



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**LINNARUUMI DIGIANDMETE KASUTAMINE  
ÕHUREOSTUSE ANALÜÜSIS: TALLINNAS  
MERIMETSA PIIRKONNA NÄITEL**

**USE OF URBAN AREA DIGITAL DATA IN THE ANALYSIS  
OF AIR POLLUTION: THE EXAMPLE OF TALLINN  
MERIMETSA AREA**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mark Skljarov

Üliõpilaskood 192640

Juhendaja: Janek Laanearu

# 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.

27. november 2023

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

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

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....  
/ nimi ja allkiri /

# LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Mark Skljarov,**

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

## **Linnaruumi digiandmete kasutamine õhureostuse analüüsis: Tallinnas Merimetsa piirkonna näitel,**

mille juhendaja on **Janek Laanearu**

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.

27.11.2023 (kuupäev)

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **MARK-ANDRIAN SKLJAROV**

Üliõpilaskood **192640**

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peaeriala: Ehitusmajandus ja juhtimine

Lõputöö teema:

**LINNARUUMI DIGIANDMETE KASUTAMINE ÕHUREOSTUSE ANALÜÜSIS:  
TALLINNAS MERIMETSA PIIRKONNA NÄITEL**

**USE OF URBAN AREA DIGITAL DATA IN THE ANALYSIS OF AIR POLLUTION:  
THE EXAMPLE OF TALLINN MERIMETSA AREA**

Juhendaja: **Janek Laanearu**

Janek.Laanearu@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja Perekonnanimi	Kontakt (e-post või telefon)	Allkiri ja kuupäev
Täisprofessor tenuuris, Irene Lill	Irene.Lill@taltech.ee	_____
Ekspert - Liginullenergiahoonete uurimisrühm, Ülar Palmiste	Ular.Palmiste@taltech.ee	_____
		_____

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida õhuruumi lisamise vajalikkust digikaksikule, mis võimaldab linna õhuliikumise, sealhulgas reostuse simuleerimist ja vastavalt sellele paremate linnaruumi planeerimise otsuste tegemist lähtuvalt linnaelanike tervisest ja heaolust.
2. Uurida võimalusi vähendada õhuruumi õhusaaste leviku arvutamise mahulisust ja ajakulu, et võimaldada õhuruumi lisamine digikaksikule ja simulatsioonide kasutatavust.

Töö keel: eesti keel

# SISUKORD

SISUKORD .....	5
EESSÕNA .....	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. ÕHUSAASTE SEADUSANDLUS JA NÄITAJAD .....	11
1.1. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Eestis ja Euroopa Liidus .....	11
1.1.1. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Eestis .....	11
1.1.2. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Euroopa Liidus.....	14
1.2. Euroopa Liidu programmid õhusaaste vähendamiseks .....	17
1.3. Õhukvaliteedi mõõtmine Tallinnas ja lähiümbruses .....	18
2. LINNA DIGIKAKSIKU MUDEL .....	21
2.1. Digitaalne kaksik targas linnas .....	21
2.2. Tallinna digikaksik ja selle tulevikuväljavaated .....	23
3. Numbriliste mudelite rakendamine linnaruumi õhuleviku simuleerimisel .....	25
3.1. Numbrilise modelleerimise olemus .....	25
3.2. Numbriliste mudelite rakendamine õhusaaste modelleerimisel ja ehitiste arhitektuuri kujundamisel.....	28
4. Õhusaaste levik Merimetsa asumi näitel .....	32
4.1. Piirkonna valik.....	32
4.2. Allika mõjuala arvutamine .....	35
4.2.1. Üldised põhimõtted.....	35
4.2.2. Õhusaaste erinevates ilmastikutingimustes .....	39
4.2.3. Mõjuala arvutamine teoreetiliselt .....	41
4.2.4. Mõjuala erinevates ilmastikutingimustes.....	44
4.3. Lahenduse koostamine .....	49
4.3.1. Geomeetriliste andmete laadimine .....	49
4.3.2. Geomeetriliste andmete teisendamine, puhastamine ja täiendamine .....	50
4.3.3. Täiendatud geomeetriliste andmete eksportimine.....	51
4.3.4. Õhuruumi võrgu loomine .....	51
4.3.5. Õhusaaste leviku simulatsiooni lahend .....	57
4.4. Võrgu ja simulatsiooni arvutus .....	61
5. Tulemused ja õhusaaste leviku simuleerimise täpsuse tõstmine .....	64
5.1. Merimetsa õhusaaste leviku arvutamise tulemused .....	64

5.1.1. Õhusaaste levik tänavapoolse tuulega suvel.....	64
5.1.2. Õhusaaste levik merepoolse tuulega suvel .....	65
5.1.3. Õhusaaste levik tuuleta temperatuuri stratifikatsiooni korral .....	67
5.2. Simulatsiooni tulemuste asjakohasus ja täpsuse suurendamine .....	68
5.3. Järeldused .....	70
KOKKUVÕTE .....	72
SUMMARY .....	75
KASUTATUD KIRJANDUS .....	77

## EESSÕNA

Magistritöö koostamisel sai määravaks autori varasem kogemus vedelikudünaamika simulatsioonide koostamisel ja tulemuste analüüsimisel Tallinna Tehnikaülikooli projektides kaasprofessor Janek Laanearu juhendamisel. Käesolev töö rakendab varasemalt ventilatsiooni- ja küttesüsteemide eksperdi, Ülar Palmiste loodud õhusaaste linnakanjoni arvutusmudelit, mida autor on kohandanud ja täiendanud, et see vastaks käesoleva töö nõuetele. Töö autor on kasutanud arvutusliku vedelikudünaamika mudelit temperatuuri järgi pöördkihistunud olukorras saasteaine leviku arvutamiseks.

Käesoleva töö autor väljendab tänu juhendajale Janek Laanearu, kes on alati olnud toeks ning nõus arutama erinevate rakenduste teostatavust. Täna samuti ka Tallinna Tehnikaülikooli HPC klatri spetsialiste, tänu kellele sai võimalikuks kasutada superarvuti ressursse võrdlemisi mahukate arvutussimulatsioonide koostamiseks ning tänu sellele suurendada modelleerimistulemuste täpsust ja vähendada reaalaega.

Magistritöö keskendus Merimetsa piirkonnale Tallinnas, täpsemalt selle linnaasumi kanalisatsiooni tuulutuspüstakute uuringute toetamisele Tallinna Tehnikaülikoolis. Töö teema valikut innustas käesoleva töö autorit samuti Euroopa Uue Bauhausi initsiatiiv, mille keskmes on jätkusuutliku ja integreeritud linnaruumide loomine.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

BIM	ehitusinformatsioon ( <i>Building Information Modeling</i> )
CFD	arvutuslik vedelike dünaamika ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
EL	Euroopa Liit
GIS	geograafiline infosüsteem ( <i>Geographical Information System</i> )
GMP	Gaussi jaotusega saastejoo mudel ( <i>Gaussian Plume Model</i> )
IoT	asjade internet ( <i>Internet of Things</i> )
RANS	( <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> )
WHO	Maailma terviseorganisatsioon ( <i>World Health Organization</i> )
$P_g$	gaasi rõhk (Pa)
$V_g$	gaasi ruumala ( $m^3$ )
$n_g$	gaasi hulk moolides
R	universaalne gaasikonstant
T	absoluutne temperatuur (K)
$V_m$	molaarruumala ( $m^3$ )
$\sigma_y$	horisontaalne standardhälve (m)
$\sigma_z$	vertikaalne standardhälve (m)
$U_t$	keskmise tuule kiirus (m/s)
Q	saasteallika tugevus (g/s)
$v_t$	vooluhulk ( $m^3/s$ )
W	süsteemi töö (J)
$Q_{suvi}$	saasteallika tugevus suvel (kg/s)
F	ujuvusvoog ( $m^4/s^3$ )



## SISSEJUHATUS

Õhusaaste on üks peamisi inimese tervist ja keskkonda ohustavaid faktoreid. Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) teatel on see Euroopa Liidu (EL) üks olulisemaid terviseriske, mis toob endaga kaasa sadadesse miljarditesse ulatuvad tervishoiukulud [1]. Atmosfääri sattuvate gaaside, tolmuosakeste ja suitsu tulemusena saastub õhk, mis avaldab negatiivset mõju ka infrastruktuurile. Peamise riskipiirkonnad on linnad ning nendes elavad inimesed. Suurem rahvastikutihedus, maanteetransport ning halvemini hajuv reostus suurendavad õhusaaste kontsentratsiooni. Kuni 96% linnades elavatest EL-i kodanikest puutuvad kokku tervisele kahjulikuks peetavate õhusaasteainete tasemetega [1].

Linnad on kujunemas inimtegevuse peamisteks keskusteks, mis hõlmavad lisaks tavapärasele töökohtadele muuhulgas ka innovatsiooni ja vabaaja tegevusi. 2050. aastaks moodustab Euroopas linnastumise määr ligi 84% [2]. Sellega seoses on linnade planeerimine muutumas üksikasjalikumaks ja läbimõeldumaks, kus rakendatakse mitmeid digitaalseid tööriistu. Üks nendest on linna digikaksik, mis võimaldab jäljendada füüsilist maailma digitaalselt ning seeläbi parandada linna funktsioone, toimivust ja planeerimist. Digikaksikud on aga seni keskendunud suuresti hoonete ja linna taristutele ning ei hõlma õhuruumi, mis võimaldaks simuleerida õhureostuse levikut erinevate stsenaariumite korral linnas ning vastavalt sellele parandada elanikke heaolu ning anda kõikehõlmavamad ja visualiseeritavat sisendit hoonete ja rajatiste projekteerimisele.

Käesoleva magistr töö eesmärgiks on uurida õhuruumi lisamise vajalikkust digikaksikule, mis võimaldab linna õhuliikumise, sealhulgas reostuse simuleerimist ja vastavalt sellele paremate linnaruumi planeerimise otsuste tegemist lähtuvalt linnaelanike tervisest ja heaolust. Kuivõrd linna õhuruumi ja saasteaine levimise simulatsioonide arvutused on väga aeganõudvad, siis soovitakse käesoleva tööga samuti uurida võimalusi vähendada linnaruumi õhusaaste leviku arvutamise mahulisust ja ajakulu, et võimaldada õhuruumi lisamine digikaksikule ja numbriliste arvutusmodelite simulatsioonide kasutatavus.

Linnas esineb mitmeid saasteallikaid ning käesolevas töös keskendutakse konkreetsemalt linna kanalisatsiooni tuulutuspüstakutest väljuvale õhusaastele, millest üheks oluliseks saasteaineks on ka väävelvesinik ( $H_2S$ ). Otsus väävelvesiniku leviku modelleerimiseks oli vajalik, sest tegemist on linnaruumi õhusaaste uurimisel võrdlemisi vähetuntud temaga. Tuulutuspüstakud on enda olemuselt lokaalse mõjuga, sest need on püsiva asukohaga ja paiknevad üle terve linnaala. Samuti teostatakse magistr töö koostamise ajal koostöös

Tallinna vee-ettevõttega (AS Tallinna Vesi) püstakutest väljuvate ainete, sealhulgas väävelvesiniku, moodsustusi (Sihtasutus Eesti Teadusagentuur, projekt PRG1487 [3]). Moodsustusi teostatakse samas püstikus, mida käesolevas töös modelleeritakse ning magistritööd on seega võimalik hiljem täiendavalt siduda mõõtmistulemustega. Käesoleva magistritöö koostamise aastal valmis ka Tallinna Linna Ühisveevärgi ja -Kanaliseerimise Arendamise Kava aastateks 2023-2034 [4].

Magistritöö koosneb viiest osast. Esimeses osas tutvustatakse õhusaaste seadusandlust Tallinna, Eesti ja Euroopa Liidu määratluses. Teises osas tutvustatakse linnaruumi digikaksiku koostamise üldpõhimõtet ning Tallinna digikaksiku tulevikuväljavaateid. Magistritöö kolmandas osas keskendutakse CFD simulatsioonide teostamiseks rakendatavaid hüdro- ja aeromehaanika põhimõtteid ning nende kasutatavust linnaruumi õhusaaste leviku modelleerimisel. Neljandas osas keskendutakse õhusaaste leviku ja simulatsioonide loomise kirjeldamisele Merimetsa piirkonna näitel. Viiendas peatükis analüüsitakse tulemusi ning tuuakse välja tulevikuväljavaated ja arvutustäpsust suurendavaid ettepanekud.

**Võtmesõnad:** õhureostus, digikaksik, CFD, simulatsioonid, linnaosa

# **1. ÕHUSAASTE SEADUSANDLUS JA NÄITAJAD**

## **1.1. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Eestis ja Euroopa Liidus**

### **1.1.1. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Eestis**

Atmosfääriõhu kaitse seaduse kohaselt on saasteaine igasugune välisõhus esinev aine või ainete segu, millel võib olla ebasoodne mõju inimese tervisele või keskkonnale. Seadus sätestab samuti õhukvaliteedi tasemed, piirväärtused ja sihtväärtused. Piirväärtuse ületamise korral loetakse tekkinud olukorda oluliseks keskkonnahäiringuks. Reostuse vähendamiseks kehtestatakse sihtväärtused, mis on soovitatavad reostuse taseme väärtused, mille poole reostuse tekitaja peab suunduma. Nende ületamise korral on vajalik mõistlike ja asjakohaste meetmetega võimalikult kiiresti saavutada. Seejuures peab olema saavutamine kooskõlas proportsionaalsete kulutustega [5].

Saastetase, mis mõjutab olulisel määral inimest, nimetatakse õhukvaliteedi häiretasemeks. See kujutab olulist ohtu inimese tervisele ja selle saavutamisel on vajalik rakendada viivitamatult kaitsemeetmeid. Kliimaministerium määrab riiklikul tasandil õhukvaliteedi hindamiseks referentslabori. Referentslabori ülesanneteks on riiklikul tasandil välisõhu kvaliteedi hindamine, erinevate mõõtesüsteemide analüüsimine ja nende täpsuse tagamine, Euroopa Komisjoni korraldatavates õhukvaliteedi hindamise programmide koordineerimine ja nendest osavõtmine, õhukvaliteedi andmete kogumise ja esitamise kvaliteedi tagamine ning avalikkuse teavitamine õhukvaliteedi tasemest [5].

Õhukvaliteedi hindamisel võetakse arvesse saasteaine ebasoodsa mõju võimalikkust, saasteaine ohtlikkust, saasteainete esinemissagedust välisõhus, mõju inimese tervisele ja keskkonnale tervikuna. Õhukvaliteeti juhitakse ja hinnatakse mitme saasteaine suhtes. Saasteainete piirväärtused määrab Kliimaministerium. Atmosfääri õhu kaitse seaduse alusel on vajalik õhusaaste juhtimisel ja hindamisel võtta arvesse järgmised saasteained: väevliühendid, lämmastikoksiidid, peenosakesed, eriti peened osakesed, plii, osoon, benseen, süsinikoksiid, benso(a)püreen, kaadmium, arseen, nikkel, elavhõbe [5]. Käesolev magistritöö keskendub väevliühenditele, täpsemalt kanalisatsiooni tuulutuspüstakutest põhjustatud vesiniksulfiidi ehk divesiniksulfiid (H<sub>2</sub>S) levikule.

Saasteainete piirmäärad erinevad lähtuvalt saasteaine tekitajast. Üldised piirväärtused on kajastatud Keskkonnaministri määruses nr 75 "Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, õhukvaliteedi muud piirnormid ning õhukvaliteedi hindamiskiirid", mille alusdokumendiks on Euroopa Liidu direktiiv 2008/50/EÜ. Tähtis on märkida, et seadmetele, mis paiskavad õhku rohkem kui 1 tonni aastas väevliühendeid kehtib erikord ning vajalik on taotleda luba ja koostada heitkoguse projekt (LHK) [6].

Kliimaministeriumi poolt seadmetele esitatud väevliühendite piirväärtused on leitavad tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Väevliühendiga saasteaine koguse piirmäärad reostusallikatele ja seadmetele [6]

Saasteaine	Suurim kogus (tonni aastas)
Väeveldioksiid (SO <sub>2</sub> )	<1
Divesiniksulfiid (H <sub>2</sub> S)	<1

Täpsemalt reguleerib väevvelvesinikku aga Keskkonnaministri määrus nr 75 „Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, õhukvaliteedi muud piirnormid ning õhukvaliteedi hindamiskiirid“ (RT I, 29.12.2016, 44). Selle kohaselt on vesiniksulfiidi piir- ja sihtväärtus on 1 tunni mõõdetud keskmise kohta 8 µg/m<sup>3</sup> [6].

Tabel 1.2. Vesiniksulfiidi piir- ja sihtväärtused õhus [7]

			Õhukvaliteedi piirväärtus/sihtväärtus µg/m <sup>3</sup>	
Saasteaine	CAS-nr	Valem	Ühe tunni keskmine	24 tunni keskmine
Vesiniksulfiid	2148878	H <sub>2</sub> S	8	-

Vabariigi Valitsuse 18. septembri 2001. a määrus nr 293 „Töökeskonna keemiliste ohutegurite piirnormid“ (RT I 2007, 55, 369) kohaselt on olemas väevvelvesiniku piirnorm.

Tabel 1.3. Vesiniksulfiidi piir- ja sihtväärtused õhus [8]

Aine (CAS-number)	Piirnorm mg/m <sup>3</sup>	Piirnorm ppm	Lühiajalise kokkupuute piirnorm või piirnormi lagi mg/m <sup>3</sup>	Lühiajalise kokkupuute piirnorm või piirnormi lagi ppm
Vesiniksulfiid (7783-06-4)	14	10	20*	15*

\* Ohtliku kemikaali maksimaalne lubatud sisaldus õhus, millega töötaja kokku puutub [7].

Õhusaaste informatsioon peab olema avalikkusele kättesaadav ning selle eest vastutab Kliimaministeerium, kes peab oma veebilehe kaudu andma pidevat ajakohastatud ja õigeaegset teavet saasteainete sisaldumise kohta õhus, õhukvaliteedi piirnormide ületamise ja saasteainete maapinnale sadestumise kohta. [5]. On selge, et õhusaastet ja selle levikut näitlikustavad tööriistad ja vahendid on vajalikud mitte ainult piiratud inimeste ringile nagu valdkonna spetsialistid vaid ka laiemalt.

Olulisel kohal on avalikkuse teavitamine, kui õhukvaliteedi häire- või teavitamistase on ületatud. Teavitamiseks tuleb kasutada erinevaid kanaleid, et tagada teabe kohalejõudmine mõjutatud isikuteni. Mõõtmisega tuvastatud häire- või teavitamistaseme ületamise korral tuleb avaldada andmed ületamise koha, taseme liigi, algusaja ja kestuse kohta. Prognoositava koguse ületamise korral tuleb avaldada andmed ületamise koha, õhukvaliteedi taseme muutumise trendi ja muutumise põhjuste kohta. Lisaks tuleb avaldada teave mõjutatavate elanikkonnarühmade, võimalike sümptomite, soovitatavate ettevaatusabinõude ja täiendava teabe saamise kohtade kohta. [5].

Tihti esineb aga õhus ebameeldiva ja ärritava lõhnaga aineid. Kui Keskkonnaamet tuvastab häiringutaseme ületamise, peab heiteallika käitaja koostama lõhnaaine esinemise vähendamise kava, mis sisaldab mitmeid olulisi punkte, nagu näiteks eraldumist põhjustavate tegevusalade kirjeldus, ümbritseva piirkonna andmed, rakendatud ja plaanitavad meetmed jne. Lõhnaaine esinemise vähendamise kava tuleb esitada Keskkonnaametile heakskiitmiseks ja see võidakse edastada ka kohalikule omavalitsuse üksusele arvamuse avaldamiseks [5].

Õhukvaliteedi kontrolliks ja pidevaks olukorra parandamiseks koostatakse õhukvaliteedi parandamise kava. Kava koostajaks on kohalik omavalitsus ning selle käigus lepatakse heiteallikate käitajatega kokku õhukvaliteedi parandamise meetmed ja nende rakendamise tähtajad. Kava sisaldab saasteainete heitkoguste vähendamise eesmärgi ja prioriteetseid tegevusi, mis on osa kohaliku omavalitsuse arengukavast. Kui õhukvaliteedi parandamise kava on koostatud, teavitatakse sellest kohalikku omavalitsust ja kava ajakohastatakse iga viie aasta järel [5].

Samuti koostatakse saasteainete parandamise osas kontseptsioone. 2017. aastal Kliimaministeeriumi poolt tellitud "Välisõhu mitteesmatähtsate saasteainete piirnormide uue kontseptsiooni välja töötamine" on üks sellistest. Töös toodi ka esile, et andmebaasides olemasolev vesiniksulfiidide saasteallikate arv või heitkogused olid alahinnatud ning ei vastanud reaalsusele [9]. Täpsem näide mõõtmistulemuste ületamise osas esinesid tselluloositehases Horisont. Mõõtmistulemused näitasid kõrget vesiniksulfiidi emissiooni taset

reoveepuhastist ja kompostimisväljakult. Tulemusena koostas ettevõtte vesiniksulfiidi vähendamise tegevuskava [10].

Atmosfääriõhu kaitse seadus eristab kahte tüüpi saasteallikaid: lokaalseid ja liikuvaid. Igale nendest on määratletud täpsed protseduurid. Käesolev magistritöö keskendub lokaalsele saasteallikale. Kui lokaalse õhusaaste käitise tegevus on seotud saasteainete väljutamisega välisõhku, siis on vajalik õhusaasteluba, mille raames kehtestatakse käitaja omanikule mitmed piirangud ja sihtarvud õhusaaste väljutamisele [5].

Riigi territoorium jaguneb õhukvaliteedi taseme järgi õhukvaliteedi piirkondadeks ja linnastuteks. Õhukvaliteeti juhitakse ja hinnatakse kõigis õhukvaliteedi piirkondades ja linnastutes seadusega määratud saasteainete suhtes. Linnastuks loetakse piirkond, kus elanike arv on üle 250000 või kus elanike arv on sellest väiksem, arvestades asustustihedust ruutkilomeetri kohta. Õhukvaliteedi piirkondade jaotus ja linnastute määratlemine toimub valdkonna eest vastutava ministri määrusega [5].

### **1.1.2. Õhusaastet käsitlev seadusandlus Euroopa Liidus**

Eesti õhusaastet reguleeriv seadusandlus tuleneb Euroopa Liidu direktiividest. Euroopa Liidus reguleerivad õhusaastet kaks direktiivi: 2004/107/EÜ ja 2008/50/EÜ. Direktiiv 2004/107/EÜ keskendub raskemetallide ja orgaaniliste ühendite reguleerimisele välisõhus [5]. 2008/50/EÜ keskendub välisõhu kvaliteedi ja puhtama õhu saavutamisele Euroopas [6]. Lisaks nendele reguleerib direktiiv 2016/2284, mille eesmärk on vähendada riigisiseste õhusaasteainete koguseid. Direktiiviga 2016/2284 muudeti direktiivi 2003/35/EÜ ja tunnistati kehtetuks direktiiv 2001/81/EÜ [11].

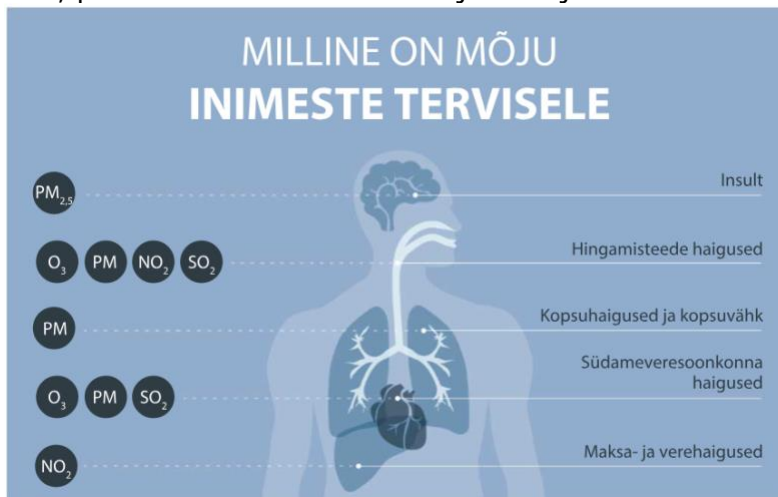
Direktiiv 2004/107/EÜ näeb ette, et liikmesriigid peavad hindama saasteainete kontsentratsioone välisõhus pidevate mõõtmiste või objektiivsete hindamistehnikate abil. Direktiivis on samuti sätestatud proovide võtmiseks ja analüüsimiseks kasutatavad konkreetsed meetodid ning proovivõtukohtade asukohad ja minimaalne arv, sealhulgas õhukvaliteedi simuleerimise mudelite nõuded. Mudeli sobivust hinnatakse muuhulgas modelleerimise määramatusega. Määramatus on määratletud kui mõõdetud ja arvutatud kontsentratsioonitasemete maksimaalne kõrvalekalle terve aasta jooksul, väljaarvatud sündmuste ajastust. Õhusaaste modelleerimist võib kasutada välisõhu kvaliteet piirkondades ja linnastutes, kus tasemed tüüpilise perioodi jooksul jäävad direktiivis sätestatud piirmäärade ülemise ja alumise hindamisläve vahele. Ainult modelleerimist on võimalik kasutada kohtades,

kus õhusaaste tasemed tüüpilise perioodi jooksul jäävad direktiivis sätestatud piirmäärade alumisest hindamislävest alla [12].

Direktiivi kohaselt peavad liikmesriigid võtma kasutusele vajalikud meetmed, et tagada piirväärtuste järgimine kindlaksmääratud aja jooksul. Samuti edendatakse õhukvaliteedi eesmärkide integreerimist teistesse asjakohastesse valdkondadesse, nagu transport, tööstus ja põllumajandus, et õhukvaliteedi parandamiseks võetavad meetmed oleksid järjepidevad ja kooskõlastatud erinevates sektorites, suurendades seeläbi nende tõhusust [12].

Direktiiviga käsitletavat saasteained on mürgised ja kantserogeensed ning võivad koguneda keskkonda, põhjustades pinnase ja vee pikaajalist saastumist. Saasteained võivad sattuda inimkehase sissehingamise või allaneelamise teel või kokkupuutel nahaga ning neil võib olla tõsine kahjulik mõju inimeste tervisele, sealhulgas võib tekkida närvisüsteemi, neerude ja kopsude kahjustus. Võib tekkida ka eluohtlik haigus (joonis 1.1.). Nende ainete käitlemise strateegiad hõlmavad sageli tööstusprotsesside heitkoguste kontrollimist, jäätmekäitlust ja puhtamate tehnoloogiate kasutamist [12].

Joonis 1.1. Erinevate, peamiselt levinud õhusaastajate mõju inimese tervisele [5]



Vesiniksulfiidi mõju inimesele oleneb kontsentratsioonist ning ulatub silma ja hingamisteede ärritusest kuni hingamisraskusteni ja vedeliku tekkele kopsudes. Suurtes kogustes põhjustab gaas minestamist ning halvatust, millel võivad olla ebameeldivad tagajärjed.

Direktiiv 2008/50/EÜ seab ühtset ja ajakohastatud raamistikku välisõhu kvaliteedi hindamiseks ja haldamiseks EL-i liikmesriikides. Võrreldes direktiiviga 2004/107/EÜ on direktiiv 2008/50/EÜ suunatud reguleerima õhukvaliteedi juhtimist kõikehõlmavamalt. Sellega kehtestatakse piirväärtused paljudele tavalistele õhusaasteainetele, sealhulgas

vääveldioksiid, lämmastikdioksiid, tahked osakesed, plii, benseen ja süsinikmonooksiid, samuti maapinna osooni sihtväärtused. Neid saasteaineid seostatakse mitmesuguste kahjulike tervisemõjudega ning neid tekib põlemisprotsesside käigus tööstustes, kus on otsene kokkupuude ka veega. Direktiiv sisaldab samuti nõudeid õhukvaliteedi seire ja hindamise kohta, samuti sätteid avalikkuse juurdepääsu kohta õhukvaliteedi teabele [13].

Mõlemad direktiivid on suunatud teineteist täiendama, et koos moodustada Euroopa Liidu õhukvaliteedi juhtimise raamistiku tuuma, mille eesmärk on kaitsta inimeste tervist ja keskkonda, tagades õhusaaste taseme hoidmise kehtestatud piir- ja sihtväärtustest madalamal. Peamine esilekerkiv erinevus kahe direktiivi vahel on saasteained, mida need hõlmavad. Direktiiv 2004/107/EÜ käsitleb raskemetalle ja PAH-e (polütsüklilised aromaatsed süsivesinikud), samas kui direktiiv 2008/50/EÜ hõlmab laiemat hulka tavalisi õhusaasteaineid [12]. See erinevus peegeldab ka nende ainetega seotud erinevaid tervise- ja keskkonnariske ning vajadust erinevate juhtimisstrateegiate jaoks. Kõikide peamiste saasteainete piirmäärad koos nende saavutamise sihtaastatega on toodu Euroopa Liidu õhukvaliteedi standardis [14].

Mõlemad direktiivid aitavad kaasa laiemale eesmärgi saavutamisele, milleks on keskkonnakaitse kõrge tase kogu Euroopa Liidus. Seades selged ja mõõdetavad õhukvaliteedi eesmärgid, loovad direktiivid liikmesriikidele raamistiku tõhusate ja sihipäraste meetmete kasutuselevõtuks saaste vähendamiseks ning inimeste tervise ja keskkonna kaitsmiseks. See on kooskõlas Euroopa Liidu kohustusega edendada säästvat arengut ning tagada praegustele ja tulevastele põlvkondadele puhas ja tervislik keskkond.

Lisaks eelmainitule avalikustas Euroopa Komisjon 2022. aasta oktoobris uue direktiivi eelnõu, mille eesmärk on tagada Euroopas varasemate Euroopa õigusaktide ümbersõnastamise ja ajakohastamise kaudu tõhusam välisõhusaaste kontroll ja ennetamine. Ettepaneku eesmärk on kujundada ümber praegused valdkonna eeskirjad Euroopa Liidus ja nende rakendamine liikmesriikide tasandil ning vähendada õhusaastet. Lisaks pakub kavandatav direktiiv õhusaaste kontrolli õigusraamistikku, mis jääb Euroopa Liidu roheline kokkuleppe ja järgmise põlvkonna algatuste laiemasse õiguslikku konteksti. Uued eeskirjad on samuti kooskõlastatud vastavate ja ajakohastatud eeskirjadega, mis on kasutusel USA-s, kuigi õhusaaste kontrolli osas on need rangemad [15].

Peamine erinevus kolme direktiivi vahel seisneb õhusaaste käsitlemise lähenemise viisis. Direktiivid 2004/107/EÜ ja 2008/50/EÜ keskenduvad konkreetsete saasteainete kontsentratsioonide kontrollimisele välisõhus. Samas toob direktiiv (EL) 2016/2284 esile laiemat lähenemisviisi, mille eesmärk on vähendada õhusaasteainete koguseid. Direktiivis on



samuti toodud ka vääveldioksiidi (SO<sub>2</sub>), lämmastikoksiidide (NO<sub>x</sub>), mittemetaansete lenduvate orgaaniliste ühendite (NMVOC), ammoniaaki (NH<sub>3</sub>) ja peenete osakeste (PM<sub>2,5</sub>) heitkoguste vähendamise kohustus riigiti. Vähendamise kohustuste baasaastaks on 2005. aasta ja maanteetranspordi puhul kehtivad müüdnud kütuste põhjal arvatud heitkoguste suhtes.

Väävelvesinikku ja selle teket otseselt ei käsitleta direktiivides nii detailselt. Sellegi poolest on gaas tugevalt seotud ka kõigi tööstusprotsessidega, kus eelnimetatud põlemisgaase tekib. Ühe näitena saab tuua Eruobitume'i poolt tellitud uuringu, mis keskendus vesiniksulfiidi tekkele bituumeni tootmise protsessis. Vesiniksulfiidi leidub looduslikult toorõlides ja see võib tekkida rafineerimisprotsessi käigus. Saasteainet võib tekkida eriti palju suletud ruumides transportimise ajal või pikaajalisel kõrgel temperatuuril hoidmisel, mis võib põhjustada selle gaasi ohtlikke kontsentratsioone. Pikaajaline kokkupuude sellega võib põhjustada tõsiseid tervisemõjusid, millest mõned võivad ilmnedada teatud aja pärast [16].

## **1.2. Euroopa Liidu programmid õhusaaste vähendamiseks**

Lisaks direktiividele on Euroopa Liit töötanud välja mitmeid programme, mis on suunatud õhusaaste vähendamiseks ning kestlike linnaruumide ehitamisele, lähtuvalt ennekõike inimeste heaolust ja tervisest. Kui EL direktiivid on suunatud liikmesriikidele ning sätestavad üldised piirmäärad ja protseduurid, siis programmid on suunatud rohkem kodanike kaasavateks tegevusteks ja olukorra teadlikkuse tõstmiseks. Kodanike kaasamine on tõhus meetod, et suurendada alt-üles initsiatiive ja nende elluviimist. Õhusaaste kontekstis on see ennekõike oluline, sest hiljutine uuring näitas, et 98% Euroopa Liidu inimestest elab piirkondades, kus on väga suur peente osakeste tase õhus, mis ületab maailma terviseorganisatsiooni sätestatud soovitatud tasemed [17].

Kaks peamist initsiatiivi, mille keskmes on õhusaaste vähendamine ja ohjamine on programm Puhas õhk (*Clean Air*) ja Uus Euroopa Bauhaus (*New European Bauhaus*). Programm Puhas õhk hõlmab mitmeid projekte, mis keskenduvad teadusuuringutele ja innovatsioonile, et töötada välja tõhusad lahendused õhusaasteainete vähendamiseks. Need algatused on suunatud erinevatele saaste tekitajatele, sealhulgas tööstusheidetele, liiklusega seotud saastele ja põllumajanduse heitkogustele. Peamine eesmärk on tagada kõikidele kodanikele puhtam õhk. Programmi rahastab Euroopa Komisjon [18].

Selliste uurimisprojektide toetamise kaudu soodustab EL uute tehnoloogiate ja strateegiate väljatöötamist, mis võivad leevendada õhusaaste kahjulikke mõjusid. See ennetav

lähenedamisviis on otsustava tähtsusega ELi pikaajaliste eesmärkide saavutamisel, milleks on kasvuhoonegaaside heitkoguste alandamine ja jätkusuutlikule, vähese süsiniku jalajälje heitmega majandusele üleminekul. Lisaks õhusaastet vähendavate tehnoloogiate loomisele soovitakse projektiga luua täiendavaid töökohti. Euroopa Komisjoni hinnangul luuakse juurde 40 000 töökohta [18].

Uue Euroopa Bauhausi algatuse keskmes on jätkusuutlikke linnade ja linnaosade rekonstrueerimine. Algatus on seotud nii Euroopa rohelise kokkuleppe kui ka renoveerimise lainega. See algatus on loominguiline ja interdistsiplinaarne liikumine, mis paneb suurt rõhku linnaruumide ümbermõtestamisele ning inimese kogemusele linnas [19]. Uue Euroopa Bauhausil võib olla suur mõju õhukvaliteedile ja heitkogustele, kuna initsiatiiv keskendub rohelise taristu, transpordi ja jätkusuutlike hoonete ehitamisele. Linnad on sageli õhusaaste keskpunktis ning säästva linnaarengu edendamise kaudu püüab Euroopa Liit luua paremaid tingimusi ja tervemat elanikkonda. 2023. aastal tegi Euroopa Komisjon ettepaneku muuta Uue Euroopa Bauhaus kuuendaks „Euroopa Horisonti“ missiooniks [20].

### **1.3. Õhukvaliteedi mõõtmine Tallinnas ja lähiümbruses**

Tallinna linnas on kolm õhukvaliteedi seirejaama, mis on osa üleriigilisest seirevõrgustikust. Seirejaamade ülesanne on jälgida õhukvaliteeti linna erinevates osades. Õismäe seirejaam asukohaga Väike-Õismäe tiigi juures keskendub õhusaastele, mis on tüüpiline magalapiirkondadele. Põhja-Tallinna seirejaam annab ülevaate õhuoludest tööstus- ja küttepiirkonnas ning sealseks tähtsaks taristuks on samuti raudteesõlm. Liivalaia tänava seirejaam on paigutatud kesklinna, et jälgida õhukvaliteeti alal, kus on väga tihe liiklus. Kõikides jaamades mõõdetakse selliseid saasteaineid nagu CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> ja PM<sub>10</sub> [21].

Kõige uuemad õhukvaliteedi mõõtmistulemused ja aastaraportid on kättesaadavad Eesti Õhukvaliteedi Juhtimissüsteemi veebilehel, kust leiab infot ka õietolmu leviku ja kontsentratsiooni kohta. Kaardil on samuti toodud välja välisõhu kvaliteeti kajastavad õhumudelid. Eesti piires on õhukvaliteedi tase enamusest hea ning eristuvalt halvima õhukvaliteediga on Maardu linna Altmetsa tee seirejaama asukohas. Võrreldes teistega on selles asukohas märgatud kõrgemat vesiniksulfiidi (H<sub>2</sub>S) määra õhus, mis võib esineda keskmise tasemega õhukvaliteeti piirkonnas [22].

Viimastel aastatel on teostatud järgmiseid välisõhu kvaliteedi mõõtmise uuringuid: 2007 Lasnamäe õhusaaste hinnang, 2007 Tallinna linna süsihappegaasi heitkoguste inventuur, 2008 Õhukvaliteedi mõõtmised Tallinnas Leete tn 10a, 2008 Arnika tee 88 õhukvaliteedi

mõõtmised, 2010 Peente osakeste päritolu uuring, 2011 Tallinna linna süsihappegaasi heitkoguste inventuur, 2013 Osakeste keemilise koostise hindamine Tallinnas, 2013 Tallinna linna süsihappegaasi heitkoguste inventuur, 2015 Tallinna linna süsihappegaasi heitkoguste inventuur, 2017 Kohaliku omavalitsuse võimalused lehepuhurite kasutuse piiramisel, 2006-2019 Välisõhku heidetud saasteainete heitkogused Eestis kokku ja maakonniti. Õhusaaste võib suureneeda olulisel määral talveperioodil, kui paljudes piirkondades kasutatakse ahjukütet.

Mõõtmistulemuste alusel töötati Tallinnas välja kava eesmärgiga parandada linna välisõhu kvaliteeti. Kava algatamise põhjusteks oli 2005.-2007. aastal registreeritud peeneosakeste kogus Tallinna kesklinnas asuvas Liivalaia seirejaamas, mis ületas lubatud ööpäevakeskmist piirmäära ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) enam kui 35 päeva jooksul aastas. Kava hõlmas endas viimaste aastate seiretulemuste analüüsi, saasteallikate protsentuaalset jaotust ning saasteainete päritolu hinnangut. Analüüs näitas, et kesklinnas on õhukvaliteedi halvenemise peamine põhjus liiklus, eriti kevadisel perioodil, millal kasutatakse naastrehve. Samuti on kevaditi märgatav mõju kohtküttest tingitud saastele. Seepärast ongi kava keskendunud just liikluse ja lokaalkütte mõju vähendamisele. Kavas on ette nähtud erinevad tegevused, mille eesmärk on vähendada peenosakeste paiskumist õhku. Kava elluviimiseks on vajalikud kohaliku omavalitsuse tegevused [23].

Lisaks Tallinna linna poolt paigaldatud kolmele pidevale mõõtmisüsteemile, teostatakse õhukvaliteedi uuringuid ka muudes piirkondades. Eesti Keskkonnauuringute Keskus viis 2022. aasta suvel Tallinna Vanasadamas läbi õhukvaliteedi mõõtmisi, mille käigus selgus, et Tallinna Sadam on võtnud edukalt kasutusele meetmed, mis võimaldavad vähendada laevade ja autodega seotud õhusaaste riske. Mõõtmiste käigus ei tuvastatud piirnormide ületamist. Õhukvaliteedi pidevmõõtmisel hinnati laevade mõju õhukvaliteedile, sealhulgas nii saabumisel, väljumisel kui ka sadamas seismise ajal. Kokku külastas Vanasadamat mõõtmisperioodil 278 laeva [24].

2023. aastal paigaldati Põhja-Tallinnas Tööstuse tänavale õhukvaliteedi seirejaam. Tegevus oli ajendatud asjaolust, et 2023. aasta esimese nelja kuu jooksul on riiklikule infotelefonile saadetud 180 teadet Tallinna piirkonnas leviva ebameeldiva lõhna kohta, millest enamus, 147 juhtumit, on pärit Põhja-Tallinnast. Seirejaama eesmärgiks on tuvastada laekunud õhukvaliteedi murekohtade põhjus. Kui mõõtetulemused näitavad, et kohalikud ettevõtted paiskavad välisõhku lubatust suuremas koguses saasteaineid, siis nõuab Keskkonnaamet neilt saasteainete vähendamiseks kava koostamist [25].

DPD Eesti käivitas koostöös ettevõttega Pollutrack laiemale avalikkusele kättesaadava õhuseire programmi. Selle raames paigaldati 32 DPD kaubiku katusele ja kuuete pakiautomaadile õhukvaliteedi mõõtmisandurid. Nende anduritega kogutud andmed on veebist kättesaadavad ja tasuta kasutamiseks. Kogutud andmed aitavad paremini mõista ja jälgida linna õhukvaliteeti reaajas interaktiivse veebikaardi abil. Uuringus on kasutatud lasertehnoloogiaga andureid, mis mõõdavad PM<sub>2.5</sub> tasemeid, mis tekivad peamiselt siseõlemismootoritega autode heitgaasidest [26].

## 2. LINNA DIGIKAKSIKU MUDEL

### 2.1. Digitaalne kaksik targas linnas

Tark linn on kiiresti arenev viimaste aastakümneni kontseptsioon, mille eesmärgiks on tõsta linnaelanike elukvaliteeti ja tagada jätkusuutlikkus läbi digitaalsete ja omavahel informatsiooni edastavate lahenduste. Erinevad autorid on defineerinud tarka linna erinevalt. Üldiselt on aga tark linn selline linn, milles asuvad nutikad tööstused, näiteks info- ja kommunikatsioonitehnoloogia (IKT) tööstus [27]. Lisaks hõlmavad targad linnad elanike harimist ning edasiulatuvat suhet valitsuse, administratsiooni ja selle kodanike vahel, mis ei ole piiratud ülalt alla juhtimise stiiliga [28]. Tark linn eeldab, et see kasutab kaasaegset tehnoloogiat eesmärgiga luua seal elavatele üksikisikutele ja kodanikele sotsiaalseid, majanduslikke, tehnoloogilisi, poliitilisi ja kultuurilisi väärtusi.

Targas linnas on tähtsal kohal füüsilise maailma jäljendamine digitaalselt läbi pidevalt muutuva ja uueneva andmestiku, mis parandab linnafunktsioone, loob töökohti ja tõstab avalikkuse rahulolu. Kuivõrd linnadele ja nende osade planeerimisele eraldatakse aina rohkem ressursse ning kogu protsess muutub kõikehõlmavamaks, siis on vajalik otsuste tegemiseks uute seoste ja andmemahtude töötlemine [29]. Need on võimalikud digitaalse kaksiku kasutuselevõtuga. Linnamastaabis peaks digitaalne kaksik esindama digitaalselt kõiki linna osasid ja süsteeme, parandades seeläbi linna nähtavust, ideede realiseeritavust ja toimivust. Digitaalne kaksik peaks võimendama linna juhtimist ja tegevust, tuues kaasa targema, jätkusuutlikuma linna ja kodanike parema elukvaliteedi [30].

Oluline on määratleda digitaalsed kaksikud ja tavalised 3D-mudelid, mida kasutatakse arhitektuuri, inseneri, ehituse ja linnaplaneerimise sektoris. Peamine erinevus seisneb füüsiliste andmete ja näitajate koguses, mida virtuaalses maailmas jäljendatakse. 3D-mudel toimib füüsilise projekti digitaalse esitusena ning suurendab arhitektide, inseneride, ehitajate ja linnaplaneerijate tõhusust kogu projekti elutsükli jooksul: projekteerimine, ehitamine ja hooldus [30]. 3D-modelleerimise edasiarenduseks on BIM (*Building Information Modeling*), mis integreerib ja haldab kogu füüsilise hoone või taristu informatsiooni ning võimaldab seeläbi säästa kulusid ja aega [30]. BIM-i ja GIS-i (*Geographical Information System*) integreerimine loob eeliseid hoonete ja nende lähiümbrusele, kuid linnakeskkonna mastaabis jäävad rakendused suures osas kasutamata [32].

Digitaalne kaksik on seevastu võimalus kogu linna planeerimise ja toimimise parendamiseks. See kontseptsioon hõlmab linna virtuaalse mudeli väljatöötamist, mis esindab kõiki linna elemente. Digitaalne kaksik hõlmab lisaks 3D andmetele ka näiteks taristu andmeid, muuhulgas elektri- ja kanalisatsioonisüsteemide võimsust ja kasutusmustrid, keskkonnaandmeid, sealhulgas õhukvaliteeti, müratasemeid, ning ka rahvastiku statistikat, sealhulgas tihedus, demograafia, majandusnäitajad ja sotsiaalteenused. Tähtsal kohal on reaajas andmevood, mis kogutakse näiteks liikluskaameratest ja anduritest [30].

Digitaalse kaksiku üks peamine eelis BIM-i ees on selle reaajas suhtlemine füüsilise reaalsuse ja virtuaalse mudeli vahel. Kuigi BIM hõlmab füüsilise hoone või taristu geomeetrist ja ajalist teavet, ei uuene selle andmed jooksvalt automaatselt. Seevastu digitaalne kaksik kasutab reaajas andureid ja nutistut ehk IoT (*Internet of Things*) lahendusi, et värskendada virtuaalset mudelit vastavalt füüsilises linnas reaajas toimivatele muutustele [30]. Selline reaajas toimivus võimaldab tulevikus prognoosida ja optimeerida füüsilise linna toimivust (joonis 2.1).

Joonis 2.1. Linna digikaksiku võimalused [30]



Üheks oluliseks digikaksiku osaks saab kujuneda linnaõhku saastavate ainete modelleerimine, et teha teadlikumaid otsuseid linnaplaneerimise seisukohalt. Kõrvutades simulatsioonide ja linna paigaldatud seirejaamade andurite andmeid, on võimalik ennustada ja analüüsida õhukvaliteedi taset reaajas. See omakorda annab linnaametnikele võimaluse teha teadlikke

otsuseid õhusaaste mõjust ja sealt edasi ettepanekuid nende vähendamiseks. Näiteks saab digikaksik ootamatu reostusjuhtumi korral ennustada, kuidas reostus erinevates linnaosades hajub, ja tuvastada piirkonnad, mis on kõige enam ohustatud [33]. Lisaks sellele saab õhusaaste modelleerimisel simuleerida erinevaid stsenaariume ja hinnata, kuidas saaks reostuse mõju leevendada. Selliselt saab tuvastada erinevate sekkumiste tõhusust, milleks saavad olla näiteks liikluspiirangud või tööstuslikud eeskirjad.

Muuhulgas saab digikaksik anda sellisel juhul ka sisendi projekteerimiseks, lihtsustades selle protsessi. Planeerijatel on võimalik projekteerida haljastust ja arhitektuursete väikevormide paigutust selliselt, mis vähendab õhusaaste kontsentreerumist linnas sellistes kohtades, kus koguneb inimesi [34]. Digikaksik võiks samuti anda sisendi teadlikumaks linna kanalisatsioonivõrgu tuulutuspüstikute paigaldamise asukohtadele, et tagada kogu kanalisatsiooni võrgu tõhus tuulutus ning samas vältida haisuhäiringuid. Lisaks tavapärasele informatsioonile, nagu piirkonna detailplaneering, saab digikaksikust võtta välja täiendavaid andmepunkte, nagu piirkonna mikrokliima, õhu liikumine, rahvastikutihedus, hooldamise eripärad ja muude olemasolevate saasteainete kontsentratsioonid [34]. Viimane võimaldab saada aru, millised uuest püstikust väljuvad saasteained võivad reageerida või seguneda olemasolevate piirkonna saasteainetega ning moodustada uued ühendid.

Linna digitaalsel kaksikul on mitmeid eeliseid, ent nendega kaasneb ka oluline andmemahutade haldamine ja erinevate seadmete kasutuselevõtt, mis muudab süsteemid väga kompleksseks ning suurendab kulu [30]. Seetõttu on vajalik digitaalse kaksiku rakendamise viiside osas teha põhjalikumat analüüsi, et hinnata lahenduste väärtuse kuluoptimaalsust. Andmemahutade haldamise ja analüüsimise võimalus on rakendada süvaõpet, mis võimaldab vähendada kogu süsteemi sõltuvust inimese sisenditest ning lisaks loob uusi võimalusi andmete seoste leidmisel ja nende ära kasutamisel.

## **2.2. Tallinna digikaksik ja selle tulevikuväljavaated**

Alates 2021. aasta märtsist on Eestis kasutusele võetud ja avalikkusele kättesaadavaks tehtud E-ehituse platvorm ja selle 3D kaksik. E-ehituse platvormi ja 3D kaksiku eesmärk on muuta ehitise elukaarega seotud andmed kergesti kättesaadavaks, tõsta andmete kvaliteeti ja julgustada ehitussektori osapooli kasutama uuenduslikke lahendusi, nagu ehitusinfo digitaalne modelleerimine (BIM), mis on oluline ehitussektori tootlikkuse kasvu mõjutaja. 3D kaksik on visuaalne rakendus, mis võimaldab kasutajal näha ehitisi ja nende andmeid ajaloolises perspektiivis, vastavalt sellele, millal andmed salvestati [35]. 3D kaksik on e-

ehituse platvormi kasutajaliidese oluline osa, kus enamik infost pärineb platvormiga liidestatud andmeallikatest.

Mõlemad projektid on Eesti ühed esimesteks peamisteks sammudeks digitaalse kaksiku mudeli kasutusele võtmisest ning projekti edasiarendusi juba teostatakse Tallinna linna tasemel. Digikaksikud on Tallinnas kujunenud muutvaks tehnoloogiaks, mis pakub uuenduslikke lahendusi linnaprobleemidele ja parandab avalikke teenuseid. Tallinna plaanide kohaselt saab digikaksiku platvormil arendada mitmeid linnale vajalikke teenuseid, millest üks esimestest on tänavaaukude tuvastamine ja analüüs. Seni on tuvastatud tänavaauke füüsiliselt, kuid tulevikus võiks selle töö üle võtta sensoritega varustatud autod, mis mõõdavad augud ära ja edastavad andmed mudelisse [36]. Sel moel saab analüüsida aukude sügavust ja ohtlikkust ning koostada nende parandamise plaane.

Tänavate kujundamisel on digikaksiku abil võimalik simuleerida erinevaid stsenaariume, näiteks kuidas trammid ja bussid liiguvad veel ehitamisel olevatel tänavatel. Lisaks selle saab digikaksiku mudelit kasutada linnaliikluse ja teetööde kavandamiseks. Kuigi Tallinna 3D mudelis on hetkel kõik hooned olemas, on oluline mõista ka maa-aluste torustike ja võrkude asukohta. Tulevikus võib linna mudel aidata ka ehitusprojektide digitaalsel kontrollimisel, mis muudab paljud bürokraatlikud protsessid lihtsamaks [36].

Üks uuendamaid lisaarendusi on puude ja taimestiku digitaalse mudeli ehk rohemudeli koostamine. Tallinna ja Helsingi linnad plaanivad luua digitaalse rohemudeli, mis seob inimesi, ehitatud keskkonda ja taimestikku. Projekti nimega GreenTwins eesmärk on kujutada ja visualiseerida mõlema linna digitaalset taimestikku ning luua platvormid avalikkuse kaasamiseks. See projekti osa keskendub linnataimestiku olulisusele elanike heaolu jaoks ja kodanike kaasamisele haljasalade kujundamisel. GreenTwins pilootprojekt kasutab kahte peamist digitaalset vahendit: Virtual Green Planner (VGP) ja Urban Tempo (UT) [37]. VGP võimaldab aktiivsetel kodanikel osaleda linna haljasalade kujundamises.

Projekti uuenduslikkus tuleneb taimestiku kihist linna digikaksikul, mis sisaldab taimede 3D-mudeleid ja teavet nende kasvamise mustrite kohta. See kiht võimaldab spetsialistidel ja kodanikel mõista, kuidas haljasalad ja nende ökosüsteemid muutuvad aja jooksul [37]. Samalaadselt taimede kihi lisamisele uurib käesolev magistritöö õhuruumi lisamist linna digikaksikule, et simuleerida õhuliikumise ja reostuse leviku olukordi, soodustades sellega teadlikumat linnaplaneerimist ja elanike tervist.



## 3. Numbriliste mudelite rakendamine linnaruumi õhuleviku simuleerimisel

### 3.1. Numbrilise modelleerimise olemus

Numbriline modelleerimine hõlmab endas füüsikaliste protsesside matemaatilist esitamist, kasutades diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks numbrilisi arvutusmeetodeid. Selle rakendusala on keerukate süsteemide käitumise kirjeldamine ja ennustamine. Numbrilised meetodid võimaldavad simuleerida loodusmaailma ja tehissüsteemide toimimisele reaalsusele ligilähedasi olukordi. Numbrilist modelleerimist kasutatakse vedeliku dünaamika, soojusülekanne ja elektromagnetlainete levimise simuleerimiseks [38]. Käesolev magistritöö keskendub numbrilise modelleerimise rakendamisele vedelikudünaamikas ning seda valdkonda nimetatakse arvutuslikuks vedelikudünaamikaks ehk CFD-ks (*Computational Fluid Dynamics*).

CFD simulatsioonid põhinevad kolmel jäävuse seadus [39]:

- Massi jäävuse seadus: pidevuse võrrand (3.1);
- Voolamise liikumishulga jäävuse seadus: Newtoni teine seadus ehk liikumisvõrrand (3.3);
- Energia jäävuse seadus: termodünaamika esimene seadus ehk energiavõrrand (3.4).

Massi jäävuse seaduse kohaselt on süsteemi siseneva ja süsteemist väljuva massi hulga vahe võrdne nulliga.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (3.1)$$

kus  $\rho$  on tihedus,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$\mathbf{v}$  on kiirus  $(v_1, v_2, v_3)$ ,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$\nabla$  on gradient, mis leitakse valemiga (3.2).

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.2)$$

Liikumishulk on liikuv mass ja seda mõõdetakse objekti massi ja kiiruse korrutisena. Kuna liikumishulk kontrollmahus jääb konstantseks, tähendab liikumishulga jäävus, et liikumishulka ei tekita ega kao. Liikumishulga jäävuse seadust pidevale keskkonnale

nimetatakse ka Navier-Stokesi võrrandiks, mis kehtib Newtoni viskoossuse seadusele vastavatele vedelikele:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \nabla * V \right] \quad (3.3)$$

kus  $p$  on termodünaamiline rõhk, Pa;

$\rho g$  on erikaal,  $N * m^{-3}$ .

Tuleb märkida, et simulatsiooni arvutuse tarkvara lahendis olid ümber korraldatud rõhugradiendi ja raskuskiirenduse tingimused ning kasutusele võetud liigne rõhk  $p_{rgh}$ , mis on rõhk ilma hüdrostaatilise rõhu osata. Hüdrostaatiline rõhk vastab järgmisele diferentsiaalvõrrandile:

$$-\nabla(p) + \rho \vec{g} = -\nabla(p_{rgh} + \rho (\vec{g} \cdot \vec{r})) + \rho \vec{g} = -\nabla p_{rgh} - (\vec{g} \cdot \vec{r}) \nabla(\rho) - \rho \vec{g} + \rho \vec{g} == -\nabla p_{rgh} - (\vec{g} \cdot \vec{r}) \nabla(\rho), \quad (3.4)$$

kus vee raskusega määratud rõhk on määratletud kui  $p_{rgh} = p - \rho (\vec{g} \cdot \vec{r})$  ja  $\vec{r}$  on asukoha vektor. Vee raskusega määratud rõhu ühik on  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$  ja koordinaatide ühik on m.

Energia jäävuse seadus on termodünaamika esimene seadus, mis ütleb, et süsteemile lisatud töö ja soojuse summa tulemusena suureneb süsteemi koguenergia:

$$dE_t = dQ + dW \quad (3.5)$$

kus  $dQ$  on süsteemi lisatud soojuse hulk, J;

$dW$  on süsteemis tehtud töö hulk, J;

$dE_t$  on süsteemi koguenergia juurdekasv, J.

Magistritöös simuleerimiseks kasutatavas CFD lahendis on energiavõrrand määratud sisemise energia hulga järgi kui

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \left[ e + \frac{1}{2} \langle u_j \rangle^2 \right] \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \left[ \langle e \rangle + \frac{1}{2} \langle u_j \rangle^2 \right] \langle u_j \rangle \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (p u_j) + \rho g_i u_i - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_{eff} \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) \quad (3.6)$$

kus ühiku massi kohta arvestatud sisemine energia on antud suurusena  $e$  ja keskmise voolu kineetiline energia ühiku massi kohta on  $\langle u_j \rangle^2 / 2$ . Tuleb märkida, et kasutatavas CFD mudelis on energia võrrand (3.6) saadud läbi energia hulga  $e$  ja seda saab teisendada samaväärseks energia võrrandiks, kasutades suhet  $\tilde{h} = e + p/\rho$ , kus  $\tilde{h}$  on entalpia ühiku massi kohta.

Efektiivset termilist difusioon  $\alpha_{eff}/\rho$  on määratletud kui laminaarse ja turbulentsse soojusdifusioonivõime summa.

$$\alpha_{eff} = \frac{\rho \nu_t}{Pr_t} + \frac{\mu}{Pr} = \frac{\rho \nu_t}{Pr_t} + \frac{\kappa}{c_p},$$

kus  $\nu_t$  on turbulentsne viskoossus,  $Pr_t$  on turbulentsne Prandtl arv,  $\mu$  on laminaarne dünaamiline viskoossuse koefitsient,  $Pr$  on Prandtl number,  $\kappa$  on soojusjuhtivus ja  $c_p$  on erisoojus konstantse rõhu juures. Soojusdifusioonivõime ühik on  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  turbulentsse viskoossuse ühik  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , soojusjuhtivuse ühik  $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} = \text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$  ja erisoojuse ühik  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = \text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Töös kasutatavas lahendis on õhusaasteaine käsitletud keemiliselt mitte reageeriva ainega õhuväljas, mille temperatuur on muutuv. Seetõttu on lahendisse lisatud suurus  $C$ . See vastab lisaks adveksioon-difusiooni võrrandile, mis on määratletud tensorvormis kui

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (C \langle u_i \rangle) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( D_m + \frac{\alpha_{eff}}{\rho} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = PS \quad (3.7)$$

kus  $C$  on saasteaine kontsentratsioon,  $D_m$  on molekulaarse difusiooni koefitsient ja  $PS$  on õhusaaste ruumiline suurus. Saasteaine kontsentratsiooni ühik on  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , kinemaatilise molekulaarse difusiooni ühik  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  ja õhusaaste ruumilise allika termini ühik  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ . Käesolevas lahendis on saasteaine jaotuse tase  $s = C/C_{reference}$  on seotud temperatuuri muutustega turbulentsse viskoossuse kaudu ehk  $\alpha_{eff}/\rho = \nu_t/Pr_t$  ning eeldatakse, et  $D_m \approx 0$  ja õhusaaste difusioon on seega täielikult turbulentsne.

Üks kõige keerulisemaid vedeliku voolamise liike on turbulentsus. Turbulentsus on kolmemõõtmeline, ajast sõltuv, mittelineaarne nähtus ning see hõlmab endas mitmeid protsesse, mille täieulatuslik modelleerimine on väga kulukas ja osaliselt piiratud tänapäeva arvutusvõimsustega. Seetõttu on turbulentsi modelleerimist uuritud väga palju ning kasutusele võetud mitmeid simuleerimist lihtsustatavaid tehnikaid. Üks kõige levinum turbulentsi mudel on RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), mis võimaldab matemaatilise lähenemisega lihtsustada Navier-Stokes'i võrrandite lahendamist [39].

RANS turbulentsi mudelis on jagatud muutujad, näiteks kiirus kaheks komponendiks: keskmiseks komponendiks ja muutuvaks komponendiks. Keskmise komponendi esindab voolu keskmistatud käitumist teatud ajaperioodi jooksul. See on vooluprotsessi ennustatav osa ja seda ei mõjuta turbulentsist tingitud juhuslikud muutujad. Muutuv komponent vastab aga

hetkeliste kõrvalekallete keskmistele väärtustele, et kajastada turbulentsist tingitud juhuslikke kõrvalekaldeid. Arvutuse käigus võetakse Navier-Stokesi võrrandi suurustest aja keskmised väärtused [39]. See tähendab, et võrrandite iga liige keskmistatakse teatud aja jooksul. See aeg peaks olema piisavalt pikk, et sisaldada erinevusi turbulentsuses, kuid piisavalt lühike, et välistada ebastabiilsed muutused keskmises voolus.

Keskmistamise tõttu on RANS mudeli kasutamisel mitmeid väljakutseid, millest suurim on keskmistamise tõttu simulatsiooni ebatäpsuse suurenemine ajas võrreldes päriselus esineva olukorraga. CFD-s on mitmeid teisi turbulentsi mudeleid, ent RANS on enda täpsuse ja arvutusliku nõudlikkuse osas paljude, ennekõike linna modelleerimisel optimaalseim lahendus.

RANS mudelite seast on k-epsilon ( $k-\epsilon$ ) mudel turbulentsse voolu tingimuste keskmiste vooluomaduste simuleerimiseks kõige levinum. See on kahe võrrandi mudel ning võtab arvesse kiirusfluktuatsioonidega määratud kineetilist energiat, milleks on „k”, ning turbulentsi hajumise kiirust, milleks on „ $\epsilon$ ”. Kineetiline energia määrab turbulentsi energia ja turbulentsi hajumise kiirus määrab turbulentsi kineetilise energia hajumise kiiruse [32]. Kasutades neid kahte tegurit aitab k-epsilon mudel ennustada, voolu turbulentsuse astet ning kõige turbulentsemat asukohta ajas. Mudelil võib esineda ebatäpsuseid, sealhulgas ei soovitata seda kasutada seinäärse turbulentsse voolu simuleerimiseks, kuna mudel arvesta täpselt seinaga hõõrdepingeid [39]. Sellegipoolest, võrreldes alternatiividega on k-epsilon arvutusvõimsuse vajaduse ja täpsuse osas üks parimaid.

## **3.2. Numbriliste mudelite rakendamine õhusaaste modelleerimisel ja ehitiste arhitektuuri kujundamisel**

CFD mudelid on viimaste aastate jooksul teinud olulisi edusamme, mis aitavad kaasa simuleerida suuri linnaalasid ja nendes toimuvaid vedelikuprotsesse arvutuslikult efektiivsemalt ja võrdlemisi kõrgema täpsusastmega. Üks peamisi selle võimaldavaid lahendusi on eelnevalt mainitud RANS turbulentsimudel. CFD-d saab rakendada linnapiirkondadele võttes arvesse nende keerukat geometriat kui ka erinevate saasteallikate rohkust [41].

Linnamaastik on oma hoonete, tänavate, muu taristu ja sõidukite liikumisega keeruline arvutusobjekt, kuna erinevate muutujate kogus on suur. Õige geometria täpsusaste ja numbriline mudel võimaldavad simuleerida reaalseid olukordi ning vältida primitiivsete

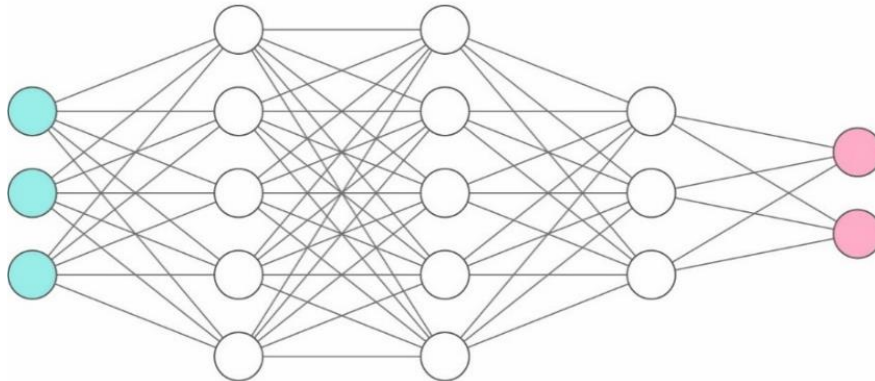
järelduste tegemist. Piirkonnad kõrghoonete vaheline piirkond ehk tänavakanjonid on eeskujulikud näited keerukast linnaklastrist, kus mitmete hoonete geomeetria võib tekitada erinevaid tsirkuleerivaid õhumasse, mõjutades saasteainete levikut [41].

Oma keerukuse tõttu on arvutusmodelite rakendamine õhusaaste modelleerimisel vägagi arvutusrohke protsess, kui soov on tagada vajalik simulatsiooni täpsusaste. Olukorra teevad keeruliseks nii erinevad atmosfäärinähtused, linnageomeetria, kui ka suured vahemaad, mis linnaruumi simuleerimisel paratamatult esinevad. Seetõttu teostatakse selliseid arvutusi peamiselt kõrgjõudlusega andmetöötlussüsteemidel (HPC), mida on ka käesolevas töös rakendatud. HPC kasutamisel esineb aga samuti piiranguid ning arvutussimulatsioonide teostamise ajaline raamistik võib võtta kaua aega [42].

Piiratud arvutusressursid ja tehnoloogia areng on pannud aluse masinõppe algoritmide rakendamisel vedelikusimulatsioonide läbiviimisel. Masinõppe on üks võimalikke lahendusi arvutuskooormuse vähendamiseks, sest ta on võimeline võtma aluseks ajaloolised andmed, mille põhjal analüüsida tulevasi olekuid ilma üksikasjalikke simulatsioone käivitamiseta. Näiteks saab masinõppe algoritme treenida eraldiseisvate simulatsioonide andmete põhjal ja seejärel kasutada neid saastetaseme ennustamiseks sarnastes tingimustes, vähendades seeläbi märkimisväärselt arvutuslikku jõudlust [41].

Tänapäeval kõige arenenum masinõppe liik on süvaõpe, mis põhineb süvanärvivõrkudel. Kuigi seda uuriti juba 1940. aastatel, muutus nende kasutamine oluliselt laialdasemaks alates 1990. aastatest. Süvanärvivõrgud töötavad kihtide kaudu, sealhulgas on neil sisendkiht, peidetud kiht ja väljundkiht (joonis 3.1). Igas kihis toimub andmete töötlus, kasutades mittelineaarset aktiveerimisfunktsiooni. Masinõppe treenimise ajal täpsustab võrk oma kaalusid, et vähendada ennustusvigu. Selleks kasutab ta tavalisi mõõdikuid, milleks kõige levinum on näiteks ruutkeskmine viga ja optimeerimisprotseduure, nagu gradiendilaskumine. Masinõppe treenimine [42].

Joonis 3.1. Närvivõrgu struktuur lihtsustatud kujul, roheline on sisendkiht, valge peidetud kihid, roosa on väljundkiht [42]



Kõige levinumad süvanärvivõrkude algoritmid, mida rakendatakse vedelikudünaamikas on niinimetatud konvolutsioonilised närvivõrgud (CNN) ja rekurrentsed närvivõrgud (RNN). Konvolutsioonilised närvivõrgud on loodud arvutinägemisega seotud ülesannete jaoks. Neid rakendatakse ennekõike mustrite tuvastamisel piltidelt. See saavutatakse arvutusoperatsiooniga, kus etteantavad pildiandmed lüüakse laiali pikselite reaks ning sealt tuvastatakse kohalikke eripärasid, mis võimaldavad mudelil luua seoseid keskendudes nendele. CNN-idel spetsiifiline struktuur võimaldab neil hakkama saada ruumiliste mustrite tuvastamisega, mida esineb vedelikudünaamika simulatsioonides [42].

Rekurrentsed närvivõrgud on loodud järjestikuste andmeridade (näiteks aegridade) käsitlemiseks. RNN-idel on tagasisideahelad, mis annavad neile teatud tüüpi mälu, võimaldades neil arvutustes varasemaid sisendeid arvesse võtta. Sellegipoolest on rekurrentset närvivõrgud näidanud ennast problemaatilistena väga pikkade aegridade korral, sest üle pika aja hakkab nende optimeerimisel kasutatav gradient langema. Seda probleemi lahendavad niinimetatud lühiajalise mälu närvivõrgud (LSTM), mis on RNN-i alamtüüp. Vedelikudünaamikas kasutatakse rekurrentsed närvivõrke ajast sõltuvate probleemide korral. Need sobivad eriti hästi näiteks õhusaaste käitumise jäädvustamiseks aja jooksul [42].

Masinõpet kasutatakse mitmes valdkonnas, näiteks õhuvoolu mustrite tuvastamiseks ja tulemuste ennustamiseks selliste sisendite põhjal nagu ilmastikutingimused, õhu liikumise kiirus ja heitkoguste määrad. Need algoritmid võivad anda kiireid hinnanguid saasteainete hajumise ja õhukvaliteedi kohta, hõlbustades ka otsuste tegemist [41]. Lisaks sellele saavad suured masinõppe mudelid töödelda ja analüüsida erinevatest allikatest, näiteks satelliitvaatlustest ja maapealsetest anduritest pärinevaid reaajas andmevooge, et anda õigeaegsemaid ja täpsemaid õhukvaliteedi andmeid. Nende andmete alusel saab omakorda luua simulatsioone ning parandada nende kvaliteeti [42].

Arhitektuurse projekteerimise ja õhusaaste simuleerimise kontekstis saavad masinõppe algoritmid optimeerida hoonete või väikevormide paigutust, et parandada linna õhuliikumist ja vähendada saasteainete kontsentratsiooni linna tänavakanjonites. Seejuures on oluline märkida, et vedelikudünaamika keeruka olemuse tõttu, ei saa samu masinõppe mudeleid rakendada erinevates oludes. Masinõppe kvaliteet ja kohaldamise võimalus on suuresti defineeritud tema sisendandmete pealt, sest masinõppe poolt tehtavad otsused põhinevad varasematel, talle etteantud sisenditel. Kui sisendandmed on halva kvaliteediga või ebasobilikud, siis ka masinõppe mudel ja tema prognoosid ei hakka esindama reaalsust [43].

Vedelikudünaamika stsenaariumite algtingimused võivad olla väga erinevad, kui need, millel on esialgne masinõppe treenitud. Ebasobiliku masinõppe mudeli rakendamine toob kaasa vigased tulemused. Kuivõrd masinõppe treenimine ja kvaliteetse masinõppe mudeli koostamine on omakorda väga mahukas protsess, siis on selle rakendatavus ikkagi vedelikudünaamikas mõnevõrra piiratud [44].

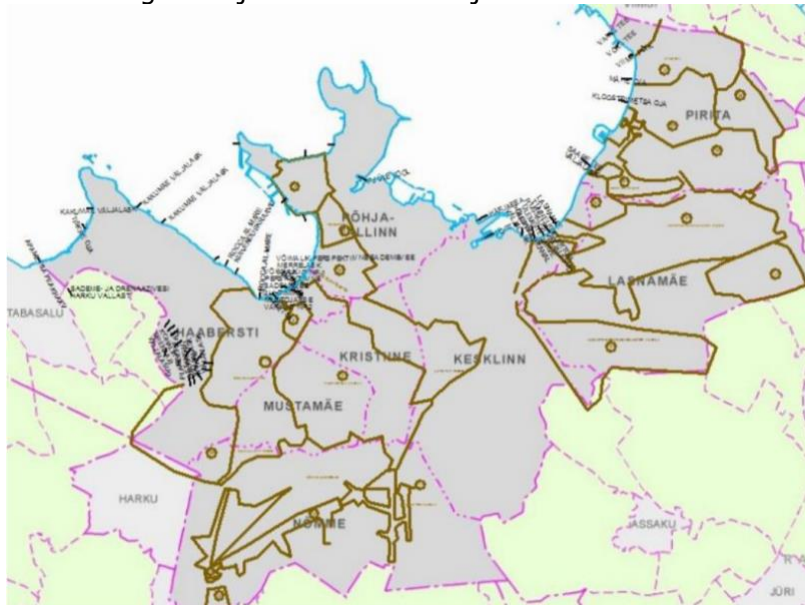
## 4. Õhusaaste levik Merimetsa asumi näitel

Käesolev magistritöö keskendub linna kanalisatsiooni tuulutuspüstikutest väljuva õhusaaste modelleerimisele ja näitlikustamisele. Otsus modelleerida kanalisatsioonipüstikutest väljuvat võimalikku reostust ja haisuhäiringut oli tehtud, sest tegemist on linnaruumi õhusaaste uurimisel võrdlemisi vähekaetud valdkonnaga ning tegemist on lokaalse asukohaga linnaõhku saateainet paiskavate reostusallikatega, mis on leitavad üle terve linnaruumi. Lisaks sellele teostatakse magistritöö koostamise ajal koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga saasteaine mõõdistusi püstikutes ühes Tallinna linna asukohas ning magistritööd on võimalik seega hiljemalt siduda nende leidudega suurema väärtuse tekitamiseks.

### 4.1. Piirkonna valik

Tallinna kanalisatsioonisüsteem jaguneb 21 lahvoolseks (ainult reovesi) ja seitsmeks ühisvoolseks (reovesi koos sademeveega) valgalaks (joonis 4.1.). Ühisvoolne kanalisatsioon hõlmab ligikaudu 35% Tallinna alast, mistõttu umbes 35% sademeveest suunatakse reoveepuhastusjaama. Põhiliselt asub ühisvoolne kanalisatsioon Tallinna ajaloolistes linnaosades, näiteks Kesklinnas ja Põhja-Tallinnas.

Joonis 4.1 Sademevee valgalade ja sademevee väljalaskude süsteem Tallinnas [45]



Tallinna jäätmeveed suunatakse kahe peamise tunnelkollektori kaudu Põhja-Tallinnas asuvasse Paljassaare reoveepuhastusjaama (vt joonis 4.2). Puhastusjaamast väljuv



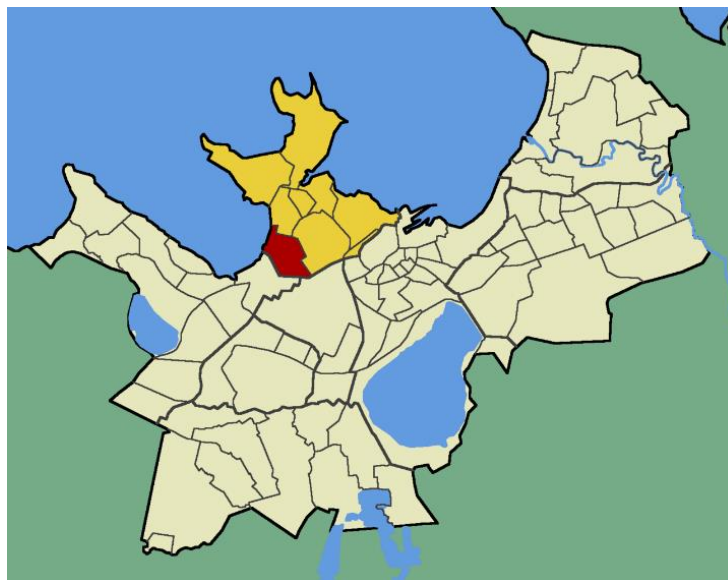
puhastatud heitvesi juhitakse 2,8 km kaugusele rannikust ja 26 meetri sügavusele Tallinna lahte.

Joonis 4.2 Paljassaare reoveepuhastusjaam [45]



Magistritöö keskendub õhusaaste leviku modelleerimisele Tallinnas Põhja-Tallinna Merimetsa asumis (joonis 4.3). Piirkonna valik põhineb sellel, et asumis asuvad elumumajade lähedal Tallinna Vee kanalisatsiooni tuulutuspüstikud. Piirkonda teenindav kanalisatsioon suundub Paljassaare reoveepuhastusjaama. Töös keskendutakse seega ühele valitud kollektoritele.

Joonis 4.3. Merimetsa piirkond, tähistatud punasega. Põhja-Tallinna piirkond tähistatud kollasega [45]



Magistritöö koostamise ajal teostatakse püstikutes Tallinna Tehnikaülikooli poolt lõhnaosakesete, sealhulgas väävelvesiniku mõõtmist. Lõhnaosakeste mõõdistused on teostatud kolmes tuulutuspüstikus, mis kulgevad mööda Merimetsa asumirannajoont (joonis 4.4). Magistritöö modelleerimisel keskendutakse kolmest tuulutuspüstikust püstikule, mis asub Kolde puiestee 104 maja lähedal (joonis 4.4, püstik number 2).

Joonis 4.4. Merimetsa asumi kolm peamist kanalisatsioonipüstikut [46]



Valitud piirkonnas asuvad tuulutuspüstikute läheduses lisaks erineva kõrgusega elamumaja kompleksitele ka rannapromenaad ning on seega linnaelanike seas sagedaseks vaba aja veetmise kohtaks.

Piirkond osutus seetõttu sobilikuks, et modelleerida kanalisatsiooni tuulutuspüstikutest väljuvate lõhnaosakeste jaotust linnaruumis, sest modelleerimise aluseks on mõõdistusandmed ja püstikute lähedus elamumajadele võimaldab näitlikustada õhusaaste mõju. Lisaks eelmainitud piirkonna valiku kriteeriumile, oli modelleerimise ulatusel lähtutud kanalisatsioonipüstikute ehk allikate mõjualast.

Kanalisatsiooni ventileerimine on oluline mitmel põhjusel, sealhulgas [47]:

- Õhuvoolu ja rõhu ühtlustamiseks majapidamiste ja torustiku vahel;
- Maapealse lõhnaga seotud probleemide vähendamiseks ja kontrollimiseks.
- Maa-aluse korrodeeriva keskkonna loomise vähendamist, mis vähendab ehitatud taristu eluiga.

Kanalisatsioonitorustiku ventilatsiooni vajaduste selgitamine linnaruumi õhureostuse tingimusi arvestades on seega optimeerimise ülesanne, et leida kõige parem tasakaal saasteallikate asukoha ja õhusaastajate hulga ning taristu amortisatsiooni vahel.

Kanalisatsiooni ventilatsiooni ja selle tulemusena eralduvat õhku mõjutavad mitmed asjaolud.

**Õhu ja vee vahepinna hõõre.** Kõige olulisem tegur kanalisatsiooni õhuvoolu määramisel on tavaliselt takistus veepinna ja õhuruumi vahel. On leitud, et selle mõju tõttu on õhuvool kanalisatsioonitorudes alati veevoolu suunas, kui tegemist on isevoolse kanalisatsiooniga. Õhukiirus on tavaliselt väiksem kui vee kiirus, kusjuures keskmised õhukiirused jäävad tavaliselt vahemikku 5–30% vee keskmisest kiirusest [47].

Kui torustikus esineb kalde erinevusi, siis suurema kalde ja väiksema kalde sektsioonides tekib õhuvoolu erinevus ning õhuvoolu erinevus väljub lähimast luugist. See juhtub näiteks siis, kui kalle väheneb, mistõttu vee sügavus suureneb ja vee kiirus väheneb. See ei põhjusta mitte ainult õhu kiiruse vähenemist, vaid ka õhuruumi vähenemist, mis omakorda põhjustavad õhuvoolu olulise languse (joonis 1). Kui juhtub vastupidine olukord, siis õhk liigub kanalisatsiooniluugist sisse. Mitmed väliuuringute tulemused on järjekindlalt näidanud, et õhuvoolu kiirus on sõltuvuses mitmetest muudest faktoritest, kui ainult vee kiirusest [48].

**Õhurõhk.** Kui kanalisatsiooni süsteem oleks suletud, oleks õhurõhu arvutus võrdlemisi lihtne. Tõelises kanalisatsioonisüsteemis on mitmeid avasid, nagu näiteks kaevud ja šahtid. Seejuures mõjutavad õhurõhu erinevused õhuvoolu võrdlemisi vähe [70].

**Niiskus ja temperatuur.** Kanalisatsioonisüsteemide õhk on sageli välisõhust väiksema tihedusega (Pescod ja Price 1981). See on tingitud kahest tegurist: niiskus ja temperatuur. Kuivõrd veeauru molekulmass on 18 g/mol, siis on see vähem tihe kui nii lämmastik ( $N_2$ , 28 g/mol) või hapnik ( $O_2$ , 32 g/mol). Kanalisatsiooniõhk on oma niiskuse tõttu seega välisõhust kergem. Talvel on kanalisatsiooniõhk ka valdavalt soojem ja seega samuti välisõhust kergem [47].

**Kõrguse muutused.** Kanalisatsioonitorustike struktuur, kus toimub järsk kõrguste muutus ning reovesi on vabalanguses, võivad tekkida keerised või olukorrad, kus õhuvool on blokeeritud. See põhjustab liigse õhu väljumise kanalisatsiooni luugist [48].

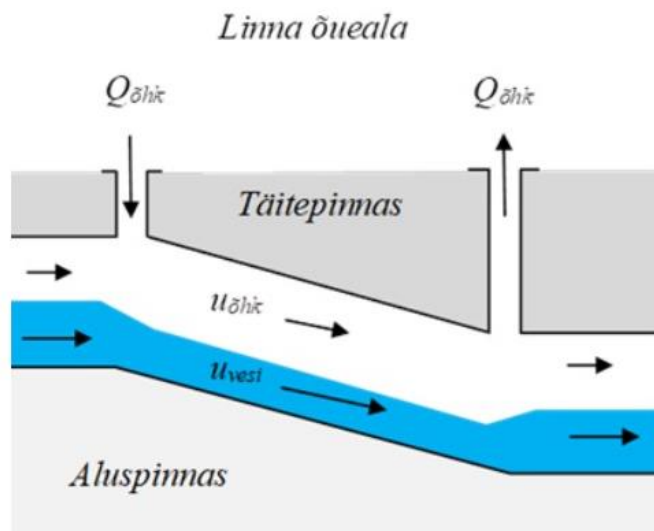
## 4.2. Allika mõjuala arvutamine

### 4.2.1. Üldised põhimõtted

Tallinna piires asuvaid püstikuid saab liigitada mõju poolest kolme kategooriasse. Püstikud, mis paiknevad kõnniteede vahetus läheduses ning avaldavad seega mõju inimestele. Püstikud, mis paiknevad hoonete läheduses ning avaldavad mõju hoonetele ja nende osade kiiremale amortisatsioonide. Püstikud, mis paiknevad võrdlemisi kaugel hoonetest ja

kõnniteedest ning ei avalda otsest mõju linnakeskkonnale. Kanalisatsiooni tuulutuspüstikud paiknevad Tallinna linna erinevates piirkondades ja asukohtades ning nende üldine tuulutuse põhimõte on toodud joonisel 4.5.

Joonis 4.5. Üldine kanalisatsiooni tuulutuse vee- ja õhuvoolu erinevuste korral



Modelleerimisel oli lähtutud Merimetsa piirkonna püstikust, mis asub Kolde pst 104 maja lähedal (joonis 4.6, number 2), sest selle lähedusse jäävad kõrged elamuhooned, park ja mänguväljak. Lisaks sellele on see püstik kõigist kolmest käsitletavast püstikust Merimetsa asumikeskel. Modelleerimisel on võetud aluseks väävelvesiniku kontsentratsioon.

Väävelvesinik on värvitu gaas, mis on madalal kontsentratsioonil tuntud oma terava mädamuna lõhna poolest. Gaas on väga tuleohtlik ja mürgine. Kui aine seguneb õhuga, on selle süttimisvahemik 3,9–45,5 mahuprotsenti. Aine ise süttib temperatuuril 270 °C, omab molekulmassi 34,08 ja suhtelist tihedust õhu suhtes 1,2 [49]. Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris on toodud tabelis 4.1.

Joonis 4.6. Kanalisatsioonitorustik ja kaevud Merimetsa asumis vasakul. Kanalisatsioonitorustiku ventilatsioonipüstik number 2 paremal [43]



Tabel 4.1: Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris [42]

Lõhna mõju inimesele	Kontsentratsioon õhus (ppm)
Lõhna piirmäär	0,0001-0,002
Ebameeldiv ja tugev lõhn	0,5-30
Peavalu; iiveldus; silmade, nina ja kurgu ärritus	30-50
Silmade ja hingamisteede vigastused	50-300
Eluohtlik	300-500
Vahetu surm	>700

Kemikaalide ja saasteainete kontsentratsioone õhus mõõdetakse tavaliselt massiühikutes (milligrammides (mg), mikrogrammides (ug), nanogrammides (ng) või pikogrammides (pg)) õhumahu (m<sup>3</sup>) kohta. Kontsentratsioone võib aga väljendada ka miljondikosana (ppm) kasutades teisendustegureid. Miljondikosa väljendab lahustunud aine massi (g) ja 10<sup>6</sup> lahuse mass (g) jagatist. Teisendustegur põhineb kemikaali või saasteaine molekulmassil ja on iga kemikaalil erinev. Arvutamist mõjutavad ka atmosfääritemperatuur ja rõhk [50].

Need arvutused eeldavad, et 1 mool gaasi kindlal temperatuuril ja rõhul hõivab ideaalse gaasi määratletud molaarmahu [51]. Tavaliselt tehakse õhus leiduvate kemikaalide ümberarvutused rõhuühikul 1 atmosfäär ehk 101 325 Pa ja temperatuuri 25 kraadi Celsiuse järgi.

Käesoleva magistritöö raames teostatakse simulatsioonile eelnevad reostuse leviala teoreetilised arvutused erinevates tingimustes ja simuleeritakse õhureostuse levik suvel

kindlatel temperatuuridel. Alusandmetena kasutatakse Kliimaministeriumi pool kogutud ajalooliste ilmaandmete keskmisi [60]. Seetõttu on vajalik tabeli 1 näitajad teisendada ümber. Kuivõrd miljondikosa (ppm) on suhtelise suuruse mittedünaamilise dimensioonita mõõtühik, siis teisenduse käigus minnakse üle kontsentratsiooni mõõtühikule milligrammi kuupmeetri kohta ( $\frac{mg}{m^3}$ ) teisendamiseks. Teisendamisel kasutatakse ideaalse gaasi olekuvõrrandit (2) ning osarõhkude valemist ehk Daltoni seadusest (3) tulenevat seost [52].

Daltoni seaduse (gaaside segu seaduse) kohaselt on mittereageerivate gaaside segus avaldatav kogurõhk võrdne üksikute gaaside osarõhkude summaga. Seejuures Daltoni seaduse kohaselt on gaasi osarõhu suhe kogurõhust sama, mis on moolide suhe.

Teisendamiseks on seega vajalik leida ideaalse gaasi molaarmahu  $V_m$  ( $\frac{mol}{m^3}$ ) (4) pöördväärtus ning seejärel korrutada see läbi gaasi X molekulmassiga ( $\frac{g}{mol}$ ), tulemusena tekkiv suurus on ühikus  $\frac{kg}{m^3}$ . Kuivõrd miljondikosa määratud saasteaine ja kogu õhu moolsuhte alusel, siis tuleb lisaks valem (4) korrutada läbi suhtarvuga (ppm) \*  $10^{-3}$ , et teisendada suurus ( $\frac{mg}{m^3}$ ) (5).

$$P_g V = nRT \quad (2)$$

kus:  $P_g$  on gaasi absoluutne rõhk, Pa;  
 $V_g$  on gaasi ruumala,  $m^3$ ;  
 $n_g$  on gaasi moolide hulk;  
 $R$  on universaalse gaasi konstant,  $\frac{m^3 \cdot Pa}{mol \cdot K}$ ;  
 $T$  on absoluutne gaasi temperatuur, K.

$$P_g = \sum_i P_i = P_1 + P_2 \dots P_n \quad (3)$$

$$V_m = \frac{V}{n} = \frac{RT}{P} \quad (4)$$

$$X_{\text{kontsentratsioon}} \left(\frac{mg}{m^3}\right) = \frac{1}{V_m} * X_{\text{kontsentratsioon}} (ppm) * 10^{-6} * X_{\text{molekulmass}} \quad (5)$$

Täispikkuses valem teisendamiseks on seega:

$$X_{\text{kontsentratsioon}} \left(\frac{mg}{m^3}\right) = \frac{P}{RT} * X_{\text{kontsentratsioon}} (ppm) * 10^{-6} * X_{\text{molekulmass}} \quad (6)$$

Täiendavalt tuleb mainida, et vesiniksulfiid ( $H_2S$ ) on raskem kui enamik teisi atmosfäärigaase. Väävelvesiniku molekulaarmass on 34,08 g/mol [53]. Seetõttu langeb gaas madalale tasemel ning tõrjub välja õhu. See tähendab, et suletud ruumides võib vesiniksulfiid koguneda põranda lähedale, vähendades hapniku taset. Veeauru kontsentratsiooni tõusuga võib suurendada ka väävelvesiniku difusiooni. See on tingitud asjaolus, et veemolekulid suurendavad õhu üldist molekulide arvu, mis võib põhjustada kuivade tingimustega võrreldes intensiivsemat vesiniksulfiidi levikut. Väävelvesiniku lahustuvus veeaurus võib viia selle gaasi kontsentratsiooni vähenemiseni, sest aine ei tõrju enam maapinna lähedal teisi õhusakesi välja [54].

#### 4.2.2. Õhusaaste erinevates ilmastikutingimustes

Käesoleva lõputöö raames koostatakse teoreetiline õhureostuse, väävelvesiniku liikumise arvutus suviste ja talviste tingimustele, et näitlikustada erinevate ilmastikutingimuste mõju reostuse levikule, vaatamata sellele, et õhusaaste leviku simulatsioon koostatakse ainult suvetingimustele. Tingimusteks on võetud Kliimaministeriumi ajalooliste, 2004-2022 aastate andmete Tallinn-Harku piirkonna keskmised temperatuuri ja rõhuväärtused väärtused mainitud perioodile. Vastavalt Kliimaministeriumi andmetele [52] on kõige külmema keskmise temperatuuriga üle aastate veebruari ning kõrgeima temperatuuriga juuli kuu. Koondatud andmed õhurõhu ja temperatuuri osas on toodud tabelis 4.2. [55].

Tabel 4.2: Keskmise õhurõhk ja temperatuur veebruar, juuli vahemikus 2004-2022 [43]

Kuu	Õhurõhk merepinna kõrgusel (hPa)	Tunni maksimum õhutemperatuur °C	Tunni miinimum õhutemperatuur °C
Veebruar	1013,0	-3,2	-3,7
Juuli	1011,9	17,4	18,5

Talvestsenaariumi jaoks on võetud aluseks veebruari tunni miinimum õhutemperatuur ehk negatiivne temperatuur 3.7 °C. Ideaalse gaasi molaarruumala on arvatatud valemiga 1 [53].

$$R = 8,3145 \frac{J}{mol * K} = 8,3145 \frac{m^3 * Pa}{mol * K}$$

$$T = -3.7 + 273.15 = 269,45 K$$

$$P_g = 1013 hPa = 101300 Pa$$

$$V_m = \frac{V}{n} = \frac{RT}{P}$$

$$V_m = \frac{8,3145 * 269,45}{101300} = 0,0221 \frac{m^3}{mol}$$

$$\frac{1}{V_m} = \frac{1}{0,0221} = 45,22 \frac{mol}{m^3}$$

Kontsentratsioon lõhna piirmäärale on:

$$X_{\text{kontsentratsioon}} \left(\frac{mg}{m^3}\right) = 45,22 * 0,0001 * 10^{-3} * 34,08 = 0,000154 \frac{mg}{m^3}$$

Talvetingimustes on kontsentratsioon milligrammides kuupmeetri kohta ( $\frac{mg}{m^3}$ ) erinevatele lõhna ja inimõhu tasemetele toodud tabelis 4.3.

Tabel 4.3: Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris talvetingimustel

Lõhna mõju inimesele	Kontsentratsioon atmosfääris (ppm)	Kontsentratsioon atmosfääris ( $\frac{mg}{m^3}$ ) talvel
Lõhna piirmäär	0,0001-0,002	0,000154-0,0308
Ebameeldiv ja tugev lõhn	0,5-10	0,7702-15,41
Peavalu; iiveldus; silmade, nina ja kurgu ärritus	10	15,41

Suvestsenaariumi jaoks on võetud aluseks juuli tunni maksimum õhutemperatuur ehk positiivne temperatuur 18.5 °C. Ideaalse gaasi molaarruumala on arvatud valemiga (1) [51].

$$T = 18,5 + 273,15 = 291,65 K$$

$$P_g = 1011,9 hPa = 101190 Pa$$

$$V_m = \frac{8,3145 * 291,65}{101190} = 0,0239 \frac{m^3}{mol}$$

$$\frac{1}{V_m} = \frac{1}{0,0239} = 41,73 \frac{mol}{m^3}$$

$$X_{\text{kontsentratsioon}} \left(\frac{mg}{m^3}\right) = 41,73 * 0,0001 * 10^{-3} * 34,08 = 0,000142 \frac{mg}{m^3}$$

Suvingimustes on kontsentratsioon milligrammides kuupmeetri kohta ( $\frac{mg}{m^3}$ ) erinevatele lõhna ja inimõhu tasemetele toodud tabelis 4.4.



Tabel 4.4. Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris suvetingimustel

Lõhna mõju inimesele	Kontsentratsioon atmosfääris (ppm)	Kontsentratsioon atmosfääris ( $\frac{mg}{m^3}$ ) suvel
Lõhna piirmäär	0,0001-0,002	0,000142-0,00284
Ebameeldiv ja tugev lõhn	0,5-10	0,711-14,22
Peavalu; iiveldus; silmade, nina ja kurgu ärritus	10	14,22

Reykjavikis läbiviidud uuringu tulemusena tuvastati, et väävelvesiniku kontsentratsioon oli kõrgeim siis, kui tuule kiirus linnas oli vahemikus 1,5–4,0 m/s, ning vähenes kiiresti koos suurema tuulekiirusega. Väävelvesiniku kontsentratsioon näitas korrelatsiooni linna õhutemperatuuriga alla 3 °C ja kontsentratsioon tõusis temperatuuri langedes [56].

### 4.2.3. Mõjuala arvutamine teoreetiliselt

Õhusaaste mõju hindamiseks kasutatavad põhilised õhuhajumise mudelid on Gaussi jaotusega saastejoa mudelit GMP (*Gaussian Plume Model*), mis võimaldab õhureostuse arvutada saasteainete potentsiaalset kontsentratsiooni allikast allatuult. Käesoleva lõputöö teemaks oleva õhusaaste levikut reostusallika ja vastuvõtja ehk inimese vahel võib käsitleda meteoroloogilisest seisukohast lühimaa hajumise juhtumiga, sest modelleeritav ulatus on alla 10 kilomeetri [57].

Enamus lühimaa hajumise mudeleid põhinevad eeldusel, et meteoroloogilised tingimused on ruumiliselt homogeensed ja varieeruvad vähe modelleerimiseks huvipakkuva perioodi jooksul, mis on tavaliselt üks tund. Kui meteoroloogiline ajaskaala on üks tund ja tuule kiirus on alla 5 m/s, on püsiseisundi eeldus tõene vaid vahemaade puhul, mis on väiksemad kui 10 km. Õhusaaste leviku ulatus on sageli piiratud tuule kiirusega. Hoolimata nendest piirangutest rakendatakse püsiseisundi simuleerimise mudeleid sageli ka väljaspool nende rakendatavust [57].

Õhusaaste leviku ulatust võib oluliselt mõjutada välisõhu keskkonna kihistumine temperatuuri järgi ehk stratifikatsioon. Teatud tingimustel võib külm õhk olla maapinna lähedal, samas kui kõrgemal asuv õhukiht on soojem. Gaussi mudel ei ole tulemuste poolest sellistes oludes kõige esinduslikum õhusaaste leviku arvutamise mudel. Õhusaaste leviku arvutamisele kihistunud temperatuuriga keskkonnas ei esine ühtset, võrdlemisi laialdaselt kasutatavat standardit [58]. Seetõttu modelleeritakse käesoleva töö raames lisaks õhusaaste levikule suvetingimustes ka saaste levikut stratifikatsiooni korral.

AERMOD ja ISC on Gaussi jaotusega saastejoo mudelite näited. Nende mudelite aluseks on püsiseisundiga määratud joamudel, mis eeldab, et keskmise voolu suuna suhtes kontsentratsiooni jaotuse normaalid jälgivad Gaussi jaotust. Üldine valem aja keskmise kontsentratsioonivälja kirjeldamiseks Gaussi jaotusega (vt joonis 4.7) saab valemiga (3) [57].

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} * \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) * \exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3)$$

kus:  $Q_{\text{suvi}}$  on saasteallika tugevus,  $\frac{g}{s}$ ;

$\sigma_y$  on horisontaalne standardhälve,  $m$ ;

$\sigma_z$  on vertikaalne standardhälve,  $m$ ;

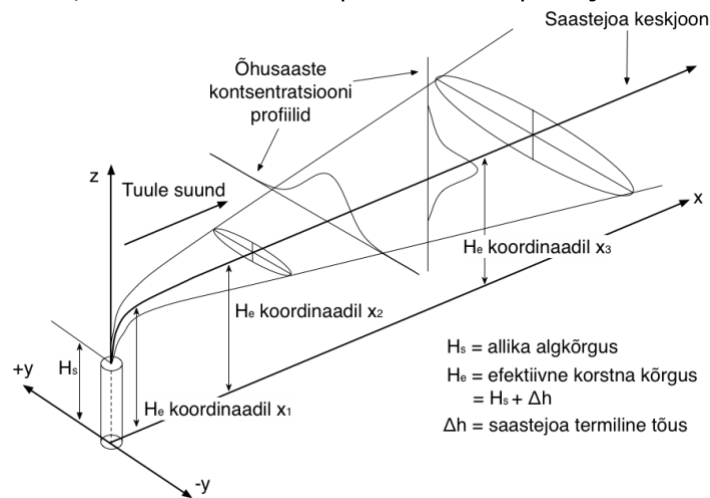
$U_t$  on keskmine tuule kiirus,  $\frac{m}{s}$ .

$H$  on allika kogupikkus koos püstiku ja saastejoaga,  $m$ ;

$y$  on  $y$ -koordinaat saastejoo keskjoonest,  $m$ ;

$z$  on  $z$ -koordinaat maapinnast,  $m$ .

Joonis 4.7. Gaussi jaotus, mida kasutatakse punktallikast pärit joo modelleerimiseks [59]



Valmis (3) on kõrgus  $H$  püstiku kõrguse ( $H_s$ ) ja saastejoo kõrgus ( $\Delta h_{\text{joo kõrgus}}$ ) summa. Neutraalsete ja ebastabiilsete atmosfääritingimuste korral saab ujuva tõusu arvutada järgmiselt:

$$\Delta h_{\text{joo kõrgus}} = \frac{21,245 * F^{0,75}}{U} \quad (F < 55 \frac{m^4}{s^3}) \quad (4)$$

$$\Delta h_{\text{joo kõrgus}} = \frac{38,71 * F^{0,6}}{U} \quad (F > 55 \frac{m^4}{s^3}) \quad (5)$$

Valemities (4) ja (5) saab ujuvusvoo  $F$  arvutada valemiga (6):

$$F = \frac{g \cdot V_S \cdot d^2 \cdot (T_S - T_a)}{4 \cdot T_S} \quad (6)$$

kus  $V_S$  on väljuva saasteõhu kiirus,  $\frac{m}{s}$ ;

$d$  on püstiku diameeter  $m$ ;

$T_S$  on väljuva saasteõhu temperatuur,  $K$ ;

$T_a$  on ümbritseva õhu temperatuur,  $K$ ;

$g$  on gravitatsioon,  $9,8 \frac{m}{s}$ .

Valemis  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  tähistavad horisontaalseid ja vertikaalseid standardhälbed meetrites. Nende arvutamine toimub Pasquilli stabiilsusklassi aluses, mis loodi dispersioonitingimuste kirjeldamiseks vastavalt meteoroloogilistele tingimustele. Pasquilli stabiilsusklassi alusel on jaotatud A-F kategooriatesse ning täpsemalt lahti kirjeldatud tabelis 4.5. [59].

Tabel 4.5. Pasquilli stabiilsusklass [58]

Klass	Kirjeldus
A	Äärmiselt ebastabiilsed tingimused
B	Mõõdukalt ebastabiilsed tingimused
C	Veidi ebastabiilsed tingimused
D	Neutraalsed tingimused
E	Veidi stabiilsed tingimused
F	Mõõdukalt stabiilsed tingimused
G	Äärmiselt stabiilne

Pasquilli stabiilsusklassi määramiseks kasutatakse meteoroloogilisi tingimusi, mis on kirjeldatud tabelis 4.6.

Tabel 4.6. Pasquilli stabiilsusklasside määravad meteoroloogilised tingimused [60]

Maapinna tuule kiirus (m/s)	Päevane insolatsioon			Õised tingimused	
	Tugev	Keskmine	Madal	Õrn pilvisus või madal pilvisus > 4/8	<= 4/8 pilvisus
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	D	D	D	D	D

Vastavalt Pasquilli stabiilsusklassile tuletatakse valemiga (4)  $\sigma_y$  (m) ja valemiga (5)  $\sigma_z$  (m).

$$\sigma_y = 465,11628 \cdot (x) \cdot \tan(0,017453293 \cdot [c \& d \ln(x)]) \quad (7)$$

, kus  $x$  (km) on vahemaa allika algpunktist kuni soovitud kauguseni. Suurused  $c$  ja  $d$  saadakse tabelist 4.7 vastavalt Pasquilli stabiilsuse kategooriale.

Tabel 4.7. Abisuurused  $\sigma_y$  leidmiseks [60]

<b>Pasquilli stabiilsuse kategooria</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
A	24,167	2,5334
B	18,333	1,8096
C	12,5	1,0857
D	8,333	0,72382
E	6,25	0,54287
F	4,1667	0,36191

$$\sigma_z = a * x^b \quad (8)$$

, kus  $x$  (km) on vahemaa allika algpunktist kuni soovitud kauguseni. Suurused  $a$  ja  $b$  saadakse tabelist 4.8 vastavalt Pasquilli stabiilsuse kategooriale. Tabel on esitatud kärbitud kujul, selles mahus, mis katab käesoleva magistritöö vajadused ära.

Tabel 4.8. Abisuurused  $\sigma_z$  leidmiseks [60]

<b>Pasquilli stabiilsuse kategooria</b>	<b>x (km)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
A	<0,10	122,800	0,94470
A	0,10-0,15	158,080	1,05420
B	<0,20	90,673	0,93198
C	Kõik	61,141	0,91465
D	<0,30	34,459	0,86974
E	<0,10	24,260	0,83660
E	0,10-0,30	23,331	0,81956
F	<0,20	15,209	0,81558

#### 4.2.4. Mõjuala erinevates ilmastikutingimustes

Allika mõjuala ligikaudse väärtuse saamiseks võetakse aluseks Kliimaministeeriumi tuuleandmed Tallinn-Harku piirkonnale [60], mis kehtivad veebruar ja juuli kuudele (tabel 4.9).

Tabel 4.9. Keskmise tuulekiirus ja suund veebruar, juuli vahemikus 2004-2022

<b>Kuu</b>	<b>10 minuti keskmine tuule kiirus (m/s)</b>
Veebruar	3,2
Juuli	2,7

Loomuliku ventilatsiooniga püstikutes on väljuva heitõhu kogus  $23 - 840 \frac{l}{s}$  ehk  $0,023 - 0,84 \frac{m^3}{s}$ . [60] Käesoleva töö raames on võetud näitajate keskvärtus  $0,43 \frac{m^3}{s}$ . Tuulutuspüstiku

kõrguseks on võetud 3 meetrit ning sisemõõduks on võetud kanalisatsiooni kaevurõngas diameetriga 1 m [21]. Püstikust väljuva heitõhu temperatuuriks  $\leq 15$  °C [63].

Tallinna Tehnikaülikool teostab reostuse mõõdistusi magistritöö koostamise ajal. Seetõttu ei ole mõõdistuste tulemused lõplikud ning modelleerimise aluseks võetakse näitajad olemasolevast kirjandusest, mis on mõõdistustulemustega samas vahemikus. Enamik Euroopa Liidu riike on määranud tavalistes töötingimustes vesiniksulfiidi kontsentratsiooni õhus 10-15  $\frac{mg}{m^3}$  (7-10 ppm), mis on 8 tunni kaalutud keskmine [6].

Kuivõrd need näitajad on seotud väliste temperatuuriga ja rõhuga, siis vastavalt eelnevalt väljaarvutatule võetakse talvetingimustes kanalisatsioonipüstikust maksimaalselt väljuvaks kontsentratsiooniks 14,22  $\frac{mg}{m^3}$  ning suvetingingustes 15,00  $\frac{mg}{m^3}$ , tulenevalt Euroopa Liidu töötingimuste nõudele. Lõplikud näitajad talve ja suvetingimustele on toodud tabelis 4.10.

Väljuv väävelvesiniku kogus on seega talvel:

$$Q_t = 14,22 * 0,43 = 6,11 \frac{mg}{s} = 0,00611 \frac{g}{s}$$

ja suvel:

$$Q_s = 15 * 0,43 = 6,45 \frac{mg}{s} = 0,00645 \frac{g}{s}$$

Ujuvusvoog ning sellest tulenev joa kõrgus ja kogukõrgus on talvel järgmised:

$$F_t = \frac{9,81 * 0,55 * 1^2 * (288,15 - 269,45)}{4 * 288,15} = 0,07 \frac{m^4}{s^3}, F < 55 \frac{m^4}{s^3}$$

$$\Delta h_{joa\ kõrgus} = \frac{21,245 * 0,07^{0,75}}{3,2} = 0,9\ m$$

$$H = H_s + \Delta h_{joa\ kõrgus} = 3 + 0,9 = 3,9\ m$$

ja suvel:

$$F_t = \frac{9,81 * 0,55 * 1^2 * (288,15 - 291,65)}{4 * 288,15} = -0,0013 \frac{m^4}{s^3}, F < 0 \frac{m^4}{s^3} = 0 \frac{m^4}{s^3}$$

$$\Delta h_{joa\ kõrgus} = \frac{21,245 * 0^{0,75}}{3,2} = 0\ m$$

$$H = H_s + \Delta h_{j\text{oa} \text{ kõrgus}} = 3 + 0 = 3,0 \text{ m}$$

Tabel 4.10. Allika reostuse leviku aluseks võetud näitajate koondtabel

Näitajad	Näitajad talvel	Näitajad suvel
Püstiku diameeter	1 m	1 m
Püstiku kõrgus	3 m	3 m
Püstikust väljuva heitõhu temperatuur	15 °C = 288,15 K	15 °C = 288,15 K
Püstikust väljuva heitõhu kogus	0,43 $\frac{m^3}{s}$	0,43 $\frac{m^3}{s}$
Püstikust väljuva heitõhu kiirus	0,55 $\frac{m}{s}$	0,55 $\frac{m}{s}$
Püstikust väljuva heitgaasi kontsentratsioon	14,22 $\frac{mg}{m^3}$	15,00 $\frac{mg}{m^3}$
Püstikust väljuva väävelsiniku kogus	0,00611 $\frac{g}{s}$	0,00645 $\frac{g}{s}$
Pasquilli stabiilsuse kategooria	C	A

Talvestsenaariumi jaoks on võetud aluseks veebruari 10 minuti keskmine tuule kiirus ehk 3,2 m/s. Pasquilli stabiilsuse kategooriaks on võetud C ning simuleeritakse päevaseid tingimusi.

Reostuse allika mõju arvutatakse mõõda selle y-telje kulgemise keskjoont  $y = 0$  m ning saastejoo kõrgusel  $z = 3.9$  m, kuivõrd talvel ei jõua juga temperatuurimuutuste tõttu langeda inimese kõrgusele. Valemiga (3) leitakse proovimise teel, et kaugus allika keskpunktist lõhna piirmäära alammääradele ( $0,000154 \frac{mg}{m^3}$ ) on 0,530 km ehk 530,0 m. See kaugus ei ole aga linnaruumis realistlik kuivõrd teoreetiline mudel ei võta arvesse linnas esinevaid erinevaid ehituslikke vorme, mis piiravad reostuse levikut. Seetõttu võetakse ala suurus, mis vastab lõhna piirmäära ülemmääradele ( $0,00308 \frac{mg}{m^3}$ ), milleks on 0,107 km ehk 107 m.

$$\sigma_y = 465,11628 * (0,107) * \tan(0,017453293 * [12,5 * 1,0857 * \ln(0,107)]) = 13,27 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 61.141 * 0.16^{0.91465} = 7.92 \text{ m}$$

$$C(0,0107, 0, 1,7) = \frac{0,00611}{2\pi * 13,27 * 7,92 * 3,2} * \exp\left(-\frac{0^2}{2 * 13,27^2}\right) * \exp\left(\frac{-(3,9 - 3,9)^2}{2 * 7,92^2}\right) = 3,05 * 10^{-6} \frac{g}{m^3}$$

$$= 0,00305 \frac{mg}{m^3}$$

Kuivõrd 107,0 m on kaugus allika keskpunktist kuni selle mõjualani ühesuunaliselt siis iseloomustab see modelleeritava piirkonna raadiust. Teised väärtused, mis vastavad ebameeldiva lõhna ning peavalu tekitavale lõhna piirmääradele on saadud analoogse protsessiga. Võimalikku peavalu tekitava lõhna korral on kasutatud arvutamisel  $z = 3,9$  m kõrgust, sest selline väävelsiniku kontsentratsioon tekib väga lähedal allikale ning selle mõjuala sees ei jõua saastejuga alaneda kõrgusele 1,7 m, mida kasutati eelnevalt. Kõik väärtused on esitatud tabelis 4.11.

Tabel 4.11. Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris, maksimumpiirväärtusega 10 ppm.

Lõhna mõju inimesele	Kontsentratsioon atmosfääris ( $\frac{mg}{m^3}$ ) talvel	Mõjuala raadius talvel (m)
Lõhna piirmäär	0,000154-0,00308	530,0-107,0
Ebameeldiv ja tugev lõhn	0,7705-15,41	14,8-1,0
Peavalu; iiveldus; silmade, nina ja kurgu ärritus	15,41	1,0

Suvestsenaariumi jaoks on võetud aluseks juuli 10 minuti keskmine tuule kiirus ehk 2.7 m/s. Pasquilli stabiilsuse kategooriaks on võetud A ning simuleeritakse päevaseid tingimusi. Reostuse allika mõju arvutatakse mõõda selle y-telje kulgemise keskjoont  $y = 0$  m ning keskmise Eesti inimese kõrgusel  $z = 1.7$  m. Valemiga 3 leitakse proovimise teel, et kaugus allika keskpunktist lõhna piirmäära alammääradele ( $0,000154 \frac{mg}{m^3}$ ) on 0,29 km ehk 290,0 m. See kaugus ei ole aga linnaruumis realistlik kuivõrd teoreetiline mudel ei võta arvesse linnas esinevaid erinevaid ehituslikke vorme, mis piiravad reostuse levikut. Seetõttu võetakse ala suurus, mis vastab lõhna piirmäära ülemmääradele ( $0,00308 \frac{mg}{m^3}$ ), milleks on 0,059 km ehk 59 m.

$$\sigma_y = 465,11628 * (0,059) * \tan(0,017453293 * [24,167 * 2,5334 * \ln(0,059)]) = 16,70 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 122.8 * 0.057^{0.9447} = 8.47 \text{ m}$$

$$C(0,057, 0, 1,7) = \frac{0,00645}{2\pi * 16,70 * 8,47 * 2,7} * \exp\left(-\frac{0^2}{2 * 16,70^2}\right) * \exp\left(\frac{-(1,7 - 4,26)^2}{2 * 8,47^2}\right) = 2,81 * 10^{-6} \frac{g}{m^3}$$

$$= 0,00281 \frac{mg}{m^3}$$

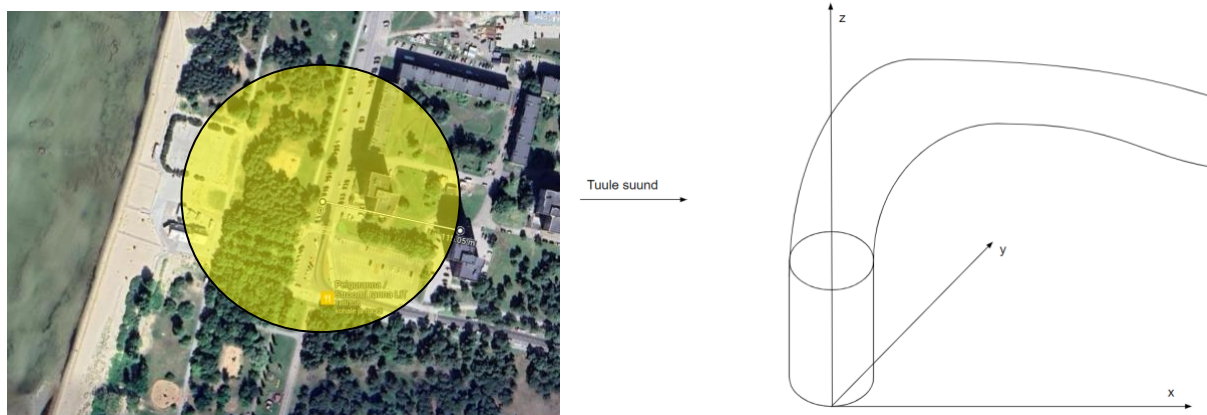
Kuivõrd 59,0 m on kaugus allika keskpunktist kuni selle mõjualani ühesuunaliselt siis iseloomustab see modelleeritava piirkonna raadiust. Teised väärtused, mis vastavad ebameeldiva lõhna ning peavalu tekitavale lõhna piirmääradele on saadud analoogse protsessiga. Võimalikku peavalu tekitava lõhna korral on kasutatud arvutamisel  $z = 3,0$  m kõrgust, sest selline väävelvesiniku kontsentratsioon tekib väga lähedal allikale ning selle mõjuala sees ei jõua saastejuga alaneda kõrgusele 0,58 m, mida kasutati eelnevalt. Kõik väärtused on esitatud tabelis 4.12.

Tabel 4.12. Väävelvesiniku lõhn ja inimeste tervisega seotud mõju atmosfääris, maksimumpiirväärtusega 10 ppm

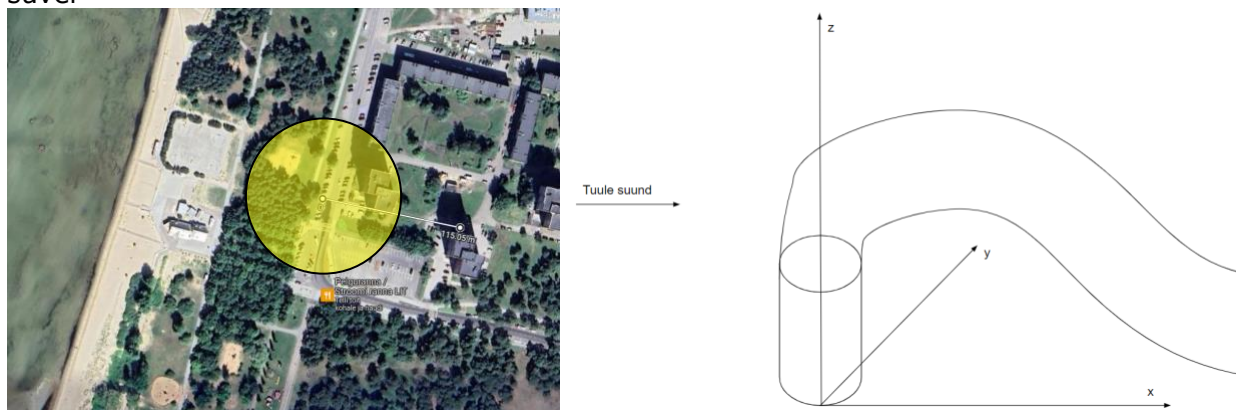
Lõhna mõju inimesele	Kontsentratsioon atmosfääris ( $\frac{mg}{m^3}$ ) suvel	Mõjuala raadius suvel (m)
Lõhna piirmäär	0,000142-0,00284	290,0-59,0
Ebameeldiv ja tugev lõhn	0,711-14,22	8,15-0,58
Peavalu; iiveldus; silmade, nina ja kurgu ärritus	14,22	0,58

Modelleerimisel on valitud lõhna piirmäära ülemmäär talve tingimustes ehk  $0,00308 \frac{mg}{m^3}$  ning sellele vastava mõjuala raadius 107,0 meetrit ning keskpunktiks allikas number 2. Alloleval joonisel on toodud näitlikustav allika mõjuala kaugus alammäära korral nii talve kui ka suve tingimustes.

Joonis 4.8. Illustratiivne võimalik väävelvesiniku mõjuala lõhna piirmäära alammäära korral talvel tuulega



Joonis 4.9. Illustratiivne võimalik väävelvesiniku mõjuala lõhna piirmäära alammäära korral suvel





## 4.3. Lahenduse koostamine

Õhusaaste modelleerimise lahendus põhines Eesti 3D kaksiku geomeetriliste andmete kasutamisel, mis on leitavad ja võimalik alla laadida Ehitisregistris 3D kaksiku veebilehelt. Tuleb mainida, et koostatav lahendus ei ole seotud ainult Eesti linnade 3D mudeliga. Sobivateks andmeteks on igasugused geomeetrilised andmed, mida saab teisendada STL formaati.

Ehitisregister kasutab maa-ameti aluskaarti. Andmed on laetud alla L-EST97 koordinaatsüsteemis, mis on Lamberti konformne kooniline projektsioon [64].

### 4.3.1. Geomeetriliste andmete laadimine

Õhumodelleerimise lahenduse esimene etapp koosnes Ehitisregistri 3D kaardil sobiva piirkonna tuvastamisest ning selle piirkonna kohta geomeetriliste andmete laadimist. Andmeid laeti alla ligikaudselt sobiliku piirkonnana (joonis 4.10), mida keskkond võimaldab teha. Allalaetava failiformaadina valiti Collada DAE formaat, sest see osutus kõigist kolmest valikust (CityGML XML, Collada DAE, IFC) kõige sobilikumaks käesoleva ülesande teostamiseks, et tagada eksporditavate andmete täielik säilivus. Collada DAE failiformaat võimaldab 3D-loomisrakendustel vabalt vahetada digitaalset infot ilma kadudeta [65].

Joonis 4.10. Andmete laadimine Ehitisregistri 3D kaksikust



3D kaksik annab allalaadimisel kaks valikut allalaetava geomeetria täpsusaste osas, LoD1 ja LoD2. LoD (*Level of Detail*) tähistab geomeetria täpsust. LoD1 on ehitise prismaatiline mudel, mis kujutab endast ette ehitise pinnalaotuse, mis on muundatud ehitise kõrguseks. LoD2 täpsusaste tähistab lihtsat mudelit, millel on eristuv katusekonstruktsioon ja esile toodud

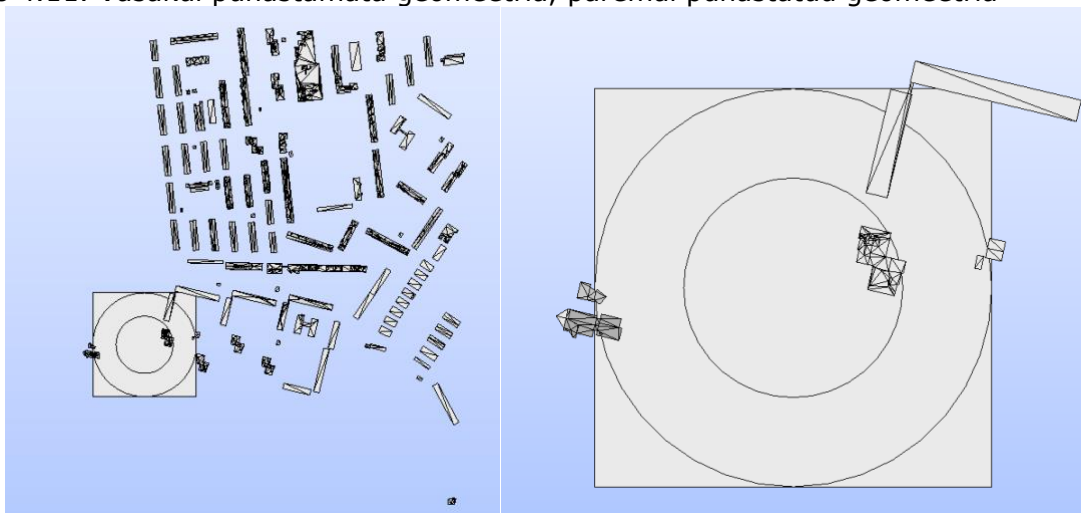
piirdepinnad. LoD2 on erinevate energiaanalüüside teostamisel kõige enam kasutatud täpsustase [65]. Lisaks sellele osutus Ehitisregistrist LoD1 andmete laadimisel, et LoD1 täpsuse korral olid mitmed ruumilised objektid nagu garaažid esitatud pindadena. Selle jaoks, et mudel oleks võimalikult esinduslik ruumiliste objektide poolelt, oli tehtud valik kasutada täpsusastet LoD2. Maapinna geomeetria 3D kaksikust ei laetud alla, kuna see ei mõjutaks õhusaaste leviku tulemusi märkimisväärselt ning samas suurendaks selle olemasolu suurendaks õhuruumi võrgu kompleksust ja arvutamise tõhusust.

### **4.3.2. Geomeetriliste andmete teisendamine, puhastamine ja täiendamine**

Pärast alusandmete laadimist teisendatakse need Collada DAE formaadist STL formaati, mis on arvutipõhise disaini kasutamisel üks enimlevinuid formaate. STL-fail kirjeldab geomeetrilist kujundit töötlemata ja struktureerimata kolmemõõtmelise ristkoordinaatsüsteemiga, mis on määratletud kolmnurkade ühiknormaali ja tippe. Teisendust STL failiformaati on vajalik, et eemaldada liigne geomeetiline info ning STL on üks failiformaatidest, mida kasutab ka õhusaaste simuleerimise tarkvara võrgu loomisel [67].

Geomeetriliste andmete teisendamise järgselt eemaldatakse üleliigne geomeetria, mis oli laetud 3D kaksikust. Jätakse alles ainult see geomeetria, mis jääb arvutatud allika mõjuala sisse (joonis 4.11). Seejärel lisatakse geomeetria ruudukujuline pind, mis simulatsioonis tähistab ja käitub maapinnana. Arvutuse tõhustamiseks oli tehtud otsus kasutada ruudukujulist maapinda ja mitte ringikujulist, kuivõrd viimane suurendaks võrguloomise raskusastet. Ruudukujulise pinnaks võetakse mõjuala ringi puutujate ristumistest vahele jääv ala, mis on paralleelsed X ja Y koordinaatidega. Tuleb märkida, et tekkinud ruudukujuline pind on suurem ringikujulisest allika mõjualast, ent see ei mõjuta õhusaaste simulatsiooni tulemusi. Maapinnale lisatakse seejärel saasteallika number 2 ava, milles suuruseks sai ruudukujuline väljalõige pikkusega 1m ja laiusega 1m.

Joonis 4.11. Vasakul puhastamata geomeetria, paremal puhastatud geomeetria



Kõik täiendused geomeetrilistele andmetele olid tehtud tarkvaras Salome 9.9.0, mis on avalikult kättesaadav vabavara. Käesoleva töö autoril on selle tarkvaraga pikaajaline kogemus. Käesoleva töö raames Salome 9.9.0 tarkvaras tehtud muudatusi on võimalik teha ka teistes CAD tarkvarades STL failiformaadi universaalsuse tõttu.

### 4.3.3. Täiendatud geomeetriliste andmete eksportimine

Tekkinud geomeetrilised andmed olid eksporditud tarkvarast Salome 9.9.0 STL formaadis (tabel 4.13).

Tabel 4.13. Õhusaaste modelleerimise geomeetria failide nimetused koos kirjeldustega

Geomeetria faili nimetus koos laiendiga	Geomeetria faili kirjeldus
ground.stl	Maapind
houses.stl	Kõigi allika mõjupirikonna sisse jäävate ehitiste pind
duct_2.stl	Allika number 2 ava pind

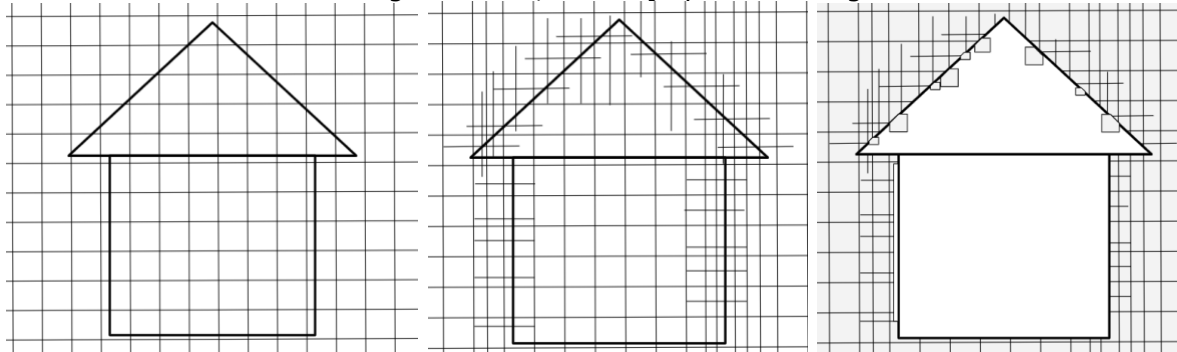
STL failid kopeeritakse tarkvara OpenFOAM kausta *constant/triSurface*.

### 4.3.4. Õhuruumi võrgu loomine

Õhusaaste simuleerimiseks on vaja tekitada eksporditud linna ehitiste geomeetriaale õhuruum ehk õhuosakeste võrk, mis võimaldaks näitlikustada saasteosakeste liikumist. Võrk luuakse tarkvara OpenFOAM v1912 töövahendiga *snappyHexMesh*. *SnappyHexMesh* utiliit loob automaatselt kolmemõõtmelisi võrgustikke, mis sisaldavad kuusnurkseid (*hex*) ja jaotatud kuusnurkseid (*split-hex*) elemente kolmnurksetest pindadest STL formaadis. Võrk sobitub

ligikaudu teda ümbritsevale geometriale ning iteratiivselt täiustab enda algvõrgustikku, et kohandada see pinnaga (joonis 4.12). Võrgu loomist on võimalik kohandada erinevate parameetritega, mis võimaldavad kohandada võrgu kvaliteeti ja sobilikkust [69].

Joonis 4.12. Vasakul taustavõrgu loomine, keskel ja paremal võrgu täiustamine



Võrgu tekitamiseks kasutatakse standardset OpenFOAM-i kaustastruktuuri. OpenFOAM-i simulatsiooni failistruktuur koosneb kolmest põhikaustast. Kaust *0* sisaldab kõiki simulatsioonis lahendatud väljade alg- ja piirtingimusi. Kaust *constant* sisaldab kõigi simulatsioonis kasutatud mudelite konfiguratsioonifaile, nagu turbulentsimudel, transpordiomadused, termilised omadused jne. Kaust *systems* kasutab diskrediteerimise skeeme, iteratiivseid lahendajaid ja lahenduse juhtimise konfiguratsioone. OpenFOAM-i simulatsiooni üldine failistruktuur on toodud allpool. Kaustastruktuurist on väljajäetud need osad, mida ei kasutata võrgu loomisel.

- 0
  - ...
- constant
  - ...
  - triSurface
    - ground.stl
    - houses.stl
    - duct\_2.stl
- system
  - blockMeshDict
  - decomposeParDict
  - surfaceFeatureExtractDict
  - controlDict
  - snappyHexMeshDict
  - ...

Protsessi ja töövoogu selguse huvides genereeritakse võrk eraldi kaustas ja kopeeritakse valminud võrk tegelikku simulatsiooni kausta.

**blockMesh.** Võrgu loomiseks *snappyHexMesh*-i utiliiga on esmalt vajalik luua tasutavõrk, mis koosneb suurtest plokkidest läbi utili *blockMesh*. Selle sätteid salvestatakse ja

muudetakse asukohas *constant/polyMesh/blockMeshDict*. *blockMesh*-i seadistustes on vajalik määrata õhuruumi suuruse läbi X, Y ja Z minimaalsete ja maksimaalsete koordinaatide. Suuruse määramisel lähtutakse Ehisregistri 3D kaksiku veebilehelt alla laetud andmete koordinaatidest tarkvaras Salome 9.9.0, ilma neid muutmata. X ja Y koordinaadid tulenesid allika number 2 mõjuala arvutusest eespool ning Z koordinaadid simuleeritava linnaruumi kõige madalama ja kõrgeima punktiga.

$$X_{min} = 1177 \text{ m}, Y_{min} = 642 \text{ m}, Z_{min} = 0 \text{ m}$$

$$X_{max} = 1392 \text{ m}, Y_{max} = 857 \text{ m}, Z_{max} = 50 \text{ m}$$

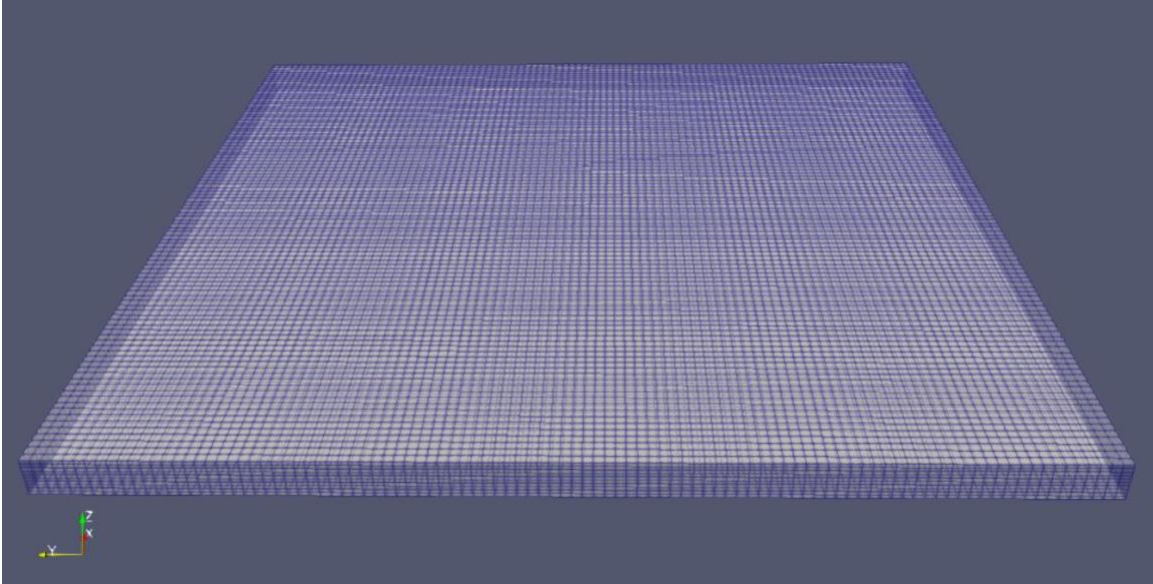
Võrguloomiseks määratakse X ja Y suunda kummalegi 100 võrguelementi ning Z suunda 20 võrguelementi, et võrguelementide suurus oleks enamvähem võrdne. (joonis 1.6). Baasvõrgu elementide arv oli määratud kasutatavate arvutiressursside võimekusega.

*blockMesh*-is defineeritakse samuti ka piiritingimuste nimetused. Piiritingimuste nimetused võivad olla vabalt valitud, ent hea tava on otstarbe alusel põhinev nimetus. Käesolevas töös defineeritakse kolm piiritingimust, milleks on sissevoolu pind nimetusega *inlet*, väljavoolu pind nimetusega *outlet* ja pind läbi mille ei toimu vahetust välise ruumiga ehk *wall*.

Kui *blockMesh*-is defineeritud pinnad asuvad STL-i geomeetria piirides, tuvastatakse need järgmises etapis automaatselt simulatsiooni piiritingimustena. Kui need asuvad väljaspool STL-i geomeetriat, lõigatakse need välja ja eemaldatakse.

*blockMesh*i tulemus (jooni 4.13) salvestatakse asukohta *constant/polyMesh/* all, mis erineb järgmiste sammude tulemustest ja seda saab visualiseerida kasutades tarkvara ParaView, mis on interaktiivseks teaduslikuks visualiseerimise tarkvara. Võrgu visualiseerimiseks on vajalik ParaView's määrata algusaeg 0.

Joonis 4.13. *blockMesh*-iga tehtud algne taustavõrk



***castellatedMesh***. Pärast ettevalmistamise etappe kutsutakse esile *snappyHexMesh*. Tähtis on märkida, et *snappyHexMesh* võtab geomeetria failid kaustast *constant/triSurface*, kuhu olid eelnevalt tarkvarast Salome eksporditud STL formaadis geomeetria failid. Tema *snappyHexMesh*-i seaded asuvad asukohas *system/snappyHexMeshDict/*. *snappyHexMesh*-i fail sisaldab kolme astme (*castellatedMesh*, *snap* ja *addLayers*) funktsiooni, mida saab vastavalt seadistada. Käesolevas töös rakendatakse esimest kahte ehk *castellatedMesh* ja *snap*. *addLayers* seadistus on valikuline ning seda ei kasutata, kuna tekkinud võrk on hea tasemega ning sedasi vähendatakse simulatsiooni arvutamiseks vajalikku ressursi. Need seadistused asuvad faili *snappyHexMeshDict* alguses ning näevad välja järgmiselt:

```
castellatedMesh true;  
snap true;  
addLayers false;
```

*castellatedMesh* täidab käesolevas uurimistöös kaks toimingut: (a) jaotab kõik need võrguelemendid väiksemateks osadeks, mis STL geomeetria pinnad läbivad, (b) eemaldab võrguelemendid, mis jäävad väljapoole STL geomeetria piire. Detailsem seletus igale protsessile on allpool.

- a) *snappyHexMeshDict* faili osa *refinementSurface* (koodi väljavõtte allpool) sisaldab kõiki mudeli piiritingimuste STL faile. Poolitajate minimaalne ja maksimaalne arv antakse ette kahe kirjega. Igas kohas, kus STL failis muutub nurk, rakendatakse täiustatakse

võrguelemente, kus nurk  $\varphi \geq \text{resolveFeatureAngle}$ ,  $\varphi_r$  (kraadides).  $\varphi$  on nurk kahe pinnanormaali vahel, millel on ühine serv.  $\varphi_r$  parameeter määrab, millisest hetkest algoritm peab nurka teravaks ning hakkab sellest tulenevalt täpsemat võrku looma. Mida väiksem on kasutaja poolt määratud  $\varphi_r$ , seda täpsem ja keerulisem on tekitatud võrk, mis nõuab simulatsiooni arvutamisel rohkem arvuti ja energia ressursse. Alloleva koodi väljavõtte alusel, kus  $\varphi_r = 30^\circ$  hakkab algoritm muutma võrku täpsemaks ainult sea, kus vähemalt kahe STL geomeetria (näiteks maja katus) vaheline nurk on üle  $30^\circ$ . *refinementSurface* täpsustab, et iga võrguelement, mille läbib STL faili geomeetria, jagatakse minimaalselt  $2^{3 \cdot 2} = 64$ -ks uueks võrguelemendiks.

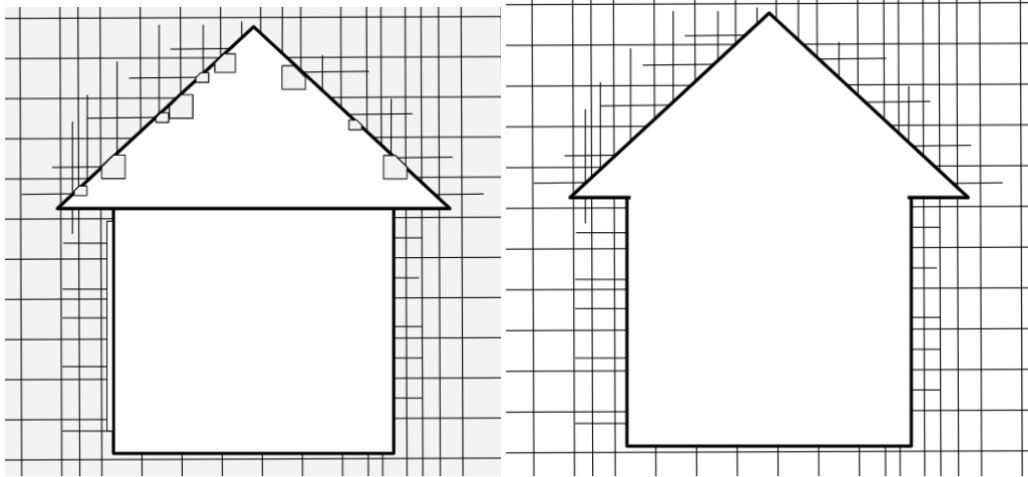
```
refinementSurfaces
{
  houses {level (2 3); patchInfo {type wall;} }
  ground {level (3 3); patchInfo {type wall;} }
  ...
}
resolveFeatureAngle 30;
```

- a) Kõik arvutusdomeenist väljaspoole jäävad *blockMesh*-i loodud võrguelemendid eemaldatakse. Selle määrab ära kasutaja sisestades  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinaadid *locationInMesh* osasse. Koordinaadid võivad olla vabal valitud seni, kuni nad asetsevad selles osas, kuhu peab jääma võrk. Joonise 1 näitel, kui kasutaja soovib võrku väljaspool autot, siis sisestatakse mõni koordinaat, mis jääb väljaspoole STL faili geomeetria määratud auto sisemust. Käesolevas töös kasutatakse töös järgmist seadistust:

```
locationInMesh (1200 700 10);
```

**Snap.** Pärast võrgu suurendamist ja detailiseerimist, rakendatakse *snap* vahend, mis kohandab võrguelemendid STL faili geomeetria. Erinevust *castellatedMesh*-i ja *snap*-i vahel on näha joonisel 4.14.

Joonis 4.14. Võrk pärast funktsiooni `castellatedMesh` rakendamist vasakul. Võrk pärast funktsiooni `snap` rakendamist paremal



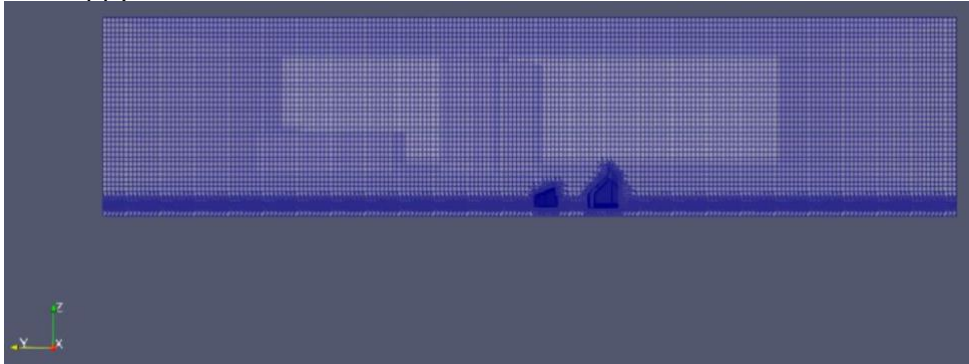
```
snapControls
{
  nSmoothPatch 3;
  tolerance 4.0;
  nSolveIter 30;
  nRelaxIter 5;
  nFeatureSnapIter 10;
  implicitFeatureSnap false;
  explicitFeatureSnap true;
  multiRegionFeatureSnap false;
}
```

**checkMesh.** Pärast võrgu loomist rakendatakse viimane funktsiooni loodud võrgu kontrollimiseks. Kontroll väljastab võrgu parameetrid, nagu võrguelementide arv, ning võrdluse kasutaja poolt eelnevalt määratud suurustega võrgu kvaliteedile.

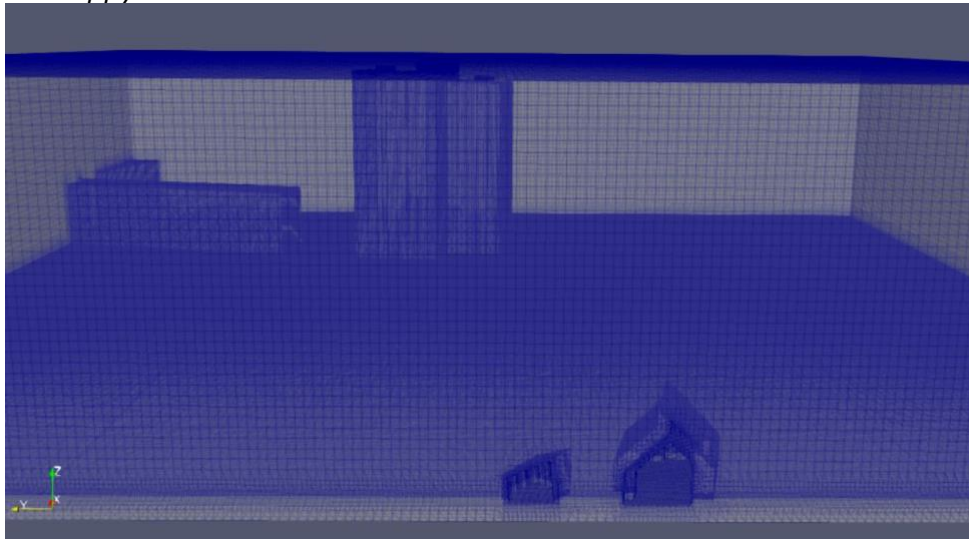
Pärast võrgu detailiseerimise etappide lõpetamist kopeeritakse lõplikud võrguandmed ehk a võrgukausta `2/polyMesh/` arvutuskaustas `constant/polyMesh/`. Käesoleva magistritöö lõplik võrk on illustreeritud joonistel 4.15 ja 4.16.



Joonis 4.15. *snappyHexMesh* kohandatud võrk



Joonis 4.16. *snappyHexMesh* kohandatud võrk



Magistritöö tulemusena valmis võrk suurusega 3,3 miljonit elementi ning see loodi paralleelarvutusega. Paralleelarvutusest ning magistritöös rakendatud arvutusvõimekusest keskendutakse punktis 4.4.

#### 4.3.5. Õhusaaste leviku simulatsiooni lahend

Õhusaastet simuleeritakse ainult suveperioodile, sest talveperioodil ei jõua saaste temperatuurimuutuste tõttu langeda inimeste tasemele ning selle mõju puudub. Suvel on aga välisõhu ja väljuva saasteõhu temperatuuride vahe väike, mis võimaldab saastel langeda inimese kõrgusele.

Õhusaaste simulatsiooni arvutus põhineb tarkvara OpenFOAM lahendil *buoyantPimpleFoam*. Seda lahendit kasutatakse kokkusurumatu, turbulentsse voolu simuleerimiseks soojusülekanedega, võttes arvesse ujuvusefekti. *buoyantPimpleFoam* sobib sellises oludes, kus vedeliku tihedus muutub temperatuuri tõustes oluliselt ning selline tiheduse kõikumine põhjustab voolu liikumist, näiteks loomulik konvektsioon.

*buoyantPimpleFoam* lahend ühendab endas PIMPLE algoritmi, mis on omakorda kombinatsioon PISO ja SIMPLE algoritmidega. See muudab lahendi kasutatavaks suurte ajasammude korral [68]. Lahendit saab hakkama nii laminaarse kui ka turbulentsi voolamise protsessides ning see sisaldab mudeleid erinevate turbulentsi ja kiirguse olude jaoks, et simuleerida soojusülekanne.

Käesolevas magistritöös valiti lahendiks *buoyantPimpleFoam*, sest see on üks sobivaimaid viise linnaruumi õhureostuse modelleerimiseks ning selleks on mitmeid põhjuseid.

**Ujuvusjõud.** *buoyantPimpleFoam* on mõeldud ennekõike ujuvusest tingitud voogude käsitlemiseks, mis on reostuse leviku ja hajumise stsenaariumide puhul tavalised [68]. Linnapiirkondades võib saastatud õhu ja ümbritseva keskkonna temperatuuride erinevus tekitada ujuvusjõude, mis oluliselt mõjutavad hajumist.

**Muutuv voolamine.** Muutuv voolamine on olukord, mille korral voolu omadused, nagu kiirus, rõhk ja tihedus on ajas muutuvad. Õhusaaste levik ja hajumine on dünaamiline protsess, mis aja jooksul areneb ning iseloomustab ebastatsionaarset voolamist ning *buoyantPimpleFoam* võimaldab neid muutuseid simuleerida [68].

**Turbulentsi modelleerimine.** *buoyantPimpleFoam* sisaldab turbulentsi mudeleid, mis on reostuse hajumise oluline osa [68]. Voolamine, eriti õhu voolamine on turbulentne protsess ning linnapiirkonnas, mis on täis hooneid, tänavaid ja keerukaid geomeetriaid, on turbulentsiga arvestamine tähtsal kohal.

**Mitmefaasiline voolamine.** Lahendit saab kasutada mitmefaasiliste vooluprotsesside korral, mis võimaldavad simuleerida olukordi, kus reostus omandab erinevaid olekuid, näiteks gaasiline, vedel, tahke [686]. Käesolevas magistritöös simuleeriti ainult reostuse gaasilist olekut, ent edasiulatuvalt saab sama lahendit rakendada, et simuleerida näiteks tööstuses esinevat reostust, mis on tihti kombinatsioon gaasidest ja tahketest osakekestest.

**Soojusülekanne.** *buoyantPimpleFoam* sisaldab soojusülekanne mudeleid [68]. See on eriti oluline õhusaaste simuleerimisel, sest enamus väljuvaid saasteaineid on välisõhust erineva temperatuuriga.

**Paindlikkus.** Lahend on paindlik enda rakendusvaldkonnas ning seda saab kohendada vastavalt nõuetele.

Magistritöös kasutatud *buoyantPimpleFoam* lahend oli konfigureeritud järgmiselt.

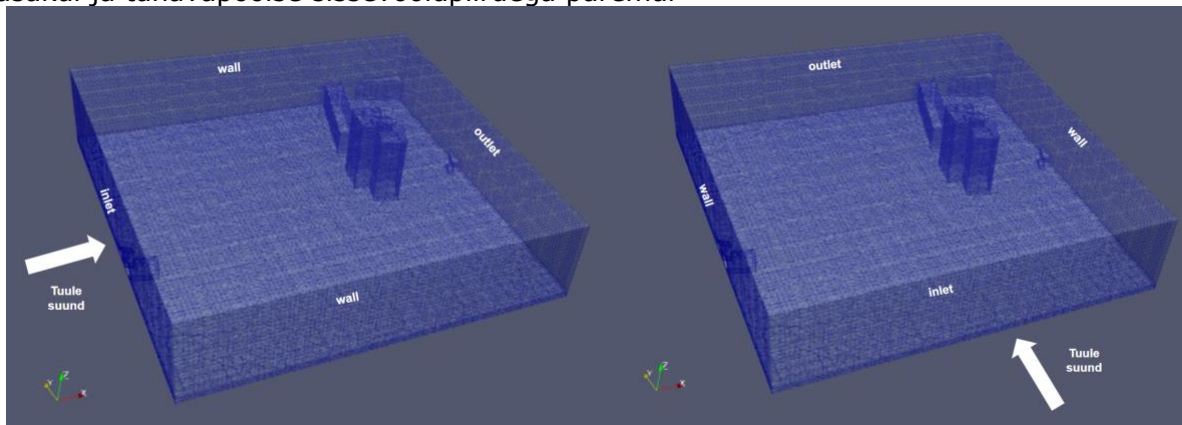
- 0 - kaust
  - alphas
  - epsilon
  - k
  - nut
  - p
  - p\_rgh
  - sa
  - T
  - U
- constant
  - extendedFeatureEdgeMesh
    - ...
  - fvOptions
  - g
  - polyMesh
    - ...
  - thermophysicalProperties
  - triSurface
    - ground.stl
    - houses.stl
    - duct\_2.stl
  - turbulenceProperties
- system
  - blockMeshDict
  - decomposeParDict
  - fvSolution
  - residuals
  - setFieldsDict
  - surfaceFeatureExtractDict
  - controlDict
  - fvSchemes
  - meshQualityDict
  - sample
  - snappyHexMeshDict
  - topoSetDict

Võrreldes esialgsete failidega kohandatakse kaustas 0 kõiki faile, et nendes mainitud piiritingimuste nimetused oleksid õiged. Samuti muudetakse failis T saasteallika ja ümbritseva õhu temperatuuri. Failis U muudetakse saasteallikast väljuva aine kiirust ning tuule kiirust. Temperatuuride ja kiiruste andmed vastavalt suvetingimustele on võetud võrdseteks andmetega, mida kasutati peatükis 4.2.4 allika mõju arvutamiseks.

Magistritöö käigus simuleeriti suvestsenaariumile kaks olukorda. Üks olukord, kus õhusissevoolu piire (*inlet*) on merepoolseim piire ja tema vastas olev piire väljavoolupiire (*outlet*). Teine olukord, kus õhusissevoolu piire (*inlet*) on mööda tänavat ja (*outlet*) on jällegi vastas. Kõik muud piirded on suletud ning märgitud (*wall*). Selline valik oli tehtud, et

lihtsustada simulatsiooni algtingimusi võimalikult selgelt näidata iga olukorra korral saasteaine levikut. Piiritingimused on toodud joonisel 4.17.

Joonis 4.17. Simuleeritava piirkonna piiritingimused merepoolse õhusissevoolu piirdega vasakul ja tänavapoolse sissevoolupiirdega paremal



Magistritöös kasutatav lahend on konfigureeritud algset võimekusele simuleerima kolm saasteallikat. Kuivõrd magistritöö keskendub ainult ühe saasteallika mõju simuleerimisele, siis on teised kaks saasteallikat arvatud välja. Saasteallika faili nimetus on *sa* ning see asub kasutas *0*.

Lahend on koostatud selliselt, kus failis *0/sa* on eraldi määratud saasteallika kontsentratsioon ja failis *constant/fvOptions* on määratud allika massivooluhulk. Fail *sa* ühik sõltub mudeli seadistusest. Kuivõrd käesolevas töös soovitakse, et saasteallikas oleks seadistatud ühikule  $\frac{kg}{m^3}$ , siis tuleb failis *fvOptions* määrata *sa* massivooluhulgana ( $\frac{kg}{s}$ ).

Massivooluhulk ( $\frac{kg}{s}$ ) tuleb sisestada välja *injectionRateSuSp* sisse failis *fvOptions* alamjaotuses *saTransport*. Selliselt seotakse väävelvesiniku kontsentratsioon ja simulatsiooni allika võimsus. Käesolevas magistritöös on emissioonimäär (*m*) arvatud peatükis 4.2.4 toodud andmete alusel, kus suvel on heitõhu kiirus  $0,55 \frac{m}{s}$  ning heitgaasi kontsentratsioon  $14,22 \frac{mg}{m^3}$ . Emissioonimäär suvel (*m<sub>s</sub>*) on:

$$m_s = 0,55 * 14,22 * 10^{-6} = 6,1146 * 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

Arvutusdomeeni stratifikatsiooni temperatuuri järgi saab lisada failis *system/setFields*. Failis tuleb defineerida eraldi regioon, milleks on *boxToCell* ning määrata sellele suurus. Käesolevas töös koostati näidiseks võrguala, mis asub 20 meetrist kõrgemal. Ala nimetati *box*. Ala sees

on vaja omakorda defineerida soovitud temperatuur, milleks käesolevas töös on 239,15 Kelvinit.

```
regions
(
  boxToCell
  {
    box (1177 642 20) (1392 857 50);
    fieldValues
    (
      volScalarFieldValue T 293.15
    );
  }
);
```

#### 4.4. Võrgu ja simulatsiooni arvutus

Magistritöös kasutati võrgu ja simulatsiooni arvutuse läbiviimiseks paralleelarvutust, mis teostati Tallinna Tehnikaülikooli HPC-I (*High Performance Computer*), mis on kõrgjõudlusega andmetöötluks mõeldud arvuti. HPC süsteeme iseloomustab nende võime töödelda suurel kiirusel suuri andmemahtusid ning neid kasutatakse erinevates valdkondades, sealhulgas numbriliseks modelleerimiseks, mis nõuab suures mahus arvutusvõimsust. Käesoleva töö autoril oli loodud eelnevalt HPC klasteri konto.

Paralleelarvutus võimaldab optimeerida töökoormuse jaotamist mitme protsessori vahel, vähendades seeläbi märkimisväärselt võrgu genereerimiseks kuluvat aega. Tähtis on märkida, et aja kokkuhoid saavutatakse ainult siis, kui võrgu suurus on kindlasti üle 50000 elemendi ning keskmine optimaalne jaotus on 50000 elementi ühele protsessorile. See suurus on sõltuvuses olenevalt geomeetria raskusastmest, millele võrku luuakse. Geomeetria raskusaste on määratud erinevate geomeetriliste vormide kombineerimisel.

Siiski on oluline mõista, et kuigi paralleelne töötlemine võib anda arvutusliku tõhususe osas olulisi eeliseid, toob see kaasa ka täiendava keerukuse. Protsessorite vahelise suhtluse haldamine ja töökoormuse õige jaotamine on mõned väljakutsetest. HPC klasteris võimaldab paralleelarvutuse jaoks määrata vajaliku sisendi SLURM skript.

Võrgu loomisel ning simulatsiooni käivitamiseks ja lõpuleviimiseks kasutati SLURM (*Simple Linux Utility for Resource Management*) skripti, mis võimaldab järjest täita käske ilma, et kasutaja peaks neid eraldi sisestama. SLURM skriptid on väga levinud superarvutites ning võimaldavad arvutusressursse tõhusalt jaotada. SLURM skripti käivitatakse käsuga sbatch. Võrgu loomiseks kasutatud SLURM skript on järgmine:

```

#!/bin/bash -l
#SBATCH -n 40
#SBATCH -N 1
#SBATCH --exclusive
#SBATCH -t 1:00:00
#SBATCH -J openfoam-mesh
#SBATCH --partition=common

module load mpi/openmpi-x86_64
source /share/apps/HPC2/OpenFOAM/OpenFOAM-v1912/etc/bashrc
blockMesh
surfaceFeatureExtract
setFields
decomposePar
mpirun snappyHexMesh -parallel
reconstructParMesh
checkMesh

```

Skriptis defineeriti ära soovitud protsessorite arv, milleks on käesoleva töö puhul 40. See protsessorite arv tuleneb autori varasemast kogemusest, töö iseloomust ning Tallinna Tehnikaülikooli HPC keskuse soovitusel. Samuti on määratud, et töö jaoks soovitakse saada üks masin, see tagab parema koordineerituse jaotud ressursside vahel ning töö valmib kiiremini. Töö pikkuseks on märgitud 1 tund, mis tagab arvutussimulatsiooni lõpuleviimise. Arvutuse teostamisel kasutatakse sektsiooni *common*, mis tuleneb samuti autori varasemast kogemusest. Järgnevalt sisestatakse käsured, mida soovitakse, et skript hakkaks ükshaaval täitma. Antud juhul on käsurideks võrgu loomine tarkvaraga OpenFoam.

Simulatsiooni läbiviimiseks kasutatav SLURM skript on oma olemuselt sarnane võrgu loomise skriptiga ning peamiseks erinevuseks on käsured. Simulatsiooni SLURM skript on järgmine:

```

#!/bin/bash -l
#SBATCH -n 40
#SBATCH -N 1
#SBATCH --exclusive
#SBATCH -t 8:00:00
#SBATCH -J openfoam-city
#SBATCH --partition=common

module load mpi/openmpi-x86_64
source /share/apps/HPC2/OpenFOAM/OpenFOAM-v1912/etc/bashrc
constant/polyMesh/boundary
decomposePar
mpirun buoyantPimpleFoam -parallel
reconstructPar

```

Simulatsiooni ja võrgu koostamine paralleelse arvutusega jaotatakse arvutus mitmete protsessorite vahele, antud juhul 40 protsessori vahel. Pärast arvutuse lõpetamist

teostatakse arvutuse rekonstrueerimine, kus pannakse erinevate protsessorite peal teostatud arvutustulemused kokku.

Väljade visualiseerimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli HPC visualiseerimise keskust. Väljade visualiseerimiseks kasutati tarkvara ParaView, mis on avatud lähtekoodiga analüüsi- ja visualiseerimiskirjandus. Programmi kasutati, sest see võimaldab kasutajatel kiiresti koostada visualiseerimisi ja omab mitmeid sisemisi tööriistu, et andmeid paremini tõlgendada või eksportida. Andmete visualiseerimiseks on vajalik luua OpenFoam arvutuskausta uus tühi fail, mille lõpülühend on .foam. Käesolevas töös loodi fail nimega foam.foam.

## 5. Tulemused ja õhusaaste leviku simuleerimise täpsuse tõstmine

### 5.1. Merimetsa õhusaaste leviku arvutamise tulemused

Käesolevas peatükis tuuakse välja Merimetsa õhusaaste leviku modelleerimise tulemused. Kokku simuleeriti kolm olukorda, millest kaks olid suvetingimustega ja üks olukord, kus esineb temperatuuri järgi õhu kihistumine ehk stratifikatsioon. Simuleeritavad olukorrad olid:

- Suvetingimused, kus tuul puhub mööda tänavat
- Suvetingimused, kus tuul puhub mere poolt linna suunas.
- Temperatuuri järgi õhu kihistumine, kus on tuulevaikne ilma ning olukorda, kus maapinna lähedal on madalam temperatuur, kui maapinnast kõrgemal. Sellised olud on omased kevad/sügis perioodile.

#### 5.1.1. Õhusaaste levik tänavapoolse tuulega suvel

Suvel on inimese lõhnapiirmäära ülemine läve  $0,00284 \frac{mg}{m^3}$  ehk  $2,84 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m^3}$ . Suvestsenaariumi vaatluse korral, kus tuul puhub mööda tänavat, võib täheldada õhusaaste levikut parkla ja pargi poole. Võrdlemisi suurest tuulekiirusest tingitult on saastelevik lineaarne ning ei haara ümbritsevaid piirkondi (joonised 5.1 ja 5.2). Saastejoa alla jäävad mõned parklas pargitud autod. See võib olla üks võimalikest ohukohtadest, sest pideva saastejoa all seisvasse autosse võib saaste siseneda.

Seisev auto on oma olemuselt kinnine, ventileerimata ruum ning saasteaine kontsentratsioon võib üleöö pargitud autos tõusta. Tulemusena saab potentsiaalne autot kasutav omanik sattuda ruumi, kus on saasteaine kontsentratsioon lubatust suurem, sest see on sinna üleöö kogunenud. Tähtis on märkida, et tegemist on võimaliku olukorraga ning linnaruumi ei iseloomusta pidevalt ühtlase kiiruse ja suunaga puhuv tuul. Sellegipoolest on vajalik selle olukorraga arvestada.

Lisaks sellele jääb saastejoa trajektoorile üks kõnnitee osa. Kuna kõnnitee ja kanalisatsioonipüstiku vahel ei ole võimalikku saastet takistavaid geomeetrilisi vorme, siis liiguvad gaasid käesolevas olukorras otse tänaval kõndivate inimeste suunas. Muus osas on saastejuga ühtlase trajektooriga ning ei hõlma olulisi ehitisi ega inimeste kogunemise asukohti.



Joonis 5.1. Õhusaaste levik suvel tänavasuunalise tuulega pealtvaates



Kõrvaltvaates on täheldada, et saaste ei jõua olulisel määral tõusta ning maksimaalselt kõrguseks on kuni 5 meetrit. See tähendab, et saastejoa alla satuvad inimesed, kes kõnnivad selle sees. (joonis 5.6).

Joonis 5.2. Õhusaaste levik suvel tänavasuunalise tuulega külgsuunas



### 5.1.2. Õhusaaste levik merepoolse tuulega suvel

Merepoolse tuule korral on täheldada, et saasteainet ei levi enam lineaarselt ning muudab enda kuju läheduses asuva hoone tõttu. Seejuures ei jõua saasteaine hooneni, mis tähendab, et selles elavad inimesed ei pruugi antud tingimuste korral saasteainet tunda. (joonised 5.3

ja 5.4). Peamised ohukohad on saasteaine trajektoori peale jäävad pargitud autod, sõidutee ja jalakäijate tee.

Tähtis on märkida, et saasteaine tee peale jäävad puud ja muud taimed ei olnud käesolevas töös geomeetrilise mudeli osaks. Puud võivad muuta saasteaine liikumist ning hajutatust märgatavalt. Käesoleva stsenaariumi korral ei ole aga nende modelleerimine vajalik, sest peamine saasteaine kontsentratsioon esineb saasteallika läheduses, kus on kõnnitee ja autoparkla.

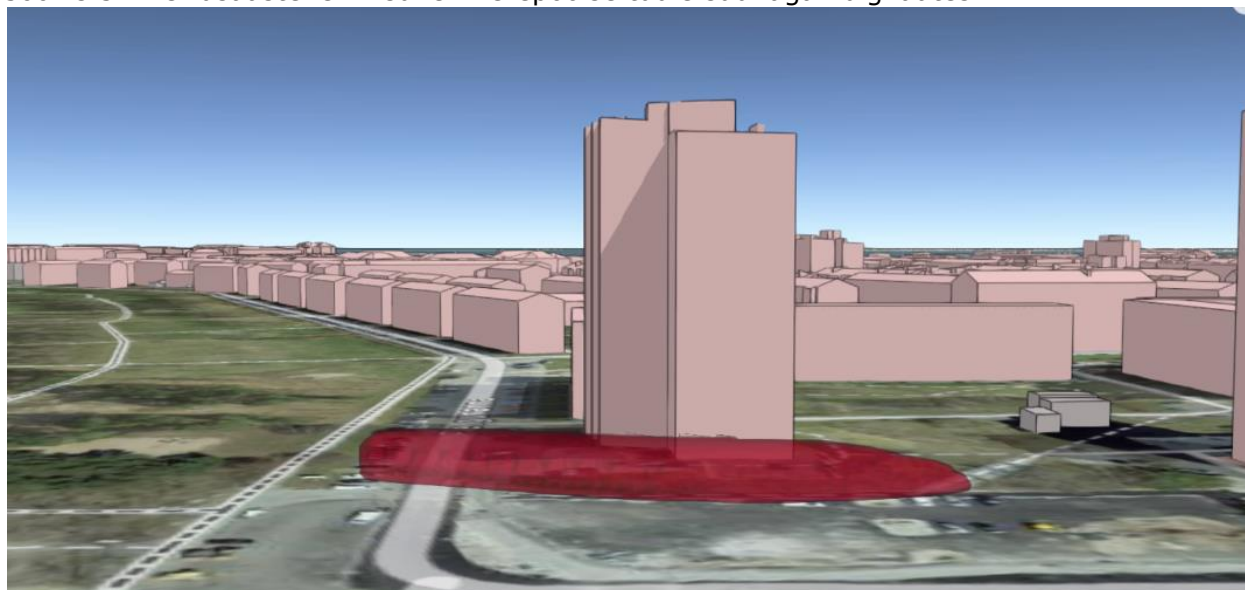
Joonis 5.3. Õhusaaste levik suvel merepoolse tuule suunaga pealtvaates



Kõrvaltvaates (joonised 5.5) võib täheldada, et saasteaine tõuseb ligikaudu samale kõrgusele nagu eelmise stsenaariumi korral. Arvestades, et saasteaine ei jõua korrusmajadeni, siis ei ole kõrgusemuudatus olulise tähtsusega. Muus osas säilivad samad võimalikud ohukohad nagu esimese stsenaariumi korral.

Sellegipoolest on oluline mainida, et teiste ilmastikuolude korral võib ka hoone sattuda saastejoa mõjualasse ning sel juhul on vajalik täpsemalt vaadelda hoones ventilatsiooniavade asukohti ning saastejoa kõrgust. Samuti tuleb arvestada akende asukohaga ja nende vanusega. Vanadel akendel on suuremad õhupilud, läbi mille võib saasteaine maja elanikele teadmata korteritesse siseneda. Olgugi, et tegemist on arvatavasti võrdlemisi väikese kogusega, siis tuleb endiselt hinnata potentsiaalset korterisse sisenevat saasteaine hulka. Kui korterites esineb kontrollimatu õhuvahetus, siis võib saasteaine ajapikku koguneda põhjustades ebasoodsaid olukordi.

Joonis 5.4. Õhusaaste levik suvel merepoolse tuule suunaga külgvaates



### 5.1.3. Õhusaaste levik tuuleta temperatuuri stratifikatsiooni korral

Temperatuuri järgi õhu kihistumise simulatsiooni korral on maalähedane temperatuur 10 kraadi, püstikust väljuva saasteaine temperatuur 15 kraadi ning 20 meetri kõrgusel on temperatuur 20 kraadi. Tuulevaikse temperatuuri stratifikatsiooni olukorras jaotub õhusaaste ühtlaselt ning külgvaade on esitatud joonisel 5.5. Õhusaaste levib kuni soojema temperatuuri kihini. Tulenevalt temperatuuride erinevusest, ei tõuse saasteaine kõrgemale kui 20 meetrit ning jääb hajuma sellel kõrgusel. Antud olukorra simuleerimise peamiseks eesmärgiks oli näitlikustada saasteaine levikut, mis ei mõjuta jalakäijaid, vaid ainult hooneid ja kõrgetel korrustel elavaid inimesi.

Joonis 5.5. Õhusaaste levik temperatuuri stratifikatsiooni korral



## 5.2. Simulatsiooni tulemuste asjakohasus ja täpsuse suurendamine

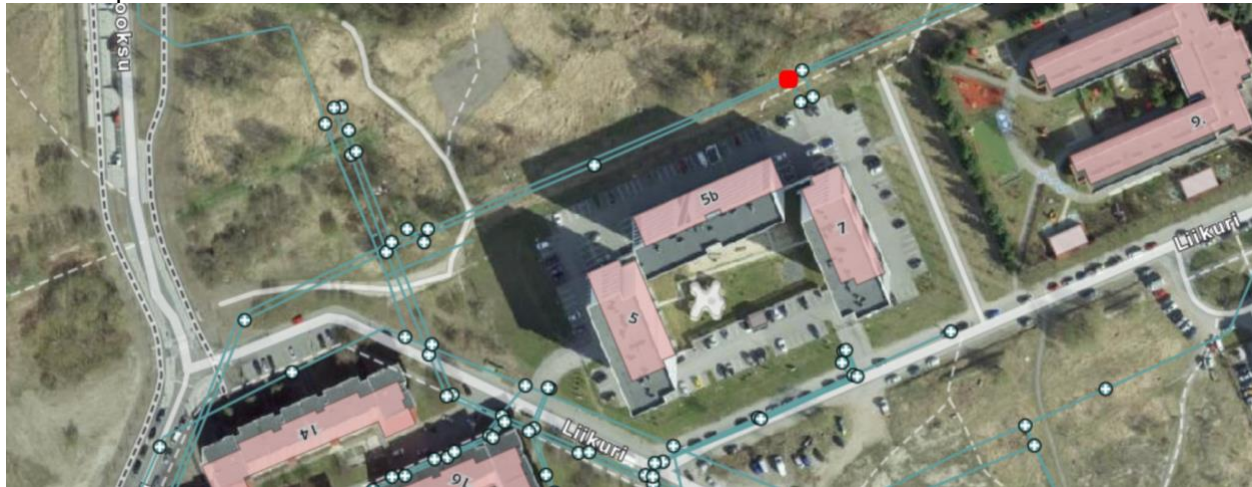
Merimetsa õhusaaste leviku simulatsioonide tulemusest nähtub, et pidevalt muutuvad ilmastikutingimused ja ümbritsev geomeetria avaldab mõju saasteaine levikule. Sellest tulenevalt annab linna digikaksikule õhuruumi lisamine lisandväärtuseks võimlause teoreetiliste valemite kõrvalt õhusaastet täpsemalt ning kasutada neid andmeid projekteerimise kui ka linnakujundamises.

Kanaliseerimisprojektide kontekstis saab püstikutest väljuvat saasteõhu reostuse modelleerimist võtta sisendina uute kanalisatsioonipüstikute projekteerimise planeerimisele. Mudel annab täpsema ülevaate ja ettekujutuse nii keskkonna kui ka inimmõjude osas ning võimaldab erinevate ilmastikutingimuste korral leida algselt kasvõi visuaalselt sobilikuma asukoha uuele kanalisatsioonipüstikule. Lisaks sellele on võimalik täpsemalt hinnata ka erinevate kanalisatsiooni ventilatsioonivõimalusi ning illustreerida tulemusi reostuse levimise näitel.

Õhuruum ja saaste simuleerimine saab samuti anda sisendi juba olemasolevate, projekteeritud kanalisatsioonipüstikute ümbruse parendamiseks. Täiendavate geomeetriliste vormide lisamine ümbrusesse saab tänu mudelile muutuda visuaalselt arusaadavamaks. Linnaplaneerijatel on võimalik mudelis simuleerida olukord lähtuvalt erinevatest stsenaariumitest ning leida kõige optimaalsem lahendus kanalisatsioonipüstiku tuulutamise ja saasteõhu levimise seisukohalt. See puudutab nii avalikku ruumi, kui ka hooneid, mis paiknevad juba olemasolevate kanalisatsioonipüstikute juures.

Lisaks sellele esineb linnaruumis varasemalt lagedale maale rajatud kanalisatsioonipüstakuid, mis juurde ehitatava linnataristuga inimestele lähemale muutuvad. Üks näidetest on hiljuti valminud Tondiraba-Kadrioru vaheline kergliiklustee, mis on rajatud Liikuri tänava piirkonnas varasemalt olemasoleva tuulutuspüstiku vastastikusse lähedusse (joonis 5.6). Tulemusena on kergliiklustee lõigu ühe osa sattumine püstikust väljuvate lõhnaosakeste trajektorile. Varasemalt asus see püstak rohelusega kinnikasvanud alal, millele linnaelanikel puudus otsene ligipääs. Nüüd mõjutab see otseselt perioodiliselt kergliiklusteed kasutavaid inimesi. Magistritöös käsitletav simulatsioonide koostamise protsessis linnas 3D mudeli alusel võimaldaksid selliseid olukordi suurema tõenäosusega arvesse võtta. See tähendab, et ka ainuüksi kanalisatsioonipüstakute näitel saab õhuruumi lisamine digikaksikule olla kasuks hoonete ja rajatiste projekteerimisel.

Joonis 5.6. Tondiraba-Kadrioru vaheline kergliiklustee Liikuri 5b kanalisatsiooni tuulutuspüstak



Laiendades digikaksiku rakendatavust, leidub ka teisi õhuruumi lisamise vajalikkust kinnitavaid võimalikke kasutusjuhtumeid. Lisaks kanalisatsioonipüstikutele on linnas teisi saasteained, mis levivad erinevates suundades olenevalt ilmastikutingimustest ja muudest faktoritest, nagu teeliiklus. Õhusaaste leviku simulatsioonid võimaldavad neid olukordi võrrelda ning anda sisendi majade ventilatsiooni projekteerimise osas. Hetkel kehtivad selles valdkonnas hoonete ehitamisele ja projekteerimisele standardid ning õhusaaste simuleerimine saaks anda veelgi täpsema sisendi saaste leviku kohta olemasolevas piirkonnas. Seejärel oleks võimalik projekteerida hoone ventilatsiooni õhuvõtuavad lähtuvalt vähimast kokkupuutest saasteallikatega.

Käesolevas magistritöös koostatud vedelikudünaamika simulatsioonidel on samuti võrdlemisi oluline eelis tavapärase uuringutega, mis visualiseerimisel annavad ainult 2D pealtvaates õhureostuse leviku ülevaate. Simulatsioonid lisavad sellele aga kolmanda dimensiooni, milleks on külgvaade. Selliselt saab hinnata õhusaaste levikut lähtuvalt kõrgusest. Seda on ennekõike märgata temperatuuriga õhukihistumise korral, kus külgvaade annab täiendava informatsiooni.

Käesoleva magistritöö raames läbiviidud simulatsioonid olid teostatud teatud lihtsustustega. Sealhulgas ei kasutatud erinevate väikevormide ja taimede geomeetria, mida 3D kaksikus geomeetriafailidena ei olnud, ning piirduti ainult hoonete LoD2 mudelitega. Simuleeritav linnaruum ei võtnud arvesse ka erinevate objektide pindade iseloomu, mis varieeruvad ning on erinev näiteks asfalttänaval ja murukattel. Samuti ei olnud arvestatud hoonete enda soojuseraldusega, mis varieeruvad vastavalt energiamärgisele ning mõjutavad teatud määral õhuliikumist [71]. Kuigi see info on uute hoonete ehitusmudelites (BIM-s) juba olemas, on

selle tõlgendamine ja teisendamine õhuliikumise simuleerimise tarkvarasse raskendatud ja aeganõudev. Siinkohal on näha andmete terviklikkuse tähtsust.

Vaatamata sellele, et käesolevas töös rakendati kohanduvat võrku OpenFOAM utiliga, siis oli ikkagi õhuruumi võrgusuurus limiteeritud ning elemendid võrdlemisi suured. Võrgusuuruse lihtsustus oli tehtud tulenevalt piiratud arvutusvõimsusest. Geomeetrilisi andmeid ei rakendatud täies mahus, sest nendest puudusid ehisregistri 3D kaksikus reaalelu koopiad ning nende olemasolul oleks olnud kogu simulatsiooni arvutamiseks vajalik ressurss väga mahukas. Autor soovib samuti tuua välja, et simuleeritavad linna õhutingimused olid kasutatavate piiritingimuste tõttu lihtsustatud.

Magistritöö tehti Tallinna Tehnikaülikooli kobararvutiga ning eesmärgiks oli ennekõike näitlikustada digikaksiku andmetele õhuruumi lisamise potentsiaal ja võimalikku kasu erinevatele osapooltele. Tehtud lihtsustused ei piiranud magistritöö eesmärgi saavutamist ning vaatamata nende olemusele tagasid vajaliku täpsusastme, mille aluselt on võimalik saada sisend planeerimiseks. Tulevikuvaatepunktist on aga oluline tuua välja erinevaid võimalusi keerukamate ja täpsemate simulatsioonide teostamiseks. Seda ennekõike seetõttu, et digikaksiku vaatepunktist on oluline kasutada pärisandmeid ning luua füüsilise maailma digitaalne jäljend.

Võimalikuks lahenduseks on võimsama kobararvuti kasutamine, näiteks LUMI. LUMI on Soomes asuv magistritöö kirjutamise ajal Euroopa võimsam superarvuti ning sellele on olemas ka ligipääs Tallinna Tehnikaülikooli teaduspersonalil. Superarvuti võimsus on 375 petaflops, mis on ligikaudu võrdne 1,5 miljoni kaasaegse sülearvuti võimsusega [69]. Lisaks sellele on võimalik uurida erinevate masinõppe mudelite rakendamist, mida treenitakse suurel hulgal andmestikul ning selle tulemusena ei pea sarnaste algtingimuste ja geomeetriaga simulatsioonide uuesti tegema, vaid masinõppe suudab ressursitõhusamalt ennustada lõppväljundit. Masinõppest ja selle rakendamisest kaasnevatest piirangutest on autor arutanud peatükis 3.2.

### **5.3. Järeldused**

Õhusaaste arvutamise enamlevinumad teoreetilised mudelid AERMOD ja ISC võimaldavad analüüsida õhusaaste levikut üldisel kujul, lähtuvalt Gaussi jaotusest. Võrreldes pärisolukorraga, kasutavad mudelid mitmeid eelduseid ja lihtsustusi.

Õhusaaste simulatsiooni koostamiseks on vajalik importida 3D kaksikust hoonete geomeetrilised andmed, mida saab teisendada näiteks STL formaati. Hoonete geomeetriliste

andmete ümber ehitatakse võrk ehk õhuruum, mis võimaldabki lihtsamalt simuleerida õhureostuse levikut linnaruumis.

Õhuruumi lisamine digikaksikule võimaldab:

- Koostada õhusaaste simulatsioone ja analüüsida õhusaaste levikut vastavalt erinevatele ilmastikutingimustele;
- Analüüsida õhusaaste levikut ja selle muutust tulenevalt ehitistest ja arhitektuursetest vormidest;
- Võrreldes traditsiooniliste õhusaaste leviku uuringutega täiendada tulemusi õhusaaste leviku kõrvaltvaatega;
- Anda teadlikumat sisendit projekteerijatele uute kanalisatsioonipüstakute kavandamisele linnaruumis ja hoonete ventilatsiooni planeerimisele;
- Anda sisendit vastavatele ametnikele, ka linnaarhitektile, õhureostuse levikust ja mõjust linnakeskkonnas.

Õhuruumi lisamisel digikaksikule esinevad järgmised väljakutsed:

- Simulatsioonide nõutav arvutiressurss, millest tingitult koostatakse mudellahendusi lihtsustustega;
- Masinõppe rakendamisel kvaliteetsete ja asjakohaste treeningandmete olemasolu.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli uurida õhuruumi lisamise vajalikkust digikaksikule, mis võimaldab linna lokaalset õhuliikumise simuleerimist ja vastavalt sellele paremate linnaruumi planeerimise otsuste tegemist lähtuvalt linnaelanike tervisest ja heaolust. Lisaks sellele tekkis vajadus uurida võimalusi vähendada õhuruumi õhusaaste leviku arvutamise mahulisust ja ajakulu, et võimaldada õhuruumi lisamine digikaksikule ja simulatsioonide käepärane kasutatavus. Koostatud magistritööd võib kasutada ka kui võimaliku juhendmaterjali välisõhus levivate mittereageerivate gaaside leviku simulatsioonide koostamiseks linnaruumis ning kirjeldatud protsesside analüüsis, mida saab rakendada teistes 2D või 3D mudelites.

Eestis õhusaaste seadusandluses, mis jälgib Euroopa Liidu direktiive, on esitatud peamised nõuded, mida tuleb rakendada õhusaaste kontrollimisel ja aruandluses. Seadusandluses on sätestatud vajalikud piirmäärade ja sihtväärtused erinevatele saasteainetele. Vesiniksulfiidi kogust reguleerib üldiselt Keskkonnaministri määrus nr 75 ning töökeskkonna osas spetsiifiliselt Eesti Vabariigi Valitsuse määrus nr 293. Lisaks sellele toob üldine seadusandlus välja ka õhusaaste mõõtmise intervallid ja reguleerib muuhulgas simulatsioonide kasutamist õhusaaste hindamisel. Täiendavalt direktiividele on Euroopa Liit algatanud programmid ja liikumised nagu Clean Air ja Uue Euroopa Bauhaus, mis keskenduvad puhta õhu tagamisele linnaruumis ja jätkusuutlikke linnaosade kavandamisele.

Üks linnaruumi õhusaaste modelleerimisel võrdlemisi vähekasitletud valdkondasid on kanalisatsiooni tuulutuspüstakutest väljuv saasteõhk ja sellest tulenevad haisuhäiringud. Peamine tuulutuspüstakutest väljuv aine on vesiniksulfiid, mis vähesel esinemismääral on inimesele tuntud mädamunalõhna järgi ja seetõttu põhjustab haisuhäiringut, ning kõrgetel kontsentratsioonidel võib inimesele tekitada tugevaid närvisüsteemi kahjustusi. Tuulutuspüstakud on samuti vajalikud kanalisatsiooni rõhuerinevuste tasakaalustamiseks, välisõhu lisamiseks maa-aluses voolusüsteemis ja konstruktsioonide eluea pikendamiseks. Tuulutuspüstakutest väljuvat saasteõhu koguseid mõjutavad oluliselt õhu ja vee vahepinna hõõre, õhurõhk, niiskus ja temperatuur ning püstaku tuulutussotsiku kõrgus maapinnast. Käesolevast tööst selgus, et tuulutuspüstakud võivad mõjutada nii inimesi kui ka hooneid.

Õhusaaste arvutamise üks enamlevinumaid teoreetilised mudeleid on AERMOD ja ISC, mis on Gaussi jaotusega saastejoa mudelid. Nende mudelite aluseks on püsiseisundiga määratud joamudel, mis eeldab, et keskmise voolusuuna suhtes kontsentratsiooni jaotuse normaalid jälgivad Gaussi jaotust. Saasteallika mõjuala arvutamiseks on vajalik teada saasteallika



tugevust ja temperatuuri, püstaku suuruseid, keskmist tuule kiirust, ümbritseva õhu temperatuuri ja atmosfääri stabiilsusklassi. Andmete olemasolul on võimalik arvutada teoreetiline saasteallika mõjuala erinevatel kontsentratsioonidel. See mudel on aga üldine ning on seotud mitme mittevajaliku lihtsustusega. Oluliselt täpsema tulemuse saavutamiseks, mille aluselt oleks võimalik võtta vastu ka planeerimise otsuseid, on vajalik rakendada numbrilisi simulatsioone ja linna digiandmeid, millest peamine on digikaksiku osa, 3D kaksik.

Linnaruumi digikaksik on füüsilise maailma virtuaalne jäljend, mis eeldab reaalses infoedastust ning seeläbi pärislinna koopia loomist. Linna digikaksik hõlmab endas andmete haldust, asukohapõhist hindamist, erinevate osapoolte integreerimist ja koostööd, planeerimist ja ennustamist ning visualiseerimist. Ehituses laialt kasutatava BIM-i ees seisneb digikaksiku eelis selles, et toimub reaalses suhtlemine füüsilise reaalsuse ja virtuaalse mudeli vahel. Eesti on intensiivselt panustanud E-ehituse platvormi ja 3D kaksiku väljatöötamisele ning hetkel arenduses olevad projektid Tallinna raames on linna taimekihi mudeli koostamine ja 3D kaksiku arendamine digikaksiku suunas teedehituse valdkonnas.

Õhusaaste leviku modelleerimisel linnaruumis lähtutakse olemasoleva linna 3D hoonete informatsioonist. Magistritöö koostamisel laeti veebipõhiselt alla informatsioon ehitisregistri 3D kaksikust ning teisendati selles esinev geomeetria STL formaati. See oli vajalik, et tekitada numbriliselt hoonete ja rajatiste ümber õhuruum, mis oligi vajalik õhusaaste leviku simuleerimiseks. Õhuruumi lahendus koostati tarkvara OpenFOAM utiliiga *snappyHexMesh*.

Erinevate stsenaariumite simuleerimiseks kasutati OpenFOAM-i rakendust *buoyantPimpleFoam*, mida oli juba varasemalt täiendatud kolme saasteallika simuleerimise võimekusega. Tarkvara OpenFOAM on ettenähtud 3D numbriliste arvutuste läbiviimiseks. CFD simulatsioonid põhinevad üldiselt massi, voolamise liikumishulga ja energia jäävuse seadustel. Õhusaastet käsitleti töös kui keemiliselt mittereageeriva aina õhuväljas ning selleks kasutati ära ka adveksioon-difusiooni võrrandit. Turbulentsi väljade modelleerimiseks rakendati RANS turbulentsi mudelit. Tarkvara OpenFOAM rakenduse algfaailides olid olemas vastavalt magistritöös koostatud stsenaariumitele siestatud muudatused ja täiendused kiiruse, temperatuuri ja teistes tingimustes, mis olid vajalikud vastavate piiritingimuste saavutamiseks.

Magistritöö simulatsioonid koostati Tallinna Tehnikaülikooli HPC kobararvutil, mis võrdlemisi suure arvutusnõudluse juures võimaldas erineva hulga masinate arvutusprotsesse kasutada. Koostatud CFD simulatsiooniga näitlikustati, et õhuruumi lisamine digikaksikule võimaldab selgitada uudselt õhusaaste leviku keerulist dünaamikat linnakeskkonnas esinevate

ilmastikutingimuste korral. Sarnaselt koostatud stsenaariumite alusel võib tulevikus anda sisendit uute ehitiste ja rajatiste projekteerimisele, olemasolevate ehitiste ja rajatiste kasutusvõimaluste parendamisele, ning üldisemalt saaste mõju selgitamisele inimestele ja hoonetele.

Magistritöös olid 3D ruumväljade CFD simulatsioonid esitatud arvutusdomeenis, mille koostamist piirasid peamiselt andmete puudumine ehisregistri 3D kaksikus ja suhteliselt suur arvutusmaht. Seetõttu piirduski arvutusdomeen kanalisatsiooni tuulutuspüstaku lähiümbrusega, kus oli võimalik arvestada täpsemalt geomeetriliste andmetega. Tulevikus oleks vajalik laiendada digikaksiku õhuruumi mõõdet linnaosa mõõtmetele. Linnakeskkonna suured mõõtmed on ka tänapäeval numbriliste simulatsioonide jaoks suureks väljakutseks ning selle ületamiseks võib tulevikus teostada arvutusi veel võimsamas klastris, nagu seda on näiteks Soomes asuv arvutusklaster LUMI. Tänapäeval on mitmed linnakeskkonna protsesside analüüsid juba keskendunud masinõppe ärakasutamisele, et paremini võtta kasutusele CFD simulatsioone. Kvaliteetsetel ja asjakohastel treeningandmetel väljaõpetatud masinõppe võimaldab ennustada ette õhusaaste liikumist linnaruumis ilma selle täiemahulise numbrilise arvutusega.

## SUMMARY

The purpose of this master's thesis was to investigate the necessity and plausibility of adding an air domain to the digital twin, which enables the simulation of urban air movement to make better urban space planning decisions based on the health and well-being of the city dwellers. As well as this, to explore the possibilities of reducing the computational resources needed the simulations. The master's thesis acts as a possible instructional material for carrying out air simulations in the urban environment. The described processes can be applied to 3D models of other cities.

Current master thesis focused on modelling hydrogen sulphide that is coming out of the city sewer ducts and causing smellscape alongside with other disturbances. Air pollution legislation in Estonia is based on the European Union directives. Hydrogen sulphide is regulated by a Regulation No. 75 of the Minister of the Environment. In addition to the general directives, the European Union has also initiated multiple programs and movements such as Clean Air and the New European Bauhaus, which focus on ensuring clean air in urban spaces and promoting sustainable neighbourhoods.

One of the most common theoretical models for calculating air pollution is AERMOD and ISC, which are Gaussian distribution plume models. However, to achieve more accurate results that can be used as a basis for making planning decisions, numerical simulation and city data, primarily the 3D model of the digital twin has to be used. As part of the master's thesis, the 3D information was downloaded from the 3D twin of the Estonian building register. Software OpenFOAM was used next to created an air domain around the geometry data as well as perform the simulation of air pollution dispersion. The simulations were performed on the HPC cluster of Tallinn University of Technology.

Conducted simulation demonstrated that the addition of an air domain to the digital twin enables to effectively simulate air pollution dispersion under various initial conditions, such as changing weather patterns. The simulation results can be used further as an input to the building engineers and city architects to make improvement of the existing city clusters, buildings, and facilities. As well as this, the pollution dispersion results allow to demonstrate the impact of pollution on people and the buildings.

The simulations performed as part of the master's thesis were made with several simplifications, mainly due to the lack of data in the 3D twin of the Estonian building register, and the amount of computational resources that would have been with more detailed data.

The latter part is a substantial challenge in fluid dynamics simulations, and to alleviate it, calculations can be performed on an even more powerful cluster in the future, such as the LUMI cluster in Finland. In addition, several existing studies have focused on exploiting machine learning in CFD. Machine learning trained on high-quality and relevant training data makes it possible to predict the movement of air pollution in an urban environment without the need for a full-scale calculation.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Euroopa Kontrollikoda. „Õhusaaste: meie tervis ei ole veel piisavalt kaitstud“ [WWW] <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/et/> (11.10.2023).
2. European Commission. (2020). Urbanisation in Europe. [WWW] [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/continuing-urbanisation/urbanisation-europe\\_en#:~:text=Europe%27s%20level%20of%20urbanisation%20is,to%20a%20approximately%2083.7%25%20in%202050](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/continuing-urbanisation/urbanisation-europe_en#:~:text=Europe%27s%20level%20of%20urbanisation%20is,to%20a%20approximately%2083.7%25%20in%202050) (14.10.2023).
3. Ehitatud keskkonna stratifitseeritud vooluprotsesside insenertööriistad 01.01.2022–31.12.2026. Rahastamine: 375 650 EUR. Vastutav täitja: Laanearu, Janek Number: PRG1487. Rahastaja: Sihtasutus Eesti Teadusagentuur. Asutus: Tallinna Tehnikaülikool, Inseneriteaduskond, Ehituse ja arhitektuuri instituut
4. Infragate. Tallinna Linna Ühisveevärgi ja -Kanaliseerimise Arendamise Kava aastateks 2023-2034. [WWW] [https://live.s3.teliahybridcloud.com/s3fs-public/inline-files/Tallinna%20linna%20%C3%9CVVKA%202023-2034%20seletuskiri%2020230419\\_ex\\_chapter11\\_12.pdf](https://live.s3.teliahybridcloud.com/s3fs-public/inline-files/Tallinna%20linna%20%C3%9CVVKA%202023-2034%20seletuskiri%2020230419_ex_chapter11_12.pdf) (11.11.2023).
5. Eesti Riigikogu. (2023). Atmosfääriõhu kaitse seadus. (RT I, 22.09.2023, 1). [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/122092023001?leiaKehtiv> (11.10.2023).
6. Kliimaministeerium. (2019). Lubatud heitkoguste projekt (LHK). (11.10.2023).
7. Keskkonnaministeerium. (2019). Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, teavitamis- ja häiretasemed ning kriitilised tasemed. Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, teavitamis- ja häiretasemed ning kriitilised tasemed. [WWW] [https://www.riigiteataja.ee/akt/1060/3201/9012/KKM\\_m8\\_lisa1.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akt/1060/3201/9012/KKM_m8_lisa1.pdf#) (07.09.2023).
8. Vabariigi Valitsuse 18. septembri 2001. a määruse nr 293 „Töökeskonna keemiliste ohutegurite piirnormid“ muutmine. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/12872786> (07.09.2023).
9. Keskkonnaministeerium. (2017). Välisõhu mitteesmatähtsate saasteainete piirnormide uue kontseptsiooni välja töötamine. [WWW]
10. Krikova, E. (2017). Vesiniksulfiidi vähendamise tegevuskava heakskiitmine. [WWW].
11. European Parliament & Council of the European Union. (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016

- on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC (Text with EEA relevance ). Euroopa Liidu Teataja, L344, 17.12.2016, 1–31. [WWW] ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/2284/oj> (11.10.2023).
12. European Parliament & Council of the European Union. (2004). Directive 2004/107/EC relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel, and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Union, L23, 26.1.2005, 3–16. [WWW] ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj> (11.10.2023).
  13. European Parliament & Council of the European Union. (2008). Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union, L152, 11.6.2008, 1–44. [WWW] ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj> (21.10.2023).
  14. Euroopa Liit. EU air quality standards. [WWW] [https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en) (20.10.2023).
  15. Vinceti, S. R. (2023). Reshaping EU Legislation for Air Pollution Control: Main Features of the Proposed Directive in Comparison with the US Legislation. *Ann Ig*, 35(4), 454-458. [WWW] <https://doi.org/10.7416/ai.2023.2557> (11.10.2023).
  16. Eurobitume. (2021). POTENTIAL RISKS OF HYDROGEN SULPHIDE THROUGH THE BITUMEN MANUFACTURE AND DELIVERY PROCESS. [WWW] <https://eurobitume.jamesreedpr.co.uk/wp-content/uploads/2021/05/EB-Potential-Risk-H2S-in-Bitumen-Production-and-Delivery-Process-Version-2-English.pdf> (07.09.2023).
  17. Taylor, M., Duncan, P. (2023). Revealed: almost everyone in Europe is breathing toxic air. [WWW] <https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/20/revealed-almost-everyone-in-europe-breathing-toxic-air> (20.10.2023).
  18. European Council. The clean air package: Improving Europe's air quality. [WWW] <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/clean-air/#:~:text=the%20clean%20air%20programme%20for,for%20the%20six%20main%20pollutants> (11.10.2023).
  19. European Commission. (2023). New European Bauhaus. [WWW] [https://new-european-bauhaus.europa.eu/index\\_en](https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en) (20.10.2023).

20. EU Science Hub. (2023). New European Bauhaus: Horizon Europe EU Mission in the pipeline. [WWW] [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/new-european-bauhaus-horizon-europe-eu-mission-pipeline-2023-07-19\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/new-european-bauhaus-horizon-europe-eu-mission-pipeline-2023-07-19_en) (11.10.2023).
21. Tallinn. (2023). Välisõhu kaitse uuringud. [WWW] <https://www.tallinn.ee/et/keskkond/valisohu-kaitse#uuringud> (18.10.2023).
22. EKUK. Eesti välisõhu kvaliteet). [WWW] <https://airviro.klab.ee/> (15.10.2023).
23. Kliimaministeerium. Välisõhu kvaliteet. [WWW] <https://kliimaministeerium.ee/energeetika-maavarad/valisohk/valisohu-kvaliteet-ja-seire#tallinna-linnaohu-se> (15.10.2023).
24. Tallinna Sadam. Alates 1998. aastast on teostatud Muuga sadamas pidevat atmosfääriõhu kvaliteedi seiret, mida teostab OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus. [WWW] <https://www.ts.ee/ohuseire/> (12.10.2023).
25. Keskkonnaamet. (2023). Keskkonnaamet jälgib Põhja-Tallinnas õhukvaliteeti. [WWW] <https://keskkonnaamet.ee/uudised/keskkonnaamet-jalgib-pohja-tallinnas-ohukvaliteeti> (12.10.2023).
26. Laast, J. KAART | Vaata, kui puhas on õhk sinu kodutänaval. [WWW] <https://roheportaal.delfi.ee/artikkel/120229996/kaart-vaata-kui-puhas-on-ohk-sinu-kodutanaval> (11.10.2023).
27. Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanovic, N., Meijers, E. (2007). Smart cities: Ranking of European medium-sized cities. Centre of Regional Science, Vienna University of Technology. [http://www.smartcities.eu/download/smart\\_cities\\_final\\_report.pdf](http://www.smartcities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf)
28. Gavin. (2022). Smart cities, smarter management. Smart City Hub. [WWW] <https://smartcityhub.com/governance-economy/smart-cities-smarter-management/> (11.10.2023).
29. Kumar, H., Singh, M.K., Gupta, M.P., Madaan, J. (2020). Moving towards smart cities: Solutions that lead to the Smart City Transformation Framework. Technol. Forecast. Soc. Chang. 153, 119281. [WWW] DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.024>
30. Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. Sustainability, 13(6), 3386. [WWW] DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063386>

31. Ma, Z., Ren, Y. (2017). Integrated Application of BIM and GIS: An Overview. *Procedia Eng.* 196, 1072–1079. [WWW] DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.064>
32. Wang, H., Pan, Y., Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Autom. Constr.* 103, 41–52. [WWW] DOI:10.1016/j.autcon.2019.03.005
33. Arsiwala, A., Elghaish, F., Zoher, M. (2023). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. *Energy and Buildings*, 284, 112851. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>
34. Topping, D., Bannan, T.J., Coe, H., Evans, J., Jay, C., Murabito, E., Robinson, N. (2021). Digital Twins of Urban Air Quality: Opportunities and Challenges. *Front. Sustain. Cities*. [WWW] DOI: 10.3389/frsc.2021.786563
35. E-ehitus. (2021). E-ehituse 3D kaksiku arendus. [WWW] <https://eehitus.ee/timeline-post/e-ehituse-3d-kaksiku-arendus/> (11.10.2023).
36. Jarne, A., Luup, Ü. (2023). Digikaksik aitab nii tänavaaукude leidmisel, prügikastide täitmisel kui ka majaehitusel. [WWW] <https://pealinn.ee/2023/09/13/digikaksik-aitab-nii-tanavaaукude-leidmisel-prugikastide-taitmisel-kui-ka-majaehitusel/> (05.10.2023).
37. FinEst Centre. Digitaalne rohemudel (GreenTwins). [WWW] <https://finestcentre.eu/et/pilootprojektid/digitaalne-rohemudel/> (26.10.2023).
38. Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P. O., Petrova-Antonova, D. (2022). Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. *Atmosphere*, 13(10), 1640. [WWW] <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>
39. Simscale. What Are the Navier-Stokes Equations? [WWW] <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-the-navier-stokes-equations/> (21.10.2023).
40. Simscale. K-Epsilon Turbulence Models [WWW] <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-epsilon/> (02.11.2023).
41. Di Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B., Britter, R. (2007). Simulations of pollutant dispersion within idealized urban-type geometries with CFD and integral models. *Atmospheric Environment*, 41(37), 8316-8329. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.052>



42. Calzolari, G., Liu, W. (2021). Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*, 206, 108315. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108315>
43. Panchigar, D., Kar, K., Shukla, S., Mathew, R. M., Chadha, U., Selvaraj, S. K. (2022). Machine learning-based CFD simulations: a review, models, open threats, and future tactics. *Neural Computing and Applications*, 34, 21677–21700. [WWW] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-022-07838-6> (20.09.2023).
44. Zaghoul, M. (2017). Machine-Learning aided Architectural Design: Synthesize Fast CFD by Machine-Learning (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
45. Tallinn. Reoveekäitlus. [WWW] <https://www.tallinn.ee/et/media/294312> (07.09.2023).
46. Tallinna kaart. [WWW] <https://www.tallinnakaart.com/pohja-tallinn-kaart/> (05.09.2023).
47. Lowe, S. (2016). Sewer Ventilation: Factors Affecting Airflow and Modeling Approaches. Manhattan College. [WWW] DOI: <https://doi.org/10.14796/JWMM.C395>
48. Madsen, H. I., T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen. 2006. Gas Phase Transport in Gravity Sewers: A Methodology for Determination of Horizontal Gas Transport and Ventilation. *Water Environment Research* 78 (11): 2203–9. [WWW] DOI:10.2175/106143005X82253
49. Godoi, A. F. L., Grasel, A. M., Polezer, G., Brown, A., Potgieter-Vermaak, S., Scremim, D. C., Yamamoto, C. I., & Godoi, R. H. M. (2018). Human exposure to hydrogen sulphide concentrations near wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 610-611, 583-590. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.209>
50. Boguski, T. K. (2006). Understanding Units of Measurement. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens* (Issue 2). Center for Hazardous Substance Research, Kansas State University. [WWW] [www.engg.ksu.edu/CHSR/](http://www.engg.ksu.edu/CHSR/)
51. OECD. (2009). GUIDANCE DOCUMENT ON INHALATION TOXICITY STUDIES. Series on Testing and Assessment No. 39. [WWW] [https://one.oecd.org/document/env/jm/mono\(2009\)28/rev1/en/pdf](https://one.oecd.org/document/env/jm/mono(2009)28/rev1/en/pdf) (27.10.2023).
52. Nevada Division of Environmental Protection, Chemical Accident Prevention Program (NDEP-CAPP). (2007). SUBSTANCE DATA SHEET – CONVERSIONS.

- [WWW] [https://ndep.nv.gov/uploads/air-capp-docs/Conversion\\_Factors\\_071102.pdf](https://ndep.nv.gov/uploads/air-capp-docs/Conversion_Factors_071102.pdf) (26.10.2023).
53. Abdollahi, M., Hosseini, A. (2014). Hydrogen Sulfide. In Encyclopedia of Toxicology (Third Edition) (pp. 971-974). [WWW] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00513-3>
  54. Huang, Y., Wu, C., Chen, Y., Chou, I-M., Jiang, L. (2022). Measurement of diffusion coefficients of hydrogen sulfide in water and brine using in-situ Raman spectroscopy. *Fluid Phase Equilibria*, 556, 113381. [WWW] DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113381>
  55. Keskkonnaagentuur. Ajaloolised ilmaandmed. [WWW] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/> (24.10.2023).
  56. Olafsdottir, S., Gardarsson, S.M. (2013). Impacts of meteorological factors on hydrogen sulfide concentration downwind of geothermal power plants. *Atmospheric Environment*, 77, 185-192. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.077>
  57. Venkatram, A., Thé, J. (2003). Introduction to Gaussian Plume Models. Chapter 7A of AIR QUALITY MODELING - Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software. Vol. I - Fundamentals (P. Zannetti, Editor). The EnviroComp Institute and the Air & Waste Management Association. [WWW] <https://apsi.tech/material/modeling/IntroductiontoGaussianPlumeModels.pdf> (22.10.2023).
  58. Wu, M., Zhang, G., Wang, L., Liu, X., & Wu, Z. (2022). Influencing Factors on Airflow and Pollutant Dispersion around Buildings under the Combined Effect of Wind and Buoyancy—A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12895. [WWW] <https://doi.org/10.3390/ijerph191912895>
  59. NOAA. Pasquill Stability Classes. [WWW] <https://www.ready.noaa.gov/READYpgclass.php> (22.09.2023).
  60. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1995). USER'S GUIDE FOR THE INDUSTRIAL SOURCE COMPLEX (ISC3) DISPERSION MODELS. [WWW] <https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/other/isc3/isc3v2.pdf> (11.10.2023).
  61. Ward, M., Corsi, R., Morton, R., Knapp, T., Apgar, D., Quigley, C., Easter, C., Witherspoon, J., Pramanik, A., Parker, W. (2011). Characterization of natural

- ventilation in wastewater collection systems. *Water Environment Research*, 83(3), 265-273. [WWW] <https://doi.org/10.2175/106143010x12780288628859>
62. Lasilabetoon. Kaevurõngad. [WWW] <https://www.lasilabetoon.ee/tooted/kaevurongad> (16.10.2023).
  63. Hakaplast. Vee ja kanalisatsiooni polüetüleen (PE) survetorude paigaldus- ja käsitlusjuhend. [WWW] [https://hakuplast.ee/wp-content/uploads/2020/09/HAKA\\_Plast\\_Vee-ja-kanalisatsiooni-poluuetuleen-survetorude-paigaldus-ja-kasitlusjuhend.pdf](https://hakuplast.ee/wp-content/uploads/2020/09/HAKA_Plast_Vee-ja-kanalisatsiooni-poluuetuleen-survetorude-paigaldus-ja-kasitlusjuhend.pdf) (01.10.2023).
  64. Maa-amet. L-EST97 koordinaatsüsteem. [WWW] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Eesti-geodeetiline-susteem/L-EST97-koordinaatsusteem-p173.html> (25.09.2023)
  65. ISO. ISO 17506:2022. COLLADATM digital asset schema specification for 3D visualization of industrial data. [WWW] <https://www.iso.org/standard/78834.html> (14.10.2023).
  66. Xu, H., Kim, J. I., Zhang, L., & Chen, J. (2023). LOD2 for energy simulation (LOD2ES) for CityGML: A novel level of details model for IFC-based building features extraction and energy simulation. *Journal of Building Engineering*, 78, Article 107715. [WWW] <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107715>
  67. OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility. [WWW] <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility> (07.11.2023).
  68. OpenFOAM. buoyantPimpleFoam. [WWW] <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-buoyantPimpleFoam.html> (09.11.2023)
  69. LUMI. LUMI supercomputer. [WWW] [https://lumi-supercomputer.eu/lumi\\_supercomputer/](https://lumi-supercomputer.eu/lumi_supercomputer/) (02.11.2023).
  70. Laanearu, J., Pachel, K., Jaaku, J., Mikola, A., Kuusik, A., Piirsalu, A. (2023). Reovee kogumise süsteem – riskid ja ohud. *Ehitusest*. [WWW] <https://ehitusest.ee/uudis/2023/09/14/reovee-kogumise-susteem-riskid-ja-ohud/> (12.11.2023).
  71. Majandus- ja taristuminister. (2015). Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika. RT I, 09.06.2015, 21. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/118012019012> (11.11.2023).