2 mudeli valideerimine

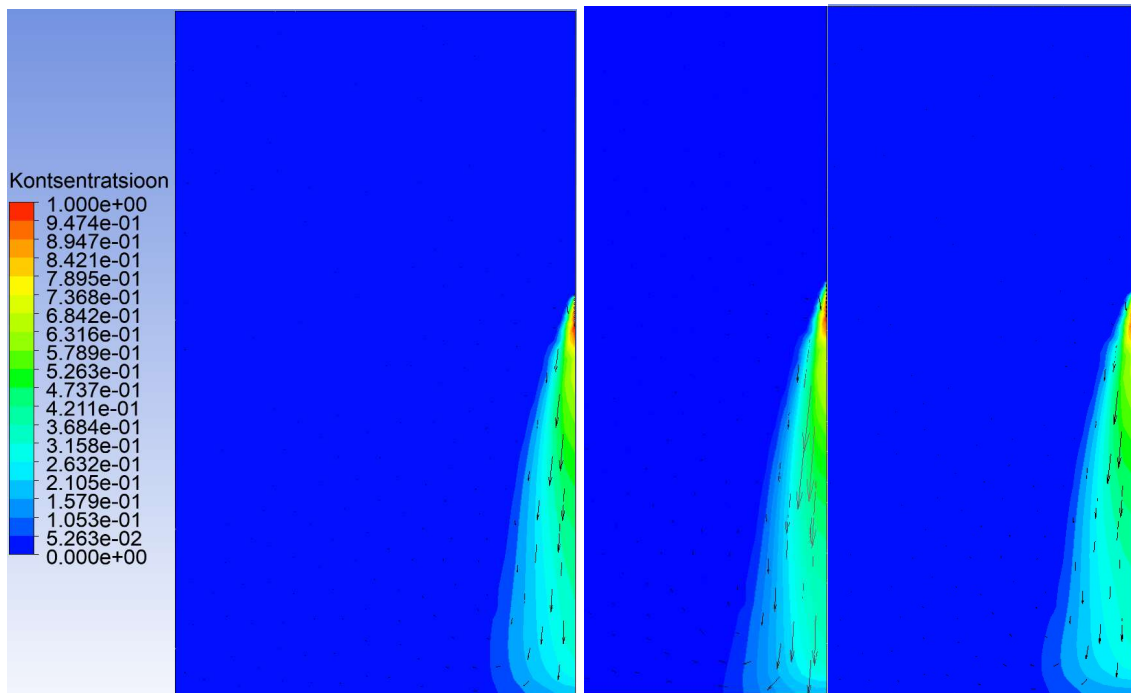
Kõigepealt tehti visuaalne valideerimine ja seejärel simuleeriti EX2 kolm turbulentsimudelit sama kiirusega 2,5 m/s. Valideerimise eesmärk on võrrelda turbulentsimuleid ja analüüsida, milline mudel on kõige sarnasem sellisele eksperimendile. Joonisel 3.10 on visuaalne illustreeritud eksperiment EX2 2,5 m/s, on näha, kuidas õhuvool hajub.



Joonis 3.10 EX2 eksperimendi tulemus



Joonis 3.11 EX2 k-ε mudel Standard, RNG, Realizable eestvaade

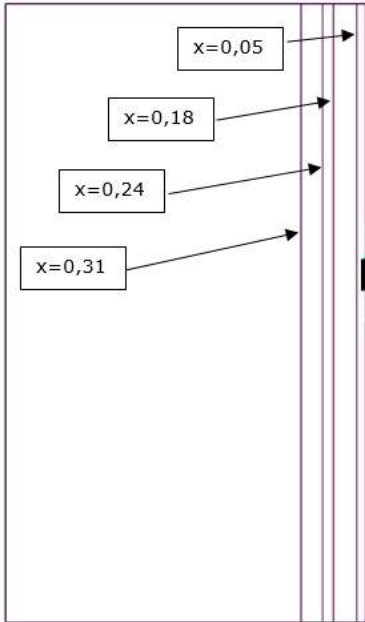


Joonis 3.12 EX2 k-ε mudel Standard, RNG, Realizable külgsuuna

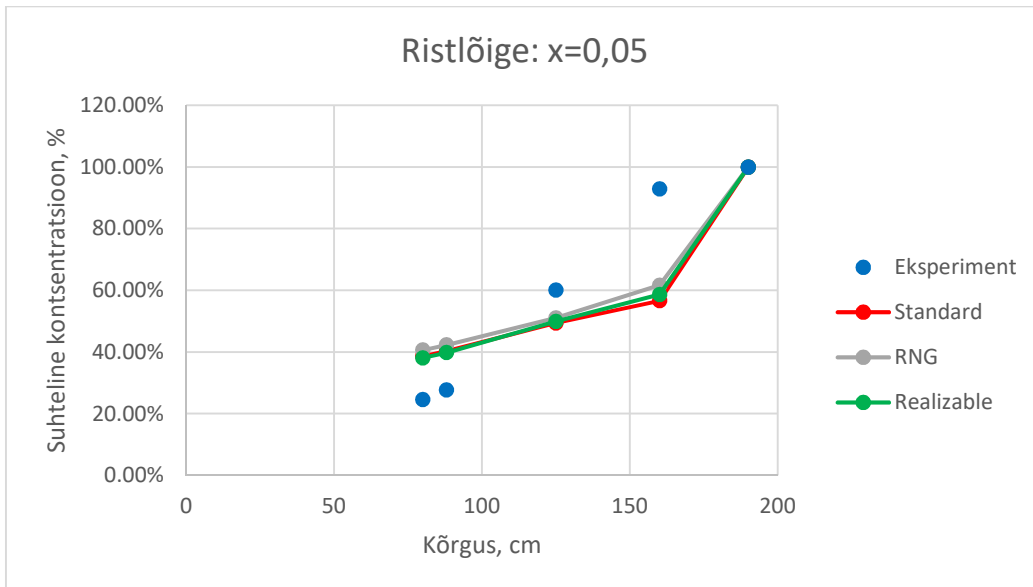
Eksperimenti sooritades on jooniselt 3.10 näha, et sein, kuhu on kinnitatud välisrest, lõpeb 0,75 meetrit enne pörandat. Simulatsioonis on sein pörandani, seetõttu võivad pörandi lähedal tulemused erineda. Joonisel 3.11 on välja toodud kolm turbulentsi varianti, mis omavahel erinevad, kuigi visuaalselt on keeruline hinnata, milline mudel on eksperimentidele kõige lähemal. Seega järeldus on kvantitatiivse meetodi abil selgem.



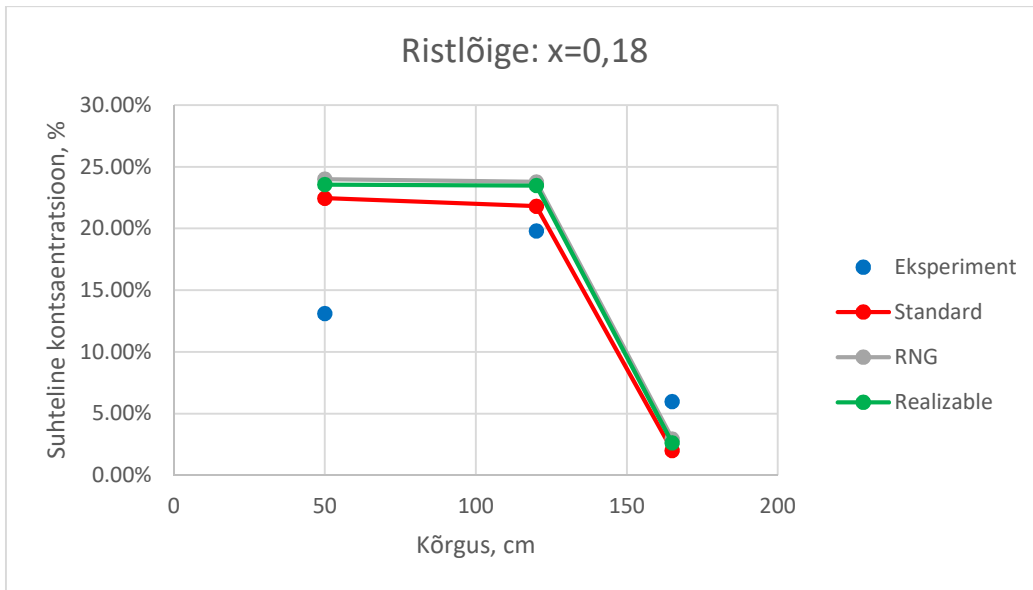
Selleks tehakse neli ristlõiget: 0,05 m, 0,18 m, 0,24 m ja 0,31 m kaugusega seinast. Joonisel 3.12 on näha ristlõigete asendid, igaüht analüüsitakse eraldi.



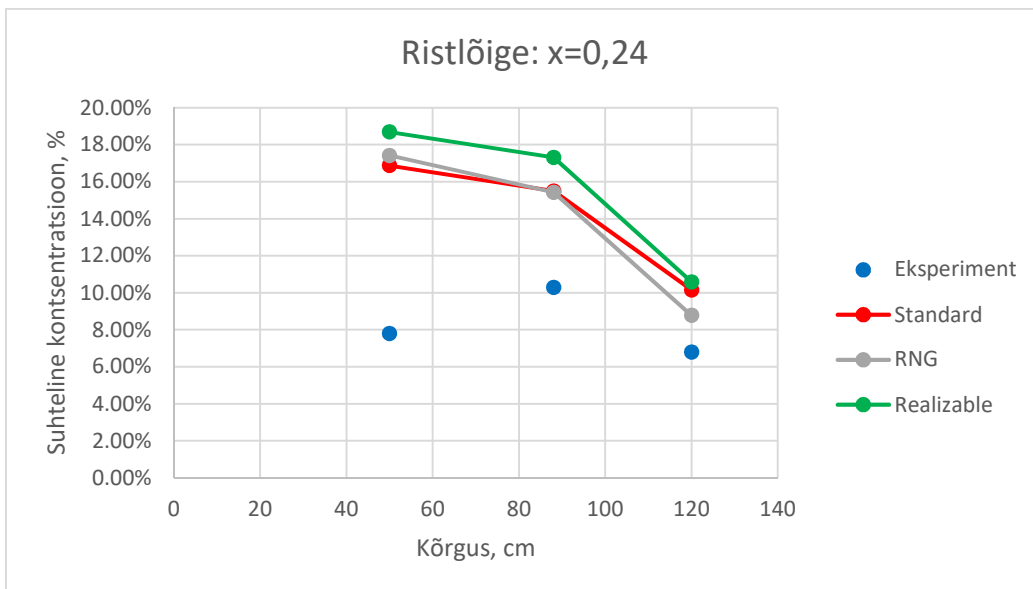
Joonis 3.13 EX2 ristlõike jooned



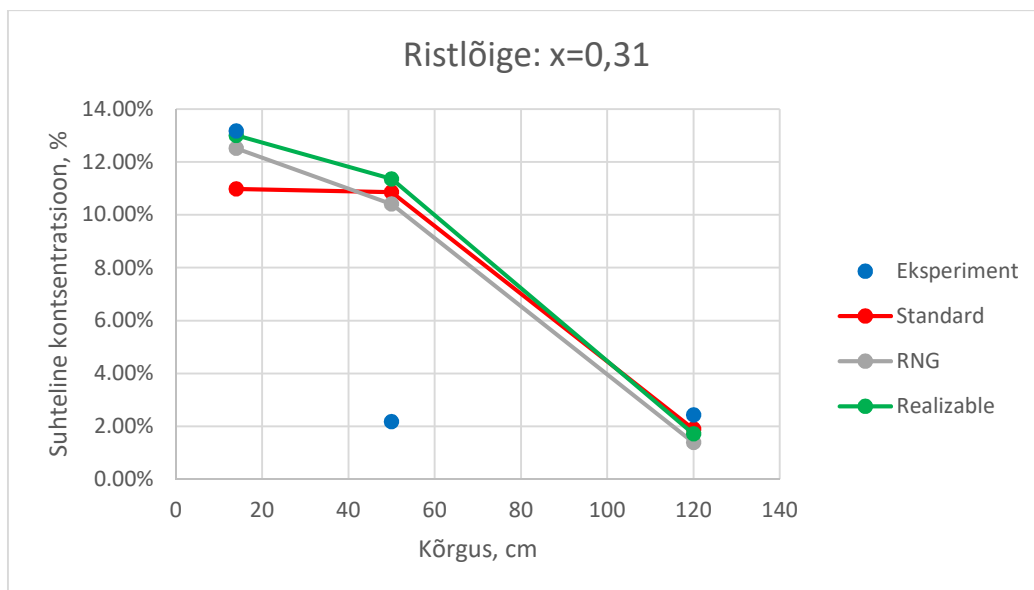
Joonis 3.14 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=0,05$  m



Joonis 3.15 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=0,18$  m



Joonis 3.16 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=0,24$  m



Joonis 3.17 Suhteline kontsentratsioon vaadeldaval ristlõikel  $x=0,31$  m

Analüüsidest jooniseid 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, on tulemus välisresti kõrval kõige täpsem ning mida kaugemal restist, seda suurem on erinevus. Võib oletada, et eksperimendis lõpeb sein varem ja heitõhu kontsentratsioon põranda lähedal on rohkem hajunud. Joonisel on näha, et seina kõrgusel 0,5 meetrit, kus eksperimendis sein puudub, on tulemuste vahe kõige suurem.

Tabel 3.5 FB väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
$x = 0,05$	0,0686	0,0318	0,0634
$x = 0,18$	-0,1736	-0,2645	-0,2437
$x = 0,24$	-0,5236	-0,5034	-0,6074
$x = 0,31$	-0,2867	-0,3103	-0,3785
Keskmine väärtus	-0,2288	-0,2616	-0,2915

On arvatud FB väärtus igal ristlõikel ja nende keskmine. Tabelis 3.5 on näha, et esimesel ristlõikel 0,05 meetri juures on kõige väiksem väärtus mudelil Realizable. Kui on arvatud keskmine väärtus, siis on hästi näha, et mudel Standard on kolmest turbulentsimudelitest nullile kõige lähemal, mis tähendab, et see mudel vastab kõige rohkem eksperimendi tulemustele. Tabelis 3.6 on näha, et kõige nullilähedasem väärtus on mudelil RNG, aga mudel Standard on ka väga lähedal. Tabelis 3.7 on näha, et mudelil Realizable on kõige väiksem väärtus, mis tähendab et see ei sobi, kuna mudelil Standard on parem tulemus.

Tabel 3.6 NMSE väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
x = 1,0	0,0108	0,0023	0,0092
x = 1,95	0,0303	0,0712	0,0603
x = 3,0	0,2943	0,2705	0,4064
x = 4,0	0,0839	0,0987	0,1486
Keskmine väärtus	0,1048	0,1107	0,1561

Tabel 3.7 FAC2 väärtus

Ristlõikejoon	Standard	RNG	Realizable
x = 1,0	1,1094	1,0488	1,1006
x = 1,95	0,8403	0,7664	0,7828
x = 3,0	0,5851	0,5979	0,5341
x = 4,0	0,7492	0,7314	0,6817
Keskmine väärtus	0,8210	0,7861	0,7748

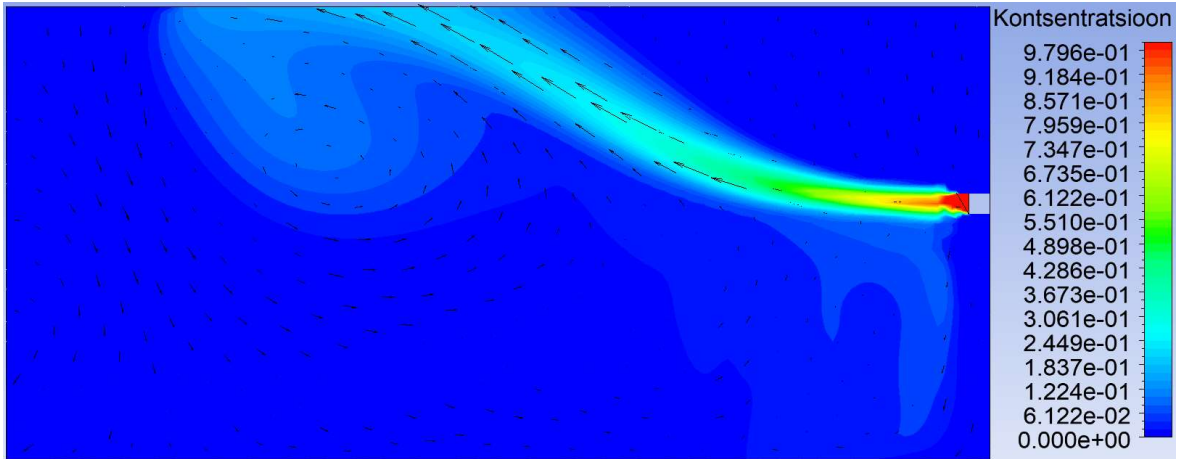
Tuginedes kvantitatiivsele ja kvalitatiivsele meetodile, võib öelda, et mudel  $k$ - $\varepsilon$  Standard kajastab kõige paremini simulatsiooni tulemust. Vastavalt käesoleva töö järgmistele analüüsidele EX-2 kasutatakse mudelit  $k$ - $\varepsilon$  Standard. Tabelis 3.8 on näidatud valideerimismeetodi tulemus ja aktsepteerimiskriteeriumid ning valideerimismõõdikute sihtväärtused ideaalse mudeli saamiseks. Kõik resultaadid vastavad aktsepteerimis kriteeriumitele.

Tabel 3.8 Kontsentratsiooni tulemuste valideerimismõõdikud

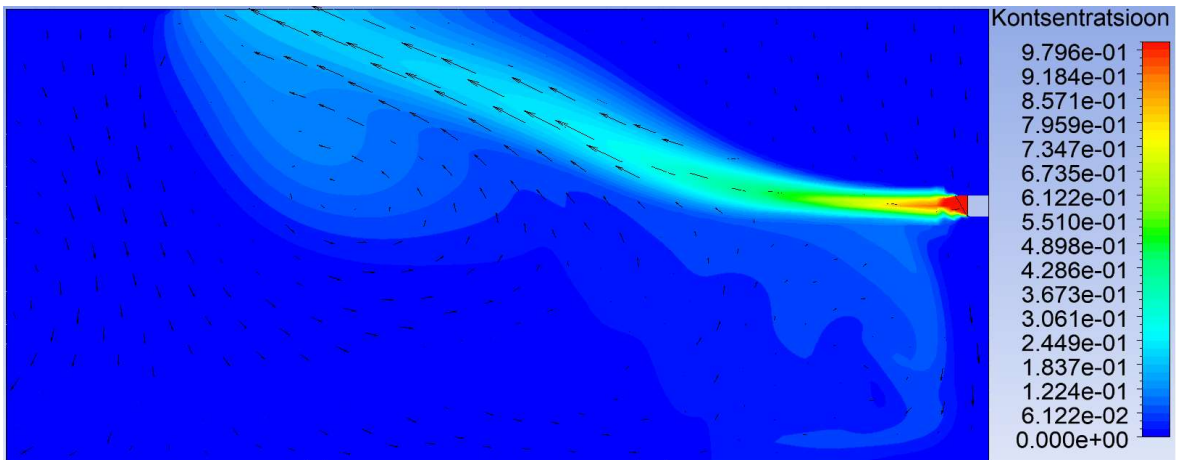
Valideerimise mõõdik	Mudel RNG resultaat	Aktsepteerimis kriteerium	Ideaalne väärtus
FB	-0,2288	$-0,3 < FB < 0,3$	0
NMSE	0,1048	$NMSE < 1,5$	0
FAC2	0,8210	$0,5 < FAC2 < 2$	1

### 3.3 EX1 heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele

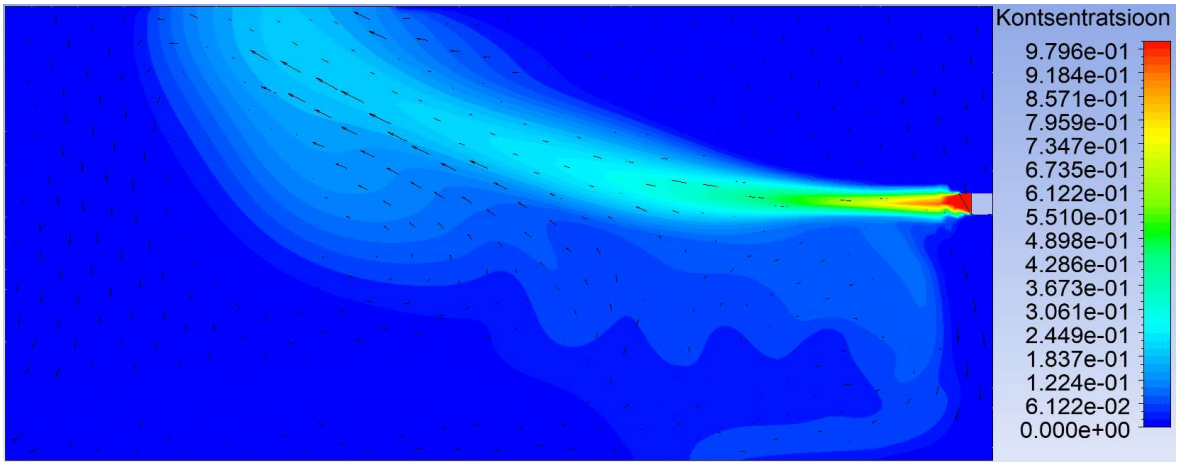
Heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele simuleeritakse mudeliga EX1 RNG k- $\epsilon$ . Keskkonna temperatuur võrdub nulliga ja heitõhu temperatuur simulatsiooni ajal kasvab. Kõige suurem temperatuurivahe simulatsioonis on  $\Delta t=25\text{ }^\circ\text{C}$ . Iga järgmine samm on 5 kraadi.



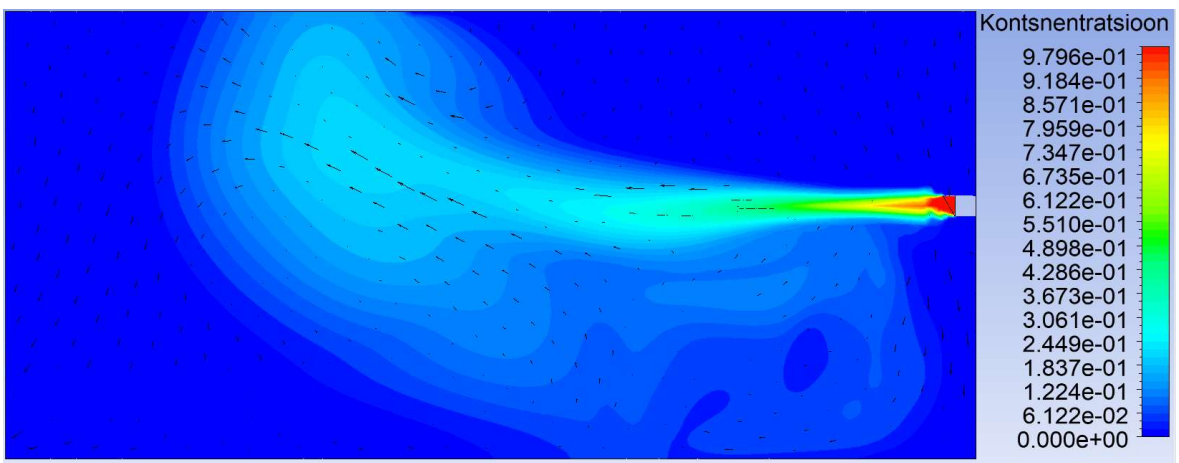
Joonis 3.18 EX1  $\Delta t = 25\text{ }^\circ\text{C}$



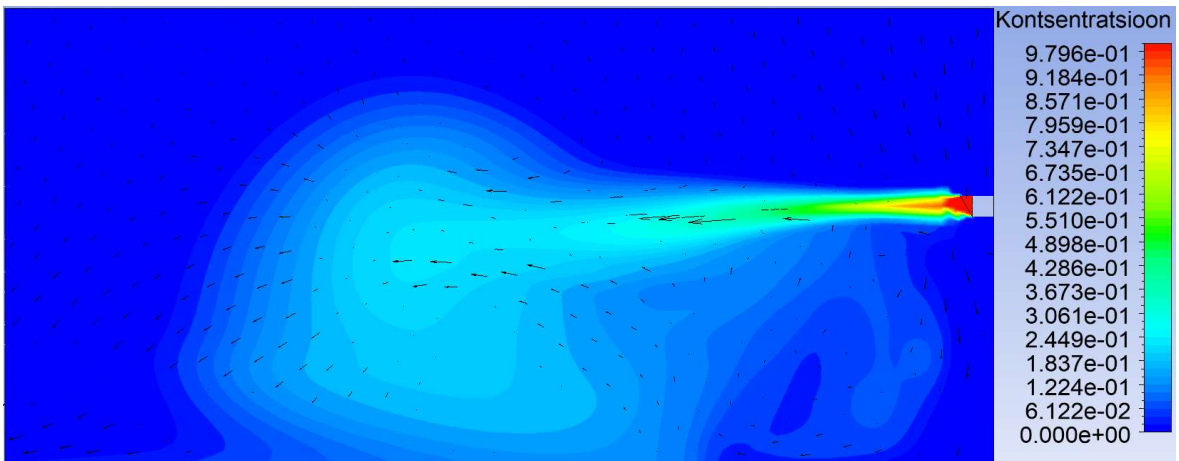
Joonis 3.19 EX1  $\Delta t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .



Joonis 3.20 EX1  $\Delta t = 15$  °C.



Joonis 3.21 EX1  $\Delta t = 10$  °C.



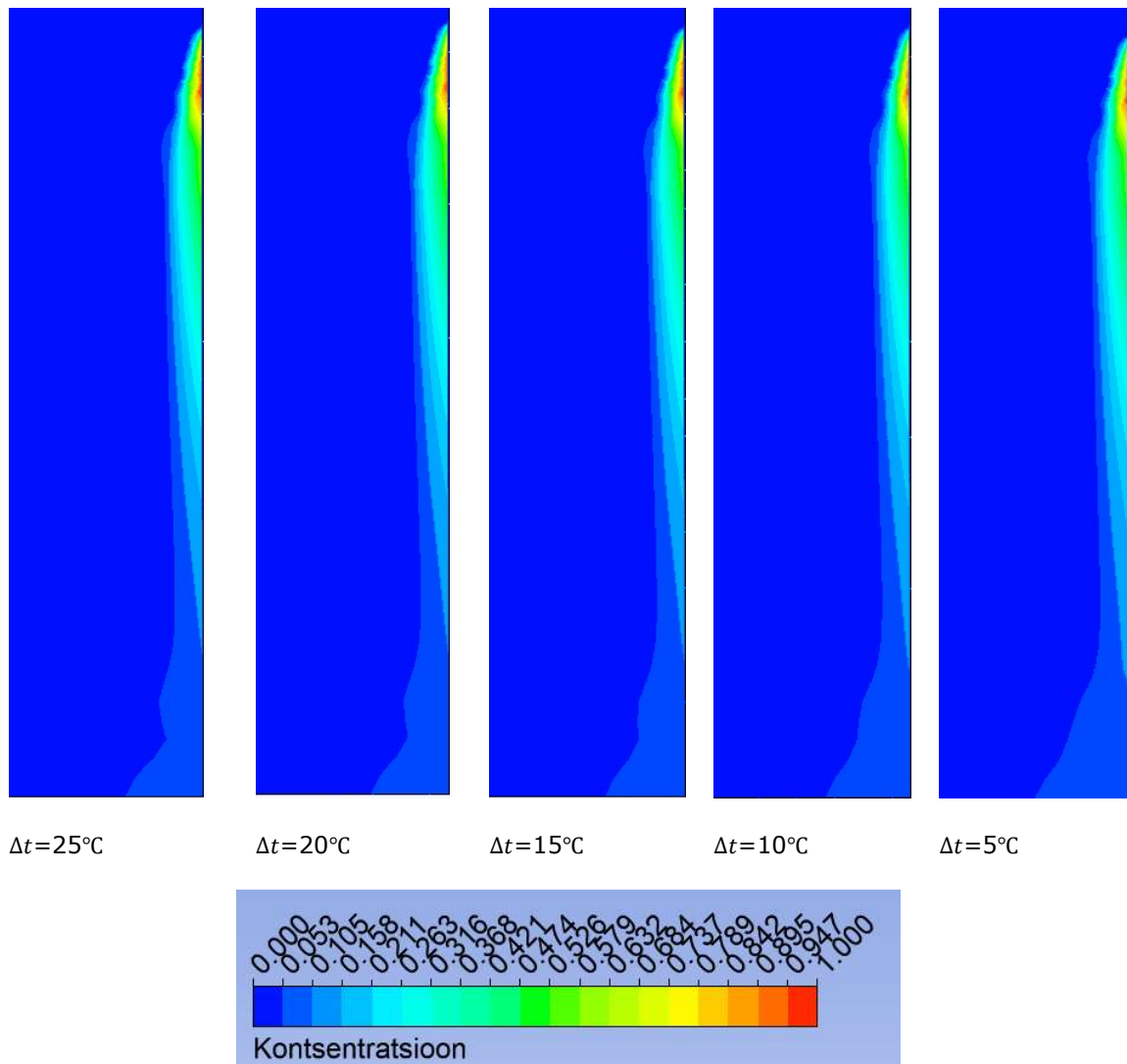
Joonis 3.22 EX1  $\Delta t = 5$  °C.

Joonisel 3.19, kus temperatuuride vahe on 25 kraadi, on hästi näha kuidas heitõhu juga pöördub üles. Õhuvool pöördab üles kahe meetri kaugusel seinast ja pöörlemine on üsna järsk. Joonis, kus temperatuurivahe on 20 kraadi, on väga sarnane joonisega, kus temperatuurivahe on viis kraadi suurem. Joonisel, kus temperatuurivahe on ainult 5 kraadi, liigub õhuvool otse ja see sarnaneb väga olukorrale, kus temperatuurivahe puudub. Siin saab öelda, et kui väliskeskonna ja väljaviskeõhu temperatuurivahe on

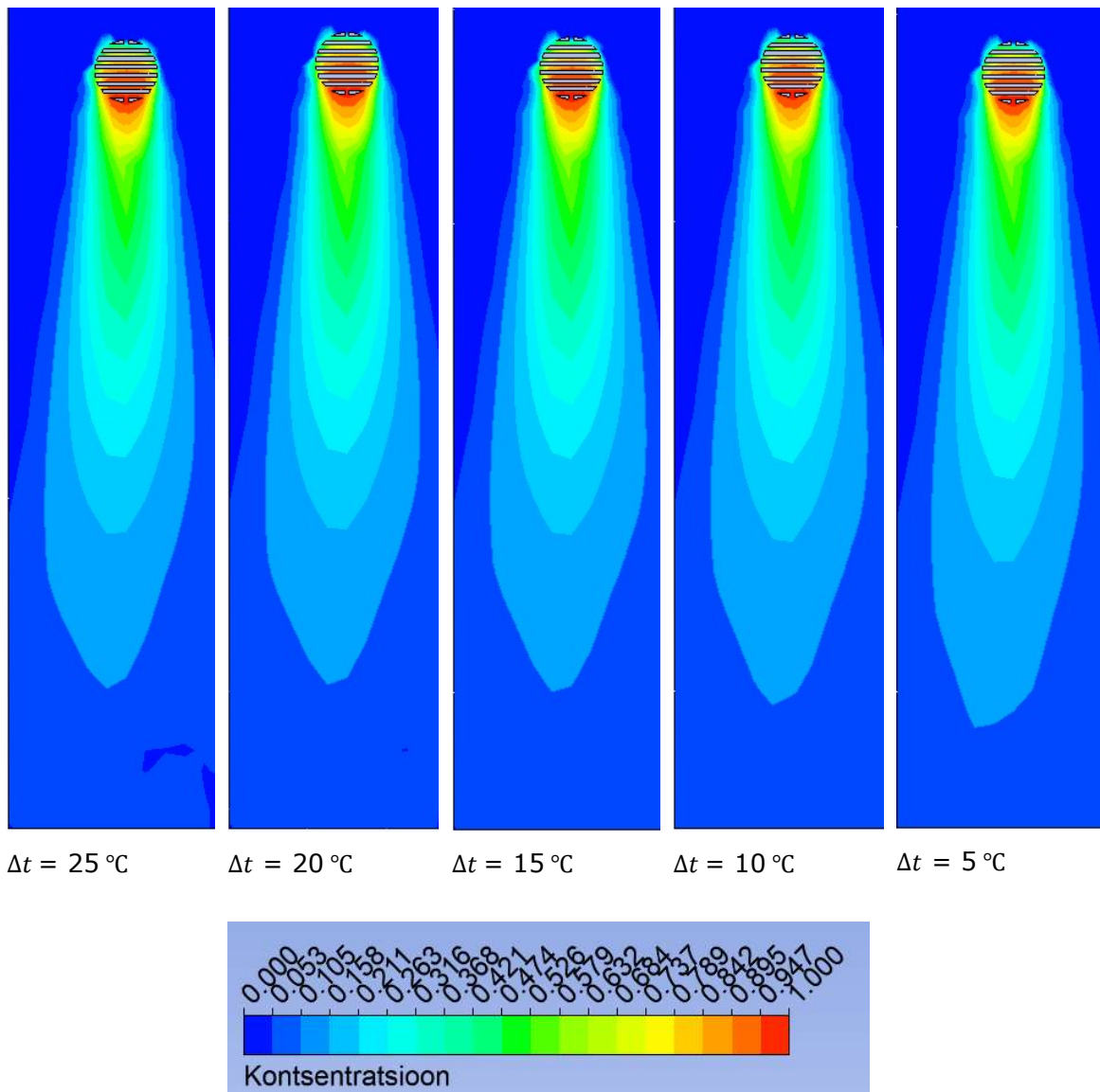
kuni viis kraadi, siis väljaviske õhuvoolu hajumisele temperatuurivahe ei mõju. Pärast selliseid simulatsioone, võib öelda, et kui temperatuurivahe on alla 5 kraadi, siis temperatuur ei mõju saasteainete hajumisele. Kui temperatuurivahe on üle 5 kraadi, siis 4–5 meetri kaugusel seinast tekib karedus ja õhuvool liigub üles.

### 3.4 EX2 heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele

Heitõhu temperatuuride mõju saasteainete hajumisele simuleeritakse mudeliga EX2 k-ε Standard. Keskkonnatemperatuur võrdub nulliga ja heitõhu temperatuur simulatsiooni ajal kasvab. Kõige suurem temperatuurivahe simulatsioonis on  $\Delta t = 25\text{ °C}$ . Iga järgmine samm on 5 kraadi.



Joonis 3.23 EX2 temperatuurivahe külgvaade



Joonis 3.24 EX2 temperatuurivahe eestvaade

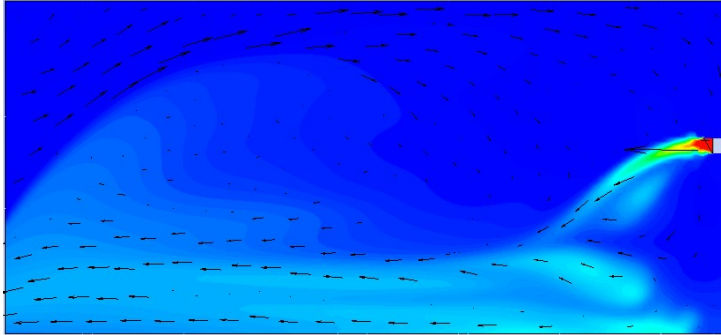
Joonisel 3.24 ja 3.25 on näha erinevad temperatuurivahed. Kõige suurem vahe väljaviskeõhu ja keskkonnaõhu vahel on 25 kraadi. Joonisel on hästi näha, et sellel väljaviskeelemendil temperatuur saasteainete hajumisele ei mõju, nagu eelmisel elemendil EX1. Joonisel 3.25 on näha väike erinevus, kui temperatuuride vahe on 5 kraadi, õhujuga on suunatud rohkem alla võrreldes 25 kraadi suuruse temperatuurivahega. Selles olukorras võib öelda, et sellisel väljaviskeelemendil temperatuuri mõju saasteainete hajumisele puudub, kui võrrelda seda EX1-ga. Kui õhuvool on suunatud seina mööda otse alla, siis temperatuur ei mõju.



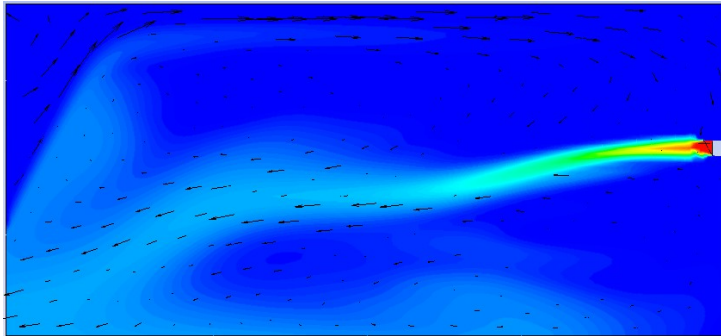
### 3.5 EX1 otsetuule mõju saasteainete hajumisele

Eestis on keskmine tuule kiirus 2-5 m/s. Simuleeritakse nelja erinevat tuuleolukorda: 10 m/s, 5 m/s, 3 m/s ja 1 m/s. Tuul suunatakse otse seinast. Õhu väljaviskekiirus on stabiilselt 2,5 m/s. Temperatuurivahe selles simulatsioonis puudub.

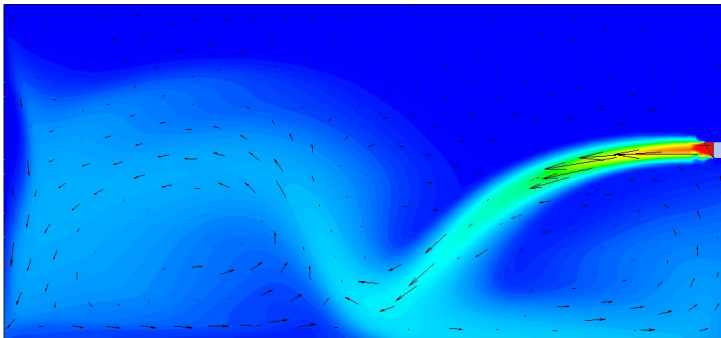
10 m/s



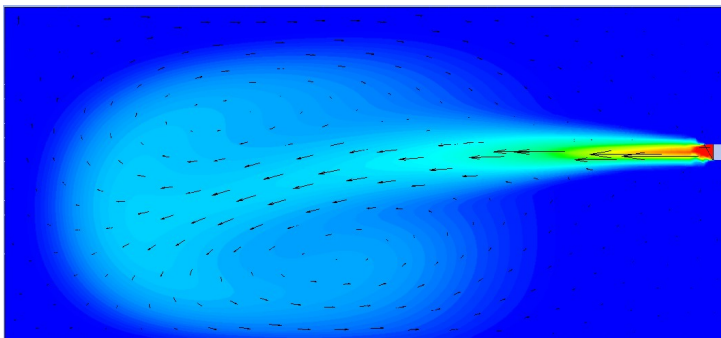
5 m/s



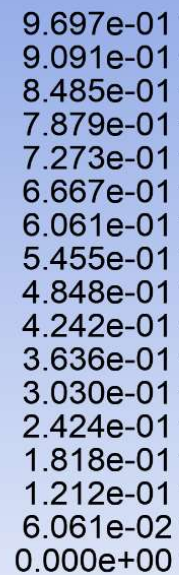
3 m/s



1m/s



Kontsnetratsioon



Joonis 3.25 EX1 otsetuule simulatsioonid

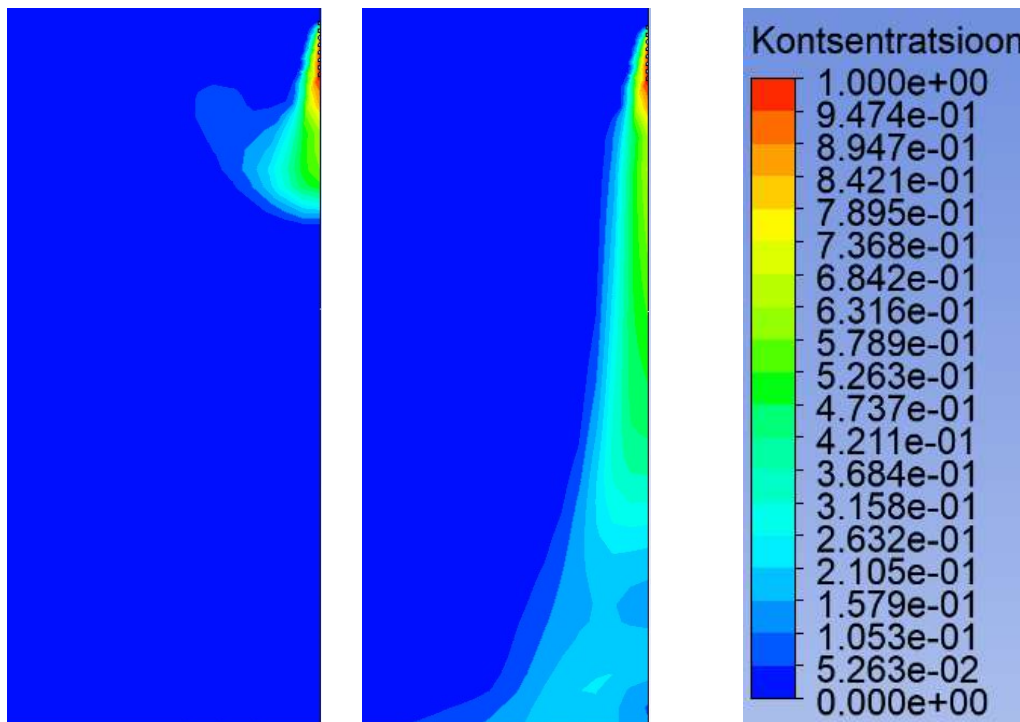
Otsetuule simulatsiooni järgi on näha, et kui tuule kiirus on 10 m/s, siis tuul muudab väljaviskeõhu juga, nii et ühe meetri kaugusel seinast juba õhuvool hajub ja muudab suunda. Sellises olukorras hajuvad saasteained väga kiiresti laiali. Väiksema tuule kiirusega simulatsiooni puhul (5 ja 3 m/s) on näha, et õhuvool on stabiilsem ja suunatakse kaugemale kui üks meeter seinast. Sellises olukorras jääb rohkem saasteaineid väljaviskeelemendi juurde. Aga simulatsioonis, kus tuul on 1 m/s, ei muutu õhuvool sellel olukorras põhimõtteliselt üldse.

### 3.6 EX2 otsetuule mõju saasteainete hajumisele

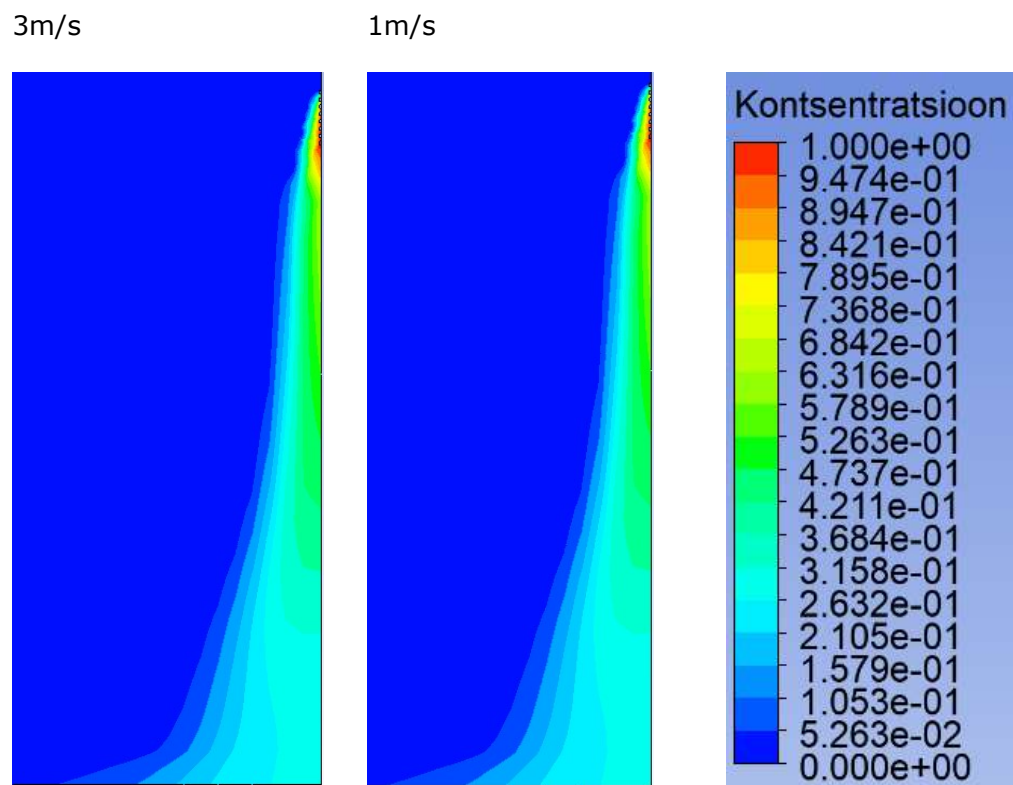
Simuleeritakse nelja tuulekiirust: 10 m/s, 5 m/s, 3m/s ja 1m/s. Tuul suunatakse otse seinast. Õhu väljaviskekiirus on stabiilselt 2,5 m/s. Temperatuuride vahe selles simulatsioonis puudub.

10m/s

5m/s

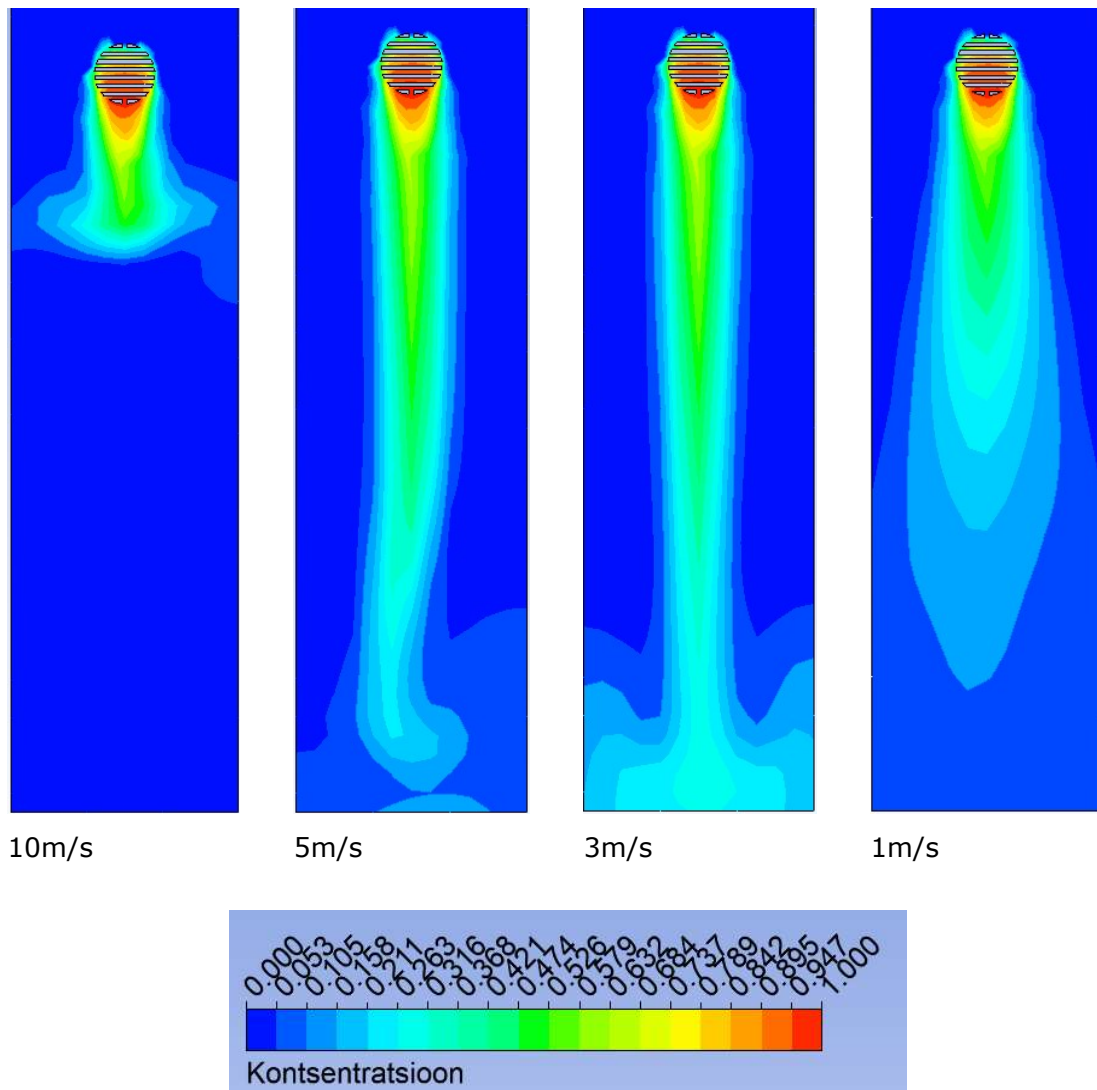


Joonis 3.26 EX2 otsetuul, külgvaade



Joonis 3.27 EX2 otsetuul, külgvaade

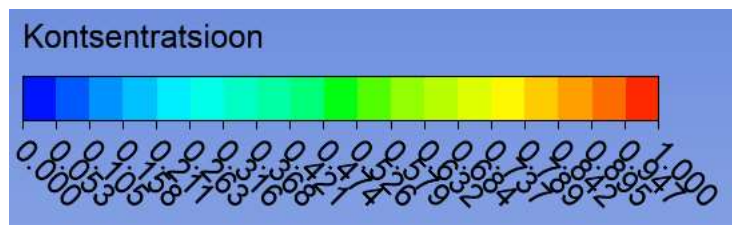
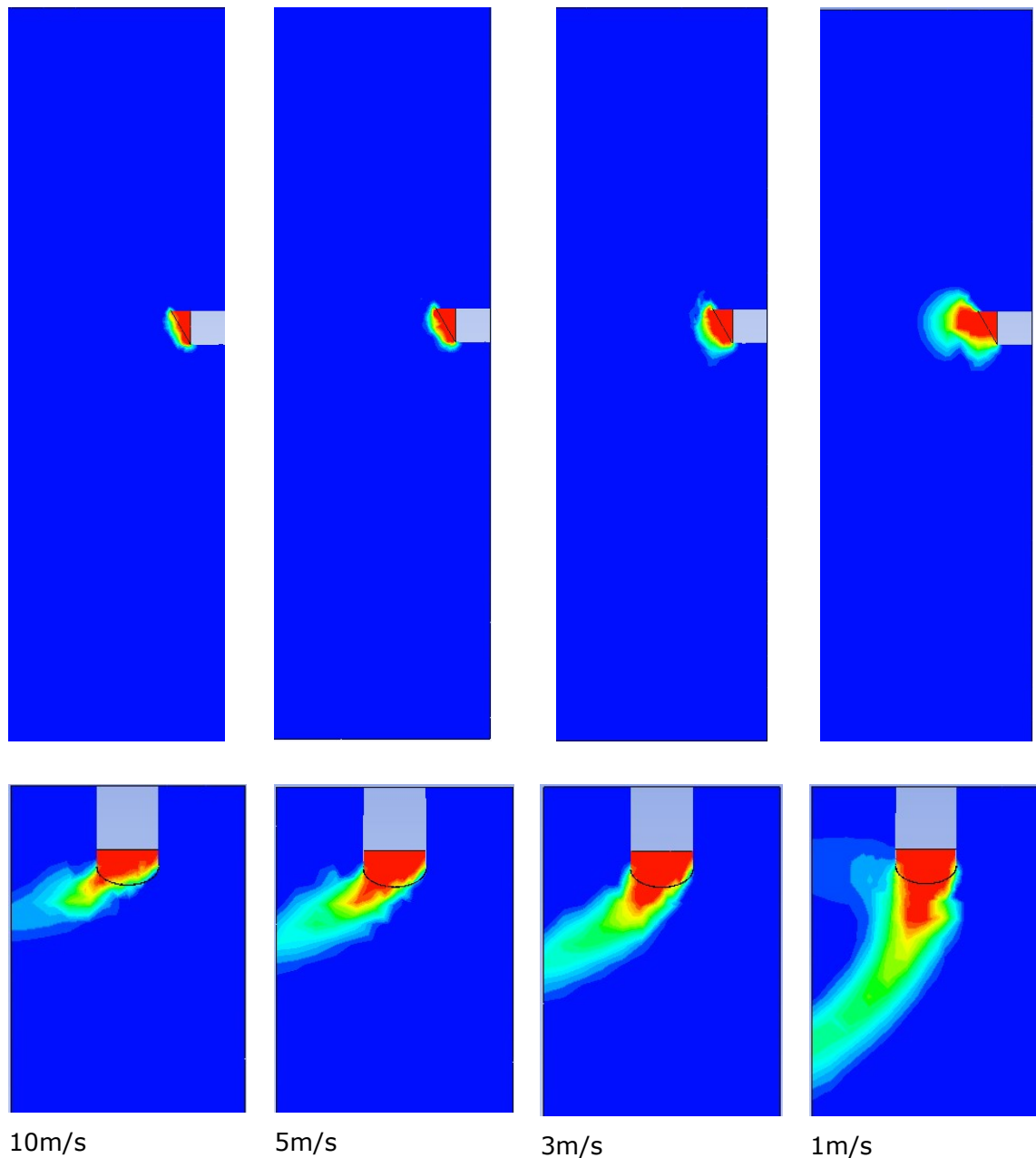
Joonisel 3.26, 3.27 ja 3.28 on näha EX2 erinevad vaated ja tuulekiirused. Simulatsiooni järgi on näha, et otsetuul kiirusega alla 3 m/s ei mõjuta heitõhu hajumist. Vaid tuulekiirusel 10 m/s on näha, et kõik saasteained hajuvad juba vähem kui ühe meetri kaugusel väljaviskeavast. See tähendab, et tuulekiirusel alla 3 m/s hajuvad saasteained seinast kaugemal ja ainult suure tuulekiiruse korral jäävad saasteained 0,6 meetri raadiusse.



Joonis 3.28 EX2 otsetuul, otsevaade

### 3.7 EX1 külgtuule mõju saasteainete hajumisele

Simuleeritakse nelja tuulekiirust: 10 m/s, 5 m/s, 3 m/s ja 1 m/s. Tuul suunatakse selles olukorras küljelt. Õhu väljaviskekiirus on stabiilselt 2,5 m/s. Temperatuuride vahe selles simulatsioonis puudub.



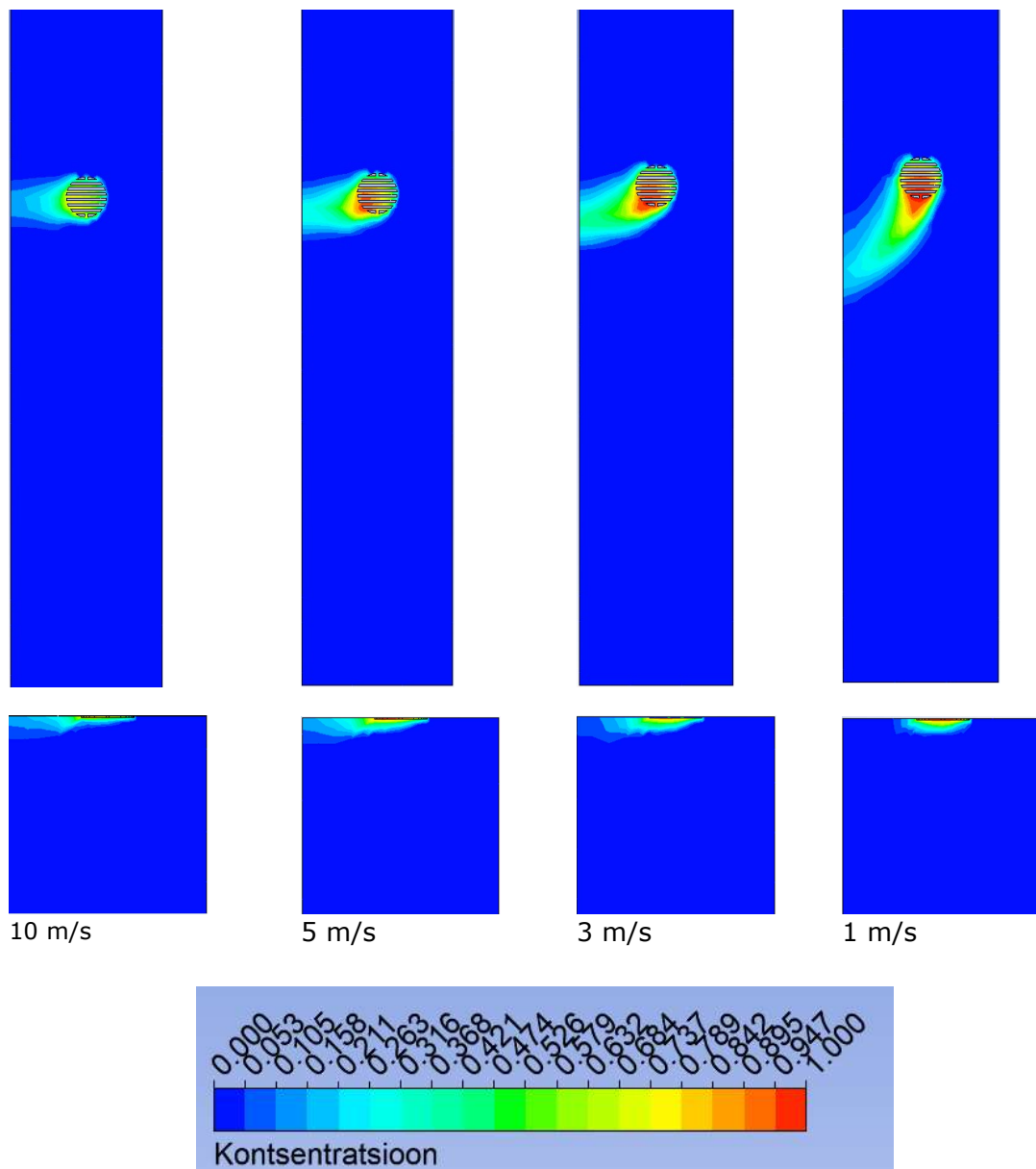
Joonis 3.29 EX1 Külgtuul. Külg- ja pealtvaade

Joonisel 3.29 on näidatud erinevad külgtuule kiirused. Saasteained hajuvad väga kiiresti ja juba külgtuule kiirusel 1 m/s suunatakse juga küljele ja need hajuvad vaid 0,5 meetri kaugusel seinast. Külgtuule kiirusel 10 m/s suunatakse saasteained 90 kraadi küljele ja kõik ained hajuvad 0,3 meetri kaugusel avast. Külgtuul mõjutab kiirusel 1 m/s palju

rohkem kui otsetuul, konkreetselt sellel väljaviskelemendil, kus heitõhk suunatakse otse seinast.

### 3.8 EX2 külgtuule mõju saasteainete hajumisele

Simuleeritakse nelja tuulekiirust: 10 m/s, 5 m/s, 3m/s ja 1m/s. Tuul suunatakse selles olukorras küljelt. Õhu väljaviskekiirus on stabiilselt 2,5 m/s. Temperatuuride vahe selles simulatsioonis puudub.



Joonis 3.30 EX2 Külgtuul. Külg- ja pealtvaade

Joonisel 3.30 on näidatud külgtuul erinevatel kiirustel. Kiirusel 10 m/s ja 5m/s suunatakse saasteained 90 kraadi küljele ja peaaegu kõik hajutakse 0,3 meetri kaugusel avast. Kui külgtuul on 1 m/s, siis pole see nii. Selles olukorras on heitõhk suunatud rohkem seinu mööda alla. Sellel elemendil mõjutab külgtuul saasteaine hajumise muutumist rohkem kui otsetuul.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti välisseinal paiknevate ventilatsiooni heitõhu väljaviskeavade toimivust CFD modelleerimise teel. Antud töös kasutati kahte erinevat seinaväljaviskeelementi ja simuleeriti nende toimivust erinevates tööolukordades. Töö käigus mudelid valideeriti ning simuleeriti heitõhu ja väliskeskonna temperatuuride vahe mõju saasteainete hajumisele, otsetuule mõju saasteainete hajumisele kiirusel 10, 5, 3 ja 1 m/s, ning külgtuule mõju saasteainete hajumisele sama kiirusega nagu otsetuule olukorras. Simulatsioonid on tehtud tarkvara Ansys Workbench tudengiversioonis.

Kõigepealt valideeriti mudelid. Selleks kasutati varem tehtud eksperimendi andmeid. Eksperimendis kasutati väljaviskeelementi ja lisati CO<sub>2</sub> gaasi väljaviskeõhule. Tarkvaras kasutati CO<sub>2</sub> sarnast märkegaasi, mille õige kontsentratsioon leiti simulatsiooni ajal. Sama olukorda modelleeriti tarkvaras ja kasutati väga täpset väljaviskeelementide ehitust. Valideerimise ajal analüüsiti erinevaid turbulentsimudeleid ja saadi tulemusi, et erinevatel väljaviskeelementidel on oma turbulentsi mudel tarkvaras. Väljaviskeelementidel on väga erinev ehitus ja saasteained hajutatakse erinevasse suunda ning sellest sõltub turbulentsimudel. Kui õhuvool on suunatud otse, siis sobib rohkem mudel RNG k- $\epsilon$ ; kui õhuvool on suunatud mööda seinat alla, siis sobib mudel Standard k- $\epsilon$ . Selles etapis saab mudeleid edasi arendada ning sisestada rohkem parameetreid ja andmeid.

Alguses simuleeriti väliskeskonna ja väljaviske heitõhu temperatuuride erinevuse mõju heitõhu hajumise dünaamikale. Olukorras, kus heitõhk on suunatud otse välisseina pinnast eemale ja temperatuuride vahe on alla 5 kraadi, ei muuda see saasteainete hajumise protsessi, erinevus tekib alles üle 10 kraadi suuruse vahe puhul. Heitõhk suunati rohkem üles ja 4–5 meetri juures tekkis kõver – seda oli rohkem näha, kui temperatuuride vahe oli 20–25 kraadi. Teisel elemendil, mille puhul heitõhk suunati seinat mööda alla, polnud temperatuurivahet näha. See tähendab, et temperatuurivahe mõjub rohkem, kui heitõhk on suunatud seinast otse.

Antud töös uuriti otse- ja külgtuule mõju heitõhu hajumisele kahest erinevast väljaviskeseadmest. Analüüsides otsetuulega väljaviskeelementi, millel heitõhk oli suunatud otse, tuvastasid, et tuulekiirusel 10 m/s hajusid saasteained kõige rohkem ja heitõhu juga muutis oma suunda kõige rohkem. Väiksemal tuulekiirusel (5 ja 3 m/s) oli heitõhu joa suund üsna sarnane ilma tuuleta olukorrale. Kui väljaviskeelemendil suunatakse heitõhk seinat mööda alla, siis otsetuul mõjutab seda ainult juhul, kui tuule



kiirus on 10 m/s – siis hajuvad kõik saasteained 0,6 meetri kaugusel avast. Analüüsidest külgtuult, tuvastasin, et suur mõju on juba väiksemal kiirusel (1m/s) ja selles olukorras ei oma väljaviskeelementide ehitus tähtsust.

Järgmistes uuringutes võib modelleerida terve korterelamu seina, kuhu on paigaldatud seina väljaviske elemendid koos õhuvõttu elemendiga. Selle mudeli järgi saab teha simulatsioone erinevates olukordades. Siin saab kombineerida erinevaid variante, kas kõik elemendid on ühesugused või mitte, kus kohas ning mis elementi on parem paigaldada. Selle simulatsiooni alusel võib analüüsida, kas elemendi disain annab suurt mõju reaalses olukorras ning kas standardis kasutatav kaugus on piisav.

Järeldus:

- Temperatuur avaldab mõju saasteainete hajumisele, kui temperatuuri vahe heitõhu ning väliskeskkonna vahel on üle 10 kraadi (ainult elementidel kus õhuvool on suunatud otse seinast).
- Väljaviskeseadme korral, mille puhul heitõhk on suunatud seina mööda alla, temperatuuri mõju saasteainetele ei avalda temperatuur saasteainete hajumisele mõju;
- Külgtuul mõjub saasteainete hajumisele rohkem kui otsetuul. Külgtuul kiirusega 1 m/s mõjutab heitõhu joa levimise suunda ja saasteainete hajumist, samas kui otsetuul samal kiirusel ei mõjuta heitõhu hajumise dünaamikale mõju.
- Otsetuul mõjutab saasteainete hajumist kõige vähem sellise elemendi puhul, mille korral heitõhk on suunatud seina mööda alla.

## SUMMARY

This master's thesis studied, the performance of ventilation exhaust air outlets located on the outer wall was investigated by CFD modeling. In this work, two different wall outlet elements were used and their performance in different working situations was simulated. During the work, the models were validated and simulated the effect of the difference between exhaust air and ambient temperatures on pollutant dispersion, the effect of direct wind on pollutant dispersion at 10, 5, 3 and 1 m / s, and the effect of crosswind on pollutant dispersion at the same speed as direct wind. The simulations are performed in the student version of Ansys Workbench software.

The models were first validated. Data from a previous experiment were used for this purpose. An exhaust element was used in the experiment and CO<sub>2</sub> gas was added to the exhaust air. The software used a CO<sub>2</sub>-like tracer gas, the correct concentration of which was found during the simulation. The same situation was modeled in the software and a very precise construction of the ejection elements was used. During validation, different turbulence models were analyzed and it was found that different ejection elements have their own turbulence model in the software. The ejection elements have very different constructions and the pollutants are dispersed in different directions, and the turbulence model depends on it. If the airflow is directed directly, the model RNG k- $\epsilon$  is more suitable; if the airflow is directed down the wall, the Standard k- $\epsilon$  model is suitable. At this stage, the models can be further developed and more parameters and data entered.

Initially, the effect of the difference between the ambient and exhaust air temperatures on the dynamics of exhaust air dispersion was simulated. In a situation where the exhaust air is directed directly away from the surface of the outer wall and the temperature difference is less than 5 degrees, this does not change the process of pollutant dispersion, the difference only occurs for a difference of more than 10 degrees. The exhaust air was directed more upwards and a curve was formed at 4-5 meters - this was more visible when the temperature difference was 20-25 degrees. The second element, in which the exhaust air was directed down the wall, did not show a temperature difference. This means that the temperature difference has a greater effect if the exhaust air is directed directly from the wall.

In this work, the effect of direct and crosswinds on the dispersion of exhaust air from two different exhaust devices was investigated. Analyzing the direct wind exhaust element with the exhaust air directed directly, I found that at a wind speed of 10 m / s

the pollutants dispersed the most and the exhaust air jet changed its direction the most. At lower wind speeds (5 and 3 m / s), the direction of the exhaust air jet was quite similar to the situation without wind. If the exhaust air is directed down the wall on the exhaust element, it will only be affected by the direct wind if the wind speed is 10 m / s - then all pollutants will be dispersed 0.6 m away from the opening. Analyzing the crosswind, I found that the high impact is already at a lower speed (1m / s) and in this situation the construction of the exhaust elements is not important.

In the following studies, the whole wall of an apartment building with wall outlet elements together with an air intake element can be modeled. According to this model, simulations can be made in different situations. Here you can combine different options, whether all the elements are the same or not, where and which element is better to install. Based on this simulation, it can be analyzed whether the design of the element has a great impact in a real situation and whether the distance used in the standard is sufficient.

Conclusion:

- The temperature has an effect on the dispersion of pollutants if the temperature difference between the exhaust air and the outside environment is more than 10 degrees (only for elements where the air flow is directed directly from the wall).
- In the case of an exhaust device where the exhaust air is directed down the wall, the effect of temperature on the pollutants does not affect the dispersion of the pollutants;
- Crosswinds affect the dispersion of pollutants more than direct winds. A crosswind at a speed of 1 m / s affects the direction of propagation of the exhaust air jet and the dispersion of pollutants, while a direct wind at the same speed does not affect the dynamics of the exhaust air dispersion.
- Direct wind has the least effect on the dispersion of pollutants in the case of an element where the exhaust air is directed down the wall.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] ASHRAE Fundamentals Handbook, USA, 2005
- [2] Kuborn X, Influence of horizontal mounted flue gas exhaust systems on indoor air quality, 2020
- [3] P. Broas, Wind tunnel investigation of waste air re-entry with wall ventilation, 1993
- [4] Meier T, Välisseinal paiknevate ventilatsiooni õhuvõtu- ja väljaviske elementide minimaalse vahekauguse määramine, 2020
- [5] Ü. Palmiste, J. Kurnitski, H. Voll, Design criteria for outdoor air intakes and exhaust air outlets located on an external wall, 2020
- [6] Parker C.A, Improving the Effectiveness of In-Suite Ventilation Systems with Respect to Cross Contamination and Odour Transmission in MURBs, 2012
- [7] Ü. Palmiste, T. Meier, J. Kurnitski, H. Voll Experimental testing of exterior wall mounted mechanical ventilation exhaust air outlet devices, 2021
- [8] EVS-EN 13779:2007 Standard. Mitmeeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele (2007)
- [9] EVS 906:2018 Standard Mitmeeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017
- [10] Minimising pollution at air intakes, Technical Memoranda TM21: 1999
- [11] NPC välisseina paigaldatav väljavisketoru. Kättesaadav: [https://www.etsnord.ee/wp-content/uploads/2015/12/08\\_NORDexternal\\_1118\\_ee.pdf](https://www.etsnord.ee/wp-content/uploads/2015/12/08_NORDexternal_1118_ee.pdf)
- [12] PANEIR välisrestid. Kättesaadav: <https://paneir.eu/en>
- [13] Blocken B, Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations, 2015
- [14] Moonen P, Defraeye T, Dorer V, Blocken B, Carmeliet J, Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand, 2012

- [15] Tajnesaie M, Nodoushan EJ, Barati R, Moghadam MA, Performance comparison of four turbulence models for modeling of secondary flow cells in simple trapezoidal channels, 2018
- [16] Shaheed R, Mohammadian A, Gildeh H.K, A comparison of standard  $k-\epsilon$  and realizable  $k-\epsilon$  turbulence models in curved and confluent channels, 2019
- [17] USSV välisrest. Kättesaadav: <https://www.flaktgroup.com/en/products/air-management-atds/external-louvres-cowls/air-intake-exhaust-air-louvres/ussv-circular-louvre/>
- [18] ANSYS Fluent Tutorial Guide 18.0, 2017
- [19] Palmiste Ü, Experimental testing of exterior wall mounted mechanical ventilation exhaust air outlet devices
- [20] Mirzaei P.A, CFD modeling of micro and urban climates Problems to be solved in the new decade, 2021
- [21] ANSYS Fluent Theory Guide 2021 R1, 2021