

TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Tehnoloogiainstituut

Anna-Helena Saarso

**HOONE LOOMULIKKU ÕIST VENTILATSIOONI
MÕJUTAVAD TEGURID EESTI KLIIMAS MITME TSOONI
ÕHUVAHETUSE MUDELI PÕHJAL**

Bakalaureusetöö füüsikas (12 EAP)

Juhendaja: Tõnu Muring, PhD

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Valdonna ülevaade	8
1.1 Hoonete energiavajadus ventilatsiooniks ja jahutuseks	8
1.2 Loomulik ventilatsioon	9
1.2.1 Üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon.....	9
1.2.2 Tuule mõjul toimiv ventilatsioon	10
1.2.3 Loomulikku ventilatsiooni mõjutavad tegurid.....	12
1.2.4 Loomuliku ventilatsiooni potentsiaal hoone jahutusvajaduse alandamiseks	16
1.3 Ventilatsioonisüsteemide uurimismeetodid	17
2 Materjal ja metoodika.....	19
2.1 Katse püstitus	19
2.2 Simulatsioonitarkvara COMIS 3.2.....	21
2.2.1 Ülevaade arvutusmeetodi põhimõttest ja kasutusest	21
2.2.2 COMIS'es loodud mudel.....	23
2.3 Tuule rõhukoefitsientide mudel CpCalc+	24
2.4 Kliimaandmed.....	27
3 Tulemused ja analüüs.....	32
3.1 Akende avatuse ja paigutuse mõju loomulikule öisele ventilatsioonile	32
3.1.1 Avatud akende kombinatsioon	32
3.1.2 Akende paiknemine üksteise suhtes	34
3.2 Kliimaparameetrite mõju loomulikule öisele ventilatsioonile	39
3.2.1 Temperatuur.....	39

3.2.2 Tuule kiirus.....	41
Kokkuvõte	43
Tänuavaldused	45
The influencing factors of natural night-ventilation in Estonian climate on the basis of a multizone air-flow model	46
Kasutatud kirjandus.....	48
Lisa 1 Pihla 2 hoone välisvaated.....	53
Lisa 2 COMIS'e mudeli sisendparameetrid.....	55
Lisa 3 Tuule rõhukoefitsiendid.....	56
Lisa 4 Kliimaandmed	60
Lisa 5 Simulatsioonide koondtulemused	62

Sissejuhatus

Euroopa Liidus kulub ligi 40% kogu energiatarbest hoonete energiavajadusele [1]. 2020. aastaks peavad kõik Euroopa Liidus uuena ehitatavad hooned olema liginullenergiahooned, mis toodavad peaaegu kogu hooneis kuluva energia ise. Liginullenergiahoonete konstrueerimiseks on oluline vähendada hoonete energiatarvet ning suurendada võimalusi energia tootmiseks hoones või selle vahetus läheduses. Liginullenergiahoone kvalifikatsiooninõuded sisaldavad piiranguid ehitise mitmetele osadele ja parameetritele: välispiire, ruumitemperatuur, ventilatsioon, küttesüsteem, tehnosüsteem. Hoone energiakasutuse tõhususe suurendamisel on oluline pidada silmas ka inimeste tervist, ohutust ja mugavust. [1-2]

Karmistuvate ehitusnõuete ning ambitsioonikate energiasäästu eesmärkide tõttu on ehitusfüüsika hetkel kiiresti arenev teadusvaldkond, kus otsitakse uusi energiatarveta lahendusi hoone iga osa juures. Hoonete energiavajaduse põhilised kategooriad on küte, jahutus, ventilatsioon, vee soojendamine, valgustus ja elektrooniliste seadmete elektritarve [3]. Kasvavate mugavusnõuete ning sagedamini esinevate palavate suvede tõttu on esile kerkinud ventilatsiooni tähtsus hoonete rahuldava sisekliima tagamisel. Ventilatsiooni eesmärk on siseõhu puhastamine ning temperatuuri alandamine. Jahutuseks kuluva energiatarbe vähendamiseks kasutatakse energiatarveta hoonetes loomulikku õist ventilatsiooni: öösel, mil ruumitemperatuur on välistemperatuurist kõrgem, avatakse aknad ja jahutatakse siseruumide õhku ning hoonekonstruktsioone jahedama välisõhuga. Loomulik ventilatsioon on passiivne õhutus- ja jahutustehnika, mille käigus hoone ei tarbi energiat.

Hoone energiatarveta eesmärgi määravad peamiselt projekteerimisfaasis tehtud otsused. Seetõttu on oluline, et teadlaste poolt leitud ja välja arendatud lahendused jõuaksid arhitektide ja ehitusinsenerideni. Praktikas ei viida Eestis hoonete projekteerimisel enamasti läbi loomuliku ventilatsiooni võimalusi hindavaid arvutusi ning akende paigutamisel lähtutakse kas päikese vabaenergia küttepotsiaalist, esteetilisest väärtusest või muudest strateegiatest. Käesoleva töö eesmärgiks on uurida, millised tegurid mõjutavad hoone loomulikku õist ventilatsiooni Eesti kliimas. Lisaks soovitakse tulemuste põhjal anda arhitektidele soovitusi loomuliku õise ventilatsiooni potentsiaali maksimaalseks realiseerimiseks elamu projekteerimisfaasis Eesti kliimas ning anda neile juhiseid võrdlemisi kiire ja efektiivse meetodi kasutamiseks hoone

ventilatsioonipotentsiaali hindamisel. Eesmärgi saavutamiseks uuritakse, kuidas mõjutab ventilatsioonihulka avatud akende paiknemine üksteise suhtes? Milline on välistemperatuuri ja tuule kiiruse mõju loomulikule öisele ventilatsioonile? Kuidas mõjutab ventilatsioonihulka hoone ümbruse hoonestustihedus?

Püstitatud uurimisküsimustele vastamiseks ning töö eesmärgi saavutamiseks luuakse energiatõhusa ehituse printsiipide järgi projekteeritud kahekorruselisest elamuhoonest mitme tsooni õhuvahetuse mudel. Ventilatsioonisimulatsioonide abil analüüsitakse 60 erinevat avatud akende kombinatsiooni kolmes erineva hoonestustihedusega ümbruses standardaasta juuni-, juuli- ja augustikuus perioodil 22:00–7:00.

Töö jaguneb kolmeks peatükiks, millest esimeses antakse ülevaade loomuliku ventilatsiooni füüsilisest taustast, seda mõjutavatest teguritest ning ventilatsioonisüsteemide uurimismeetoditest. Teises peatükis kirjeldatakse katse püstitust ning loodud mitme tsooni mudelit, kasutatud simulatsioonitarkvara ja kliimaandmestikku. Kolmandas peatükis esitatakse simulatsioonitulemused ja nende analüüs ning sõnastatakse järeldused.

Tabel 1. Töös esinevate füüsiliste suuruste tähised, ühikud ning selgitused.

Tähis	Ühik	Kirjeldus
$Q_{\ddot{u}}$	m^3/s	üleslükkejõu mõjul tekkiv õhuvooluhulk läbi ava
Q_t	m^3/s	õhuvooluhulk läbi ava
Q_{in}	m^3/s	õhu sissevoolu hulk ühepoolse ventilatsiooni korral
Q_{out}	m^3/s	õhu väljavoolu hulk ühepoolse ventilatsiooni korral
Q	m^3/s	summaarne õhuvooluhulk läbi ava
Q_s	m^3/s	ühepoolse ventilatsiooni õhuvooluhulk turbulentsiefekte arvesse võtmata
v	m/s	tuule kiirus
\bar{v}	m/s	keskmise tuule kiirus
v_z	m/s	tuule kiirus kõrgusel z
v_g	m/s	tuule kiirus piirkihist väljaspool
g	m/s^2	raskuskiirendus
A	m^2	õhu sisselaskeava ristlõike pindala
S_{ef}	m^2	voolutee efektiivne ristlõike pindala
Δh	m	sisse- ja väljalaskeavade keskohtade kõrguste vahe
l	m	ava laius
z	m	kõrgus maapinnast
z_0	m	tasandi, kus sise- ja välisrõhk on võrdsed, kõrgus maapinnast
z_{ref}	m	võrdlustasand: tuule kiiruse ja õhurõhu mõõtmise kõrgus (tavaliselt võetakse selleks hoone kõrgus)
H	m	piirkihi paksus
h	m	ava kõrgus
ρ	kg/m^3	õhutihedus
f_{i-j}	kg/s	vooluhulk rõhusõlmede i ja j vahel
Δp	Pa	sise- ja välisõhu rõhkude vahe
p_o	Pa	rõhk õhuava välisel küljel
p_i	Pa	rõhk hoone sees

p_t	Pa	tuule mõjul õhuava välisküljele tekkiv rõhk
P_x	Pa	õhurõhk vaadeldavas hoonefassaadi punktis
P_0	Pa	õhurõhk võrdlustasandil z_{ref}
P_d	Pa	dünaamiline rõhk
P_i	Pa	õhurõhk rõhusõlmes i
P_j	Pa	õhurõhk rõhusõlmes j
T_i	K	siseõhu temperatuur
T_o	K	välisõhu temperatuur
C_d	—	akent või õhuava iseloomustav voolukoefitsient
C_p	—	tuule rõhukoefitsient
α	—	tuule eksponentprofiili koefitsient, mis iseloomustab maapinnal olevate takistuste tihedust
β	°	avatud akna kaldenurk
ACH	h^{-1}	õhuvahetuse kordsus

Tabel 2. Töös kasutatud erialamõistete inglisekeelsed vasted.

Mõiste	Inglisekeelne vaste
arvutuslikud hüdrodünaamika simulatsioonid	<i>Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations</i>
loomulik öine ventilatsioon	<i>natural night-ventilation</i>
mitme tsooni mudel	<i>multizone air-flow model</i>
ristventilatsioon	<i>cross ventilation</i>
termiline mass	<i>thermal mass</i>
tsooniline mudel	<i>zonal model</i>
tuule mõjul toimiv ventilatsioon	<i>wind-driven ventilation</i>
tuule rõhukoefitsient	<i>wind pressure coefficient</i>
voolukoefitsient	<i>discharge coefficient</i>
ühepoolne ventilatsioon	<i>single-sided ventilation</i>
üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon	<i>buoyancy-driven ventilation</i>

1 Valdkonna ülevaade

1.1 Hoonete energiavajadus ventilatsiooniks ja jahutuseks

Hoonete ventilatsiooni eesmärk on tagada siseõhu puhtus ning mugav sisekliima. Ühiskonnas, kus inimesed veedavad enamiku oma ajast siseruumides, on siseõhu kvaliteedi tagamise küsimus tõusnud aina tähtsamale kohale. Nii mehaanilise ventilatsiooni kasutamine kui ka liigsest ventilatsioonist tekkiv küttevajadus võivad tõsta hoone energiatarvet. Soojuskadude vähendamiseks peavad energiatõhusate hoonete välispiirded olema õhukindlad. Õhukindla konstruktsiooniga majas on ventilatsioonil veelgi olulisem roll siseõhu puhtuse tagamisel, aga ka niiskuse ja hallituse kogunemise vältimisel. Seetõttu kasutatakse energiatõhusates hoonetes enamasti sundventilatsioonisüsteemi, mis töötab soojustagastusega: hoonest lahkuva õhu soojus kantakse üle hoonesse sisenevale jahedamale õhule, et vältida küttevajaduse suurenemist. [4]

Jahutuseks vajamineva energia hulk sõltub kliimavõtmest ning varieerub nii kuude lõikes kui ka ööpäeva jooksul [3]. Kui Lõuna-Euroopas võib hoonete jahutamine toimuda maist oktoobrini ning jahutuse energiavajadus võib olla aasta lõikes suurem kui kütteks kuluv energia, siis Põhja- ja Kirde-Euroopas kestab jahutusperiood enamasti juunist augustini [5].

Hoonete energiatõhususe suurendamiseks töötatakse enamasti kütte ja vee soojendamise süsteemide tõhustamise nimel, kuid kasvavad mugavusnõuded ning üha soojemad suved on päevakorda toonud ka hoonete ventilatsiooniks ja jahutamiseks kuluva energiavajaduse alandamise. Eluhoonete puhul on oluline, et paras õhutemperatuur ning õhuvahetus ruumis oleksid tagatud ööpäevaringselt. Enamasti kasutatakse elamutes ruumide jahutamiseks juba olemasolevaid süsteeme, näiteks soojuspumpasid või passiivset jahutust. [6] Hoonete jahutuse energiavajadust saab alandada hoone jahutusvajaduse vähendamise teel ning passiivseid jahutussüsteeme kasutades või nende energiatarvet vähendades [7].

Hoonete jahutuse energiavajaduse alandamine saab alguse juba hoone projekteerimisel tehtud valikutest. Hoonete küttevajaduse vähendamiseks projekteeritakse ehitiste lõuna- ja põhjapoolsed küljed suurema pindalaga. Lõunapoolsele küljele seatakse suurim osa aknapinda, et kasutada maksimaalselt päikese vabaenergiat. Arvestades fakti, et suvel, kui siseruumides tekib küttevajaduse asemel jahutusvajadus, käib päike kõrgemalt üle horisondi, paigaldatakse

jahutusvajaduse vähendamiseks akende kohale kaldus varjud, mis tõkestavad suvel päikesekiirte jõudmise akendeni. Oluline on ka hoone ehitamiseks kasutatavate materjalide valik. Efektiivne soojustus ja hoone kõrge termiline mass vähendavad toatemperatuuri kõikumise amplituudi. [7]

Jahutussüsteemide energiatarbe vähendamiseks kasutatakse passiivseid jahutussüsteeme, mille käigus hoidmiseks ei kulu energiat. Selliste süsteemide hulka kuuluvad näiteks päikesekorsten, tuuletorn, vee aurustumisel toimiv jahutussüsteem, termilisel massil põhinev jahutussüsteem, maa-alused õhutunnelid ja akende kaudu toimuv õhuvahetus. [8]

1.2 Loomulik ventilatsioon

Loomulik ventilatsioon on ruumide õhutamise viis, mis toimib tuule või temperatuurigradiendi toimel tekkiva sise- ja välisõhu rõhuerinevuse tõttu. Rõhuerinevus sise- ja välisõhu vahel sõltub mitmetest teguritest: tuule suund ja kiirus, temperatuur, õhuniiskus ning õhuvooluteid iseloomustavad parameetrid. Üldmainitud tegurite mõju loomuliku ventilatsiooni efektiivsusele käsitlevad alapeatükid 1.2.1, 1.2.2 ja 1.2.3. [9]

Tänu sellele, et loomuliku ventilatsiooni toimimiseks ei ole vaja mehaanilisi süsteeme, kasutatakse loomulikku ventilatsiooni hoonete energiatõhususe suurendamiseks. Kui mehaanilise ventilatsiooni korral kasutatakse õhu ringluseks selleks spetsiaalseid ehitatud šahte, siis loomuliku ventilatsiooni korral käib õhu ringlus läbi kogu hoone: õhk ringleb läbi akende, ukseavade, koridoride. [10]

1.2.1 Üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon

Loomulikku ventilatsiooni esile kutsuv üleslükkejõud tekib õhutiheduse erinevustest siseruumi piires. Õhutihedus sõltub temperatuurist ja niiskusest: sama õhuniiskuse korral on külmem õhk soojemast tihedam ning samal temperatuuril on kuivem õhk niiskemast tihedam. Eesti kliimas on siseruumides õhk enamasti soojem kui välisõhk. Samuti muutub õhk inimeste ja muude allikate tõttu siseruumides niiskemaks. Eelmainitud põhjustel väljub õhk ruumi ülaosas asuvate õhuavade ja akende kaudu ning jahedam ja kuivem õhk pääseb hoonesse ruumi alumises osas asuvate õhuavade ja akende kaudu. Üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon on seda efektiivsem, mida suurem on sise- ja välisõhu temperatuuride vahe – Eesti kliimas on see nii

sügisest kevadeni ning suveöödel. Enamasti, kui ei käsitleta kuuma ja niiske kliimaga alasid, võib niiskuse erinevusest tingitud üleslükkejõu jätta arvestamata ning üleslükkejõu mõjul toimiva ventilatsioon hulka kirjeldab sel juhul seos [9, 11]

$$Q_{\ddot{u}} = C_d A \sqrt{\left[2g\Delta h \left(\frac{T_i - T_o}{T_i} \right) \right]}. \quad (1)$$

1.2.2 Tuule mõjul toimiv ventilatsioon

Tuule mõjul toimiva ventilatsiooni võib jagada ristventilatsiooniks ja ühepoolseks ventilatsiooniks.

Ristventilatsioon

Ristventilatsiooni korral asuvad aknad või õhuavad, mille kaudu õhk läbi hoone liigub, hoone erinevatel külgedel. Tuul tekitab hoone tuulepealsel küljel ülerõhu ning tuulealusel küljel alarõhu (joonis 1). Rõhkude vahe tõttu hoone erinevatel külgedel, seega ka akendel ja muudel õhuavadel, hakkab õhk läbi hoone liikuma ning tekib loomulik ventilatsioon. [11]

Levinuim valem õhuvoolu leidmiseks läbi õhuava või akna on [12]

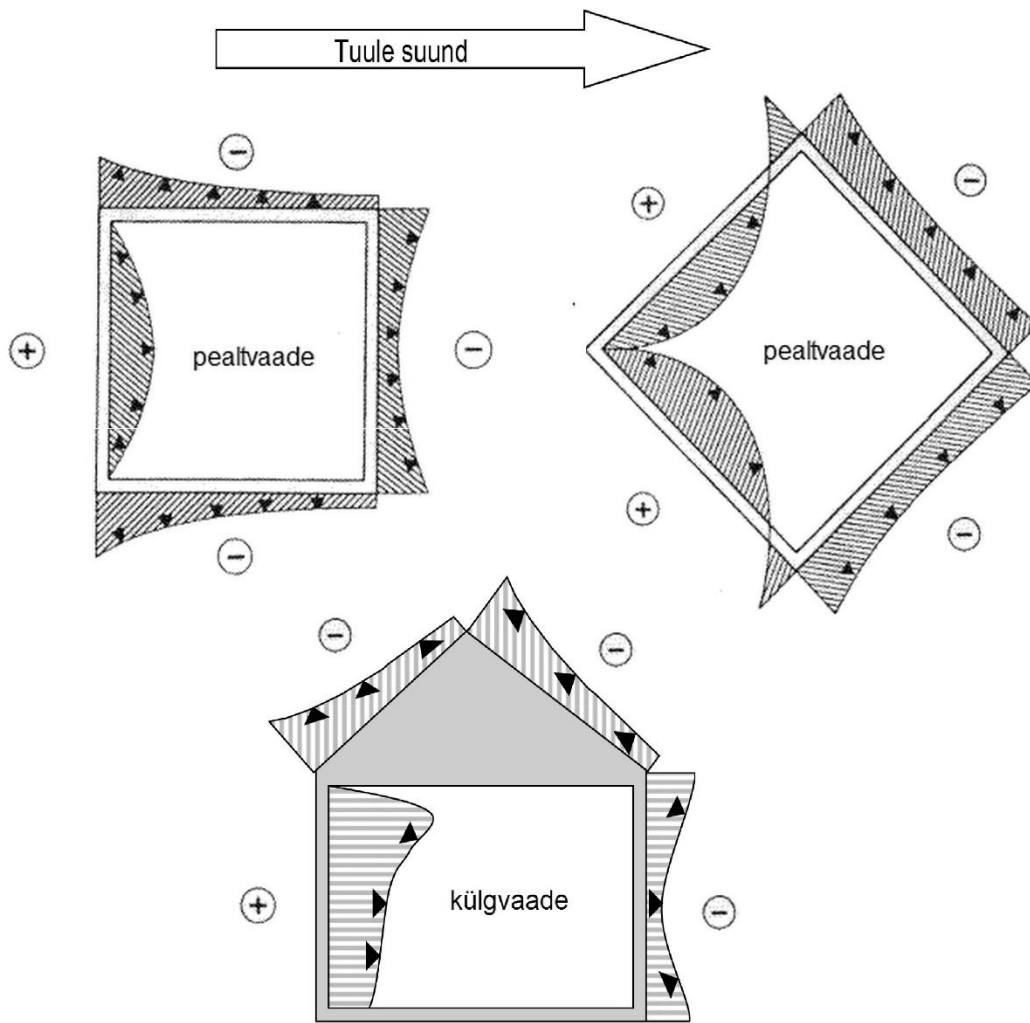
$$Q_t = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2)$$

Rõhkude erinevus avaldub [12]

$$\Delta p = |p_o - p_i| \quad (3)$$

ning tuule mõjul tekib õhuava välisküljele rõhk [9]

$$p_t = C_p \rho \frac{v^2}{2}. \quad (4)$$



Joonis 1. Tuule poolt tekitatud rõhujaotus hoonel. [13-14]

Ühepoolne ventilatsioon

Ühepoolse ventilatsiooni korral liigub õhk hoonesse ning sealt välja läbi avade, mis asuvad hoone samal küljel. Kui ristventilatsiooni korral on õhu liikumine läbi iga õhuava ühesuunaline, siis ühepoolse ventilatsiooni korral võib õhk läbi ühe ja sama ava liikuda nii hoonesse sisse kui välja. Seetõttu on ühepoolse ventilatsiooni korral vooluhulga leidmine keerukam ning selle täpselt hindamiseks tuleb arvesse võtta ka turbulentside efekte. [15]

Kahesuunaline õhuvool läbi ava kujuneb tuule poolt tekitatud rõhu erinevustest ava kõrguse piires. Rõhkude erinevus õhuava erinevatel külgedel avaldub valemite (3) ja (4) kaudu, kus

tuule rõhukoefitsiendi C_p võib lugeda konstantseks, sest akna pindala on võrreldes hoone seina pindalaga piisavalt väike. Kuivõrd tuule kiirus ava erinevatel kõrgustel on erinev, avalduvad õhu sisse- ja väljavoolu hulgad [15]

$$Q_{in} = \int_{z_0}^h C_d l \sqrt{\frac{2\Delta p(z)}{\rho}} dz, \quad (5)$$

$$Q_{out} = \int_0^{z_0} C_d l \sqrt{-\frac{2\Delta p(z)}{\rho}} dz. \quad (6)$$

Massi jäävuse seaduse järgi on summaarne õhuvooluhulk [15]

$$Q = Q_{in} = Q_{out}. \quad (7)$$

Võttes arvesse valemeid (3-7) ning tuule eksponentsiaalset profiili, mida käsitleb alapeatükk 1.2.3, avaldub turbulentsiefekte arvesse võtmata ühepoolse ventilatsiooni õhuvoolu hulk [15]

$$Q_s = \frac{C_d l \sqrt{C_p} \int_{z_0}^h \sqrt{z^{2/7} - z_0^{2/7}} dz}{z_{ref}^{1/7}} \bar{v}. \quad (8)$$

Madalatel tuule kiirustel domineerib ühepoolse ventilatsiooni olukorras üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon. Sõltuvalt tuule suunast võivad tuule kiiruse kasvades tuule mõjul toimiv ja üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon suunata õhku vastupidistes suundades liikuma, mis vähendab ventilatsioonihulka. See efekt esineb tugevamalt just hoone tuulealusel küljel. [16-19]

1.2.3 Loomulikku ventilatsiooni mõjutavad tegurid

Avade kuju, suurus, konfiguratsioon ja paiknemine ilmakaarte suhtes

Loomulikku ventilatsiooni mõjutavatest teguritest on inimese poolt enim mõjutatav õhu liikumise avade suurus, kuju ja paiknemine üksteise ning ilmakaarte suhtes – see otsustatakse ära hoone projekteerimise käigus. Eelpool mainitud parameetrid mõjutavad nii ventilatsioonihulka kui ka õhuvoolu teed hoones. Enim mõjutab õhuvoolu hulka sisselaske ava

kuju, suurus ja paigutus. Küll aga on selles vallas läbiviidud uurimuste hulk võrdlemisi väike. [20-21]

Loomuliku ventilatsiooni efektiivsust mõjutab nii hoone fassaadil olevate avade paigutus ja suurus kui ka hoone sees õhu teele jäävate avade, nagu uste ja koridoride, geometria. Õhuvahetus on suurem juhul, kui õhu sisend- ja väljundavad asuvad ruumi ristuvatel või vastaskülgedel. Mida suurem on sisse- ja väljalaskeavade kõrguste vahe, seda suurem on rõhugradient ning tulemusena ka õhuvahetus. Samuti suurendab loomuliku ventilatsiooni efektiivsust akende ja ventilatsiooniavade paigutamine valdavalt puhuvate tuulte suunas. Seeläbi jõuab siseruumidesse keskmiselt suurem hulk välisõhku ning õhuvahetuse kordsus kasvab. [20]

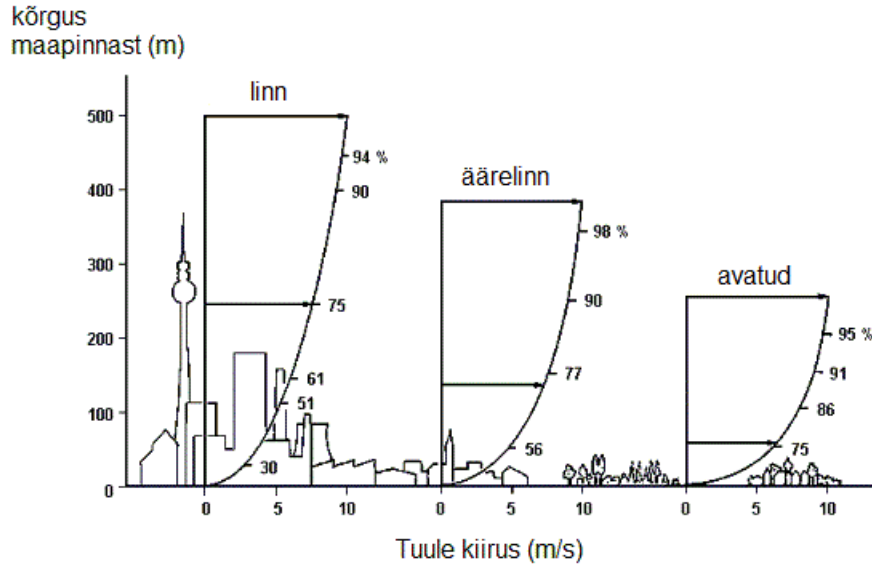
Hoone ümbruse mõju tuule suunale ja kiirusele

Lisaks hoone sees liikuva õhumassi teele jäävatele takistustele mõjutavad loomulikku ventilatsiooni ka hoone ümbruses paiknevad ehitised, haljastus ning maastiku reljeef. Hoone ümber asuvad teised ehitised ning puud ja maastiku iseärasused muudavad tuule teele ette jäädes selle suunda ja kiirust. [10]

Tuule kiirust erinevatel kõrgustel ning maastikel iseloomustatakse piirkihi mudeli abil. Piirkihiks nimetatakse atmosfääri madalaimat osa: kihti maapinnast sellise kõrguseni, kus hõõrdumise mõju pole enam tarvis arvestada. Atmosfääri piirkihi paksus on mõnisada meetrit ning see suureneb maapinnal olevate takistuste, nagu hooned ja haljastus, tiheduse kasvuga. Tuule profiili iseloomustab piirkihis eksponentseos [22]

$$v_z = v_g \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha, \quad (9)$$

Mida tihedam on hoonestus ja haljastus, seda suurem on α väärtus ning seda väiksem on tuule kiirus atmosfääri piirkihis (joonis 2). Tulemusena jõuab tihedama asustuse ja haljastusega aladel paiknevate hoonete akende ja ventilatsiooniavade kaudu hoonesse vähem välisõhku ning ventilatsioonihulk on väiksem. Madalamatel kõrgustel on tuule suund ja tugevus ümbritsevate takistuste poolt rohkem mõjutatud. Seega tuleb avade konfiguratsiooni ja paigutamise planeerimisel võtta arvesse ka hoone ümbrust. [10, 22-23]



Joonis 2. Tuule eksponentprofiil kolme erineva maastikutüübi korral. [24]

Tuule rõhukoefitsiendid

Eelpool esitatud väidete põhjal võib öelda, et tuule suund ja kiirus on ühed olulisemad tegurid loomuliku ventilatsiooni efektiivsuse määramisel. Tuule rõhku hoonele esitatakse enamasti rõhukoefitsiendi C_p kaudu. Tuule rõhukoefitsient sõltub paljudest parameetritest: hoone geomeetria ja paigutus, hoone ümbrus, tuule suund ja kiirus, ning avaldub valemiga [25]

$$C_p = \frac{P_x - P_0}{P_d}, \quad P_d = \frac{\rho v_z^2}{2}. \quad (10), (11)$$

On leitud, et ventilatsioonisimulatsioonides on üheks peamiseks ebatäpsuse allikaks just tuule rõhukoefitsiendid. Praktikas on kõikide C_p tegurite väärtust mõjutavate parameetrite arvesse võtmine keeruline ning seega ei ole enamasti võimalik rõhukoefitsiente täpselt määrata. Ventilatsiooni- ja energiasimulatsioonides kasutatavate tuule rõhukoefitsientide allikad võib jagada primaarseteks ja sekundaarseteks. [25]

Primaarseteks allikateks C_p tegurite saamisel peetakse mõõtmisi reaalsete hoonete juures, tuuletunneli eksperimente ning arvutuslikke hüdrodünaamika simulatsioone ehk CFD simulatsioone. Primaarsetel allikatel põhinevad tuule rõhukoefitsiendid on kõige täpsemad, kuid nende saamine on ka kõige kulukam ning aeganõudvam. Täiemahulisi mõõtmisi hoonete

juures kasutatakse enamasti sekundaarsete allikate valideerimiseks. Kuivõrd C_p tegurid saadakse mõõdetud suuruste, nagu õhurõhk ja tuule suund, kombineerimise teel, esineb ka täiemahulistel mõõtmistel saadud tuule rõhukoefitsientides ebatäpsusi mõõteandurite mõõtevea tõttu. Samuti ei pruugi selliste C_p tegurite kasutamine valideerimiseks õnnestuda, sest hoone ümbrust kirjeldavaid parameetreid ei ole alati võimalik üheselt määrata. Tuuletunnelit peetakse samuti üheks täpseimaks, aga ka kulukaimaks tuule rõhukoefitsientide saamise meetodiks. Tuuletunneli eksperimendid on levinuimad primaarsed allikad C_p tegurite määramiseks. CFD simulatsioonide kasutus C_p tegurite saamiseks ei ole peamiselt nende ajakulukuse tõttu veel laialt levinud. [25]

Sekundaarseteks C_p tegurite saamiseks on andmebaasid ja analüütilised mudelid, mis kasutavad sisendina primaarsetest allikatest saadud andmeid. Sekundaarseid allikaid C_p tegurite saamiseks ventilatsioonisimulatsioonide jaoks kasutatakse nende odavuse ja lihtsuse tõttu primaarsetest allikatest oluliselt rohkem. Andmebaasidesse on koondatud primaarsetest allikatest saadud C_p tegurid, mis on kategoriseeritud oluliste parameetrite järgi, näiteks tuule suund, hoone kuju ja kõrgus. Andmebaaside peamiseks puudusteks on asjaolud, et rõhukoefitsiendid on antud vaid piiratud hulga tuule suundade jaoks ning saadaval on vaid üle terve hoone seina keskmistatud C_p tegurid, mis ei ole piisavalt täpsed, et rahuldada ventilatsioonisimulatsioonide sisendparameetrite täpsuse nõudeid. Kasutajate seas on laialt levinud kaks tuule rõhukoefitsientide andmebaasi: AIVC ja ASHRAE. Analüütilised mudelid on üles ehitatud valemitele, mis on tuletatud täiemahuliste mõõtmiste ja tuuletunneli eksperimentide andmetest, ning pakuvad võimalust leida C_p tegurid erinevate parameetritega hoonetele, võttes arvesse hoone kuju ning seda ümbritsevaid takistusi. Kõige põhjalikumad tuule rõhukoefitsientide sekundaarsed allikad, mis võtavad arvesse tuule suunda, ümbritseva hoonestuse mõju, ning õhuava asukohta hoone seinal, on CpCalc+ ja CpGenerator, milledest viimane ei ole 2014. aasta detsembrist enam kasutajatele kättesaadav. Sekundaarsetest allikatest saadud C_p tegureid ei ole soovitatav kasutada simulatsioonides, mis käsitlevad madalaid hooned kõrge ja tiheda hoonestusega ümbruses, sest sellistes tingimustes ei ole saadud rõhukoefitsiendid enam piisavalt täpsed. [25-27]

1.2.4 Loomuliku ventilatsiooni potentsiaal hoone jahutusvajaduse alandamiseks

Päeval ajal toimub loomuliku ventilatsiooni jahutav toime mitmel viisil. Akende või muude õhuavade kaudu toimuv õhuvahetus alandab ruumitemperatuure seni, kuni sisetemperatuur on välistemperatuurist kõrgem. Otsene jahutusefekt tekib õhuvoolu toimel inimese kehalt aurustuva niiskuse tõttu. Kui päevased välistemperatuurid ületavad sisetemperatuuri, saab hoonet jahutada kaudselt loomuliku öise ventilatsiooni kaudu. Kui välistemperatuur langeb sisetemperatuurist madalamale, avatakse aknad, mille kaudu ruumidesse sisenev jahedam õhk vahetab välja soojema siseõhu ning jahutab maha suure termilise massiga hoone osad, mis seetõttu järgmisel päeval aeglasemalt üles soojenevad. Termiliseks massiks nimetatakse hoone osa omadust salvestada soojusenergiat ehk hoone osasid, millel on suur soojusmahtuvus, näiteks telliskivist või betoonist seinad ja põrandad. Seega saab loomuliku öise ventilatsiooni abil vähendada ka hoonete päevast energiavajadust jahutuseks. [10]

Loomulik öine ventilatsioon on energiatõhusa ehituse valdkonnas kasutatav tehnika, mille abil vähendatakse hoonete suvist energiavajadust jahutuseks. Tänapäevani ei ole loomuliku öise ventilatsiooni tehnika arhitektide poolt sagedasti kasutatav praktika, sest selles vallas tehtud uurimuste tulemused ei ole veel piisavalt laiapinnalised ja täpsed, et anda kindlaid suuniseid, mida tuleks loomuliku öise ventilatsiooni potentsiaali maksimaalseks realiseerimiseks hoone projekteerimise järgus arvesse võtta. [28] Suurem osa loomulikku öist ventilatsiooni käsitlevaid uuringuid on viidud läbi büroohonete jaoks ning informatsiooni elamute kohta leiab allikatest vähem.

Loomuliku öise ventilatsiooni efektiivsust jahutusvajaduse alandamisel määravad mitmed tegurid: kliima, õhuvahetuse kordsus, termilise massi hulk ja paigutus hoones, soojusallikad hoone sees ja väljas, välispiirde õhukindlus. Neist suurimat mõju omavad kliima ja õhuvahetuse kordsus [28]. Loomulikul öisel ventilatsioonil on enim potentsiaali parasvöötme kliimas, kus öised välistemperatuurid langevad sisetemperatuuridest madalamale ning suveperioodil tekib hoonete jahutusvajadus. Loomuliku öise ventilatsiooni mõju piiravaks teguriks jahutusvajaduse alandamisel on päevane maksimaalne temperatuur, mil öine jahutus ei kompenseeri enam päeval tekkivat jahutusvajadust. Põhja-, Ida- ja Kesk-Euroopa kliimas on loomuliku öise ventilatsiooni potentsiaal märkimisväärne. [29] Parasvöötme kliimas läbiviidud uurimused näitavad, et ventilatsioonihulga kasvades väheneb jahutuseks vajamineva energia

hulk hoonetes teatud piirini, millest edasi saavutab jahutusvajadus ligikaudu konstantse väärtuse ning õhuvahetuse kordsuse tõstmine enam jahutusvajadust ei alanda. Selleks, et loomuliku öise ventilatsiooni jahutuspotentsiaali rakendada, loetakse optimaalseks õhuvahetuse kordsuseks $10 - 12 h^{-1}$. [28, 30-33]

Olulisteks loomuliku öise ventilatsiooni jahutuspotentsiaali mõjutavateks teguriteks on ka soojusallikad hoone sees ja väljas. Energiatõhusa ehituse printsiipide järgi ehitatud hoonetes on lõunafassaadil enamasti palju klaaspinda, läbi mille päikese vabaenergia toimel hoone päeval soojeneb. Suveperioodil asendub küttevajadus jahutusvajadusega ja seetõttu on soovitatav kasutada päikesekaitse selektiivklaase, mis pärsivad päikeseenergia jõudmist siseruumi. Päikesekiirte jõudmist hooneni võivad varjutada ümbritsevad ehitised ja haljastus, mis on samas ka ventilatsiooni takistavaks teguriks, vähendades hoone ümber tuule kiirust. Eelmainitud põhjustel uuritakse loomuliku öise ventilatsiooni abil hoone jahutusvajaduse alandamist ning seda mõjutavaid tegureid sageli energia ja ventilatsiooni paarissimulatsioonidega, et võtta arvesse nii õhuvoolu kui ka energiaülekandeid. [28-31]

1.3 Ventilatsioonisüsteemide uurimismeetodid

Hoonete ventilatsioonisüsteemide analüüsimiseks ja testimiseks kasutatakse erinevaid viise: analüütilisi mudeleid, empiirilisi mudeleid, eksperimentaalseid mudeleid, mitme tsooni mudeleid, tsoonilisi mudeleid ja arvutuslikke hüdrodünaamika mudeleid ehk CFD mudeleid. [34]

Analüütilised mudelid on tuletatud hüdrodünaamika ja soojuse ülekande põhivõrranditest ning on ühed vanimatest tööriistadest ventilatsioonisüsteemide uurimiseks. Analüütilised mudelid kasutavad lihtsustusi geomeetrias ja ääritingimustes, mistõttu võib konkreetne mudel sobida vaid kindlat tüüpi probleemi lahendamiseks. Analüütilisi mudeleid saab kasutada vaid lihtsamate olukordade uurimiseks ning tulemused võivad olla ebatäpsed. Vaatamata sellele on nad oma lihtsuse ja madala arvutusvõimsuse vajaduse poolest siiani populaarsed. [34]

Sarnaselt analüütilistele mudelitele baseeruvad empiirilised mudelid massi ja energia jäävuse seadustel, kuid kasutatakse ka eksperimentaalsetest või arvutisimulatsioonide andmetest tuletatud koefitsiente, mis töötavad kindlates vahemikes. Empiirilised mudelid sõltuvad samuti

suurel määral lahendatava probleemi spetsiifikast ning on seetõttu enim kasutatud ehitusinseneride poolt. [34]

Eksperimentaalsed mudelid on ajamahukad ja kulukad ning saadud andmed ei ole ilmtingimata täpsemad kui teiste mudelite tulemused. Eksperimentaalseid mõõtmistulemusi kasutatakse enamasti teiste mudelite valideerimiseks. [34]

Mitme tsooni mudelid lahendavad samuti massi ja energia jäävuse seaduseid, kuid lihtsustamiseks on uuritav hoone jagatud korruste või ruumide kaupa tsoonideks, millede sees loetakse õhumassi parameetrid homogeenseks. Mitme tsooni mudelite kvantitatiivsed simulatsioonitulemused üksikute tsoonide õhuvahetuse kohta võivad olla ebatäpsed, kuid seda tüüpi mudelid on laialdaselt levinud tõhusa tööriistana kogu hoone ventilatsioonisüsteemide uurimises. [34]

Tsoonilistes mudelites jagatakse ruumid hoones veel omakorda tsoonideks (mitte enam kui 1000 tsooni ruumi kohta), et leida täpsemaid lahendeid probleemidele, kus uurimisobjektis esineb suure ruumalaga siseruume või ei ole tsooni õhutemperatuuri homogeensuse eeldus õigustatud. Tsoonilised mudelid ei ole osutunud populaarseks töövahendiks ventilatsioonisüsteemide uurimisel, sest nõuavad pea sama palju arvutusvõimsust kui CFD mudelid, sisendandmete ettevalmistamisele kulub sageli rohkem aega ning tulemuste täpsuselt jäävad nad siiski CFD mudelitele alla. [34]

CFD mudelid lahendavad numbriliselt osatuletistega diferentsiaalvõrrandite süsteemi massi, impulsi (Navier-Stokes'i võrrandid), energia ja turbulentsi kohta. Lahendina annavad need mudelid õhurõhu, -kiiruse, -temperatuuri, -niiskuse ja koostise ruumilise jaotuse. CFD mudelid on võrreldes teiste meetoditega oluliselt ajamahukamad ning vajavad suuremat arvutusvõimsust. Vaatamata sellele on CFD mudelid enim kasutatud töövahendiks ventilatsioonisüsteemide uurivates teaduslikes publikatsioonides. [34]

Simulatsioonitulemuste täpsuse parandamiseks kasutatakse üha enam CFD ja teiste meetodite ühendmudeleid. Ka sellistes ühendmudelites kasvab keerukus ja arvutusvõimsuse maht täpsuse kasvuga. [34]

2 Materjal ja metoodika

2.1 Katse püstitus

Käesolevas töös püstitatud eesmärkide täitmiseks uuriti mitme tsooni õhuvahetuse mudeli COMIS 3.2 abil kahekorruselise elamuhoone ventilatsioonihulka erinevate akende kombinatsioonide ning kolme erineva ümbruse: avatud ala, äärelinn ja linn, kontekstis. Simulatsioonitarkvara COMIS 3.2 ning selle abil loodud hoone mudelit on lähemalt kirjeldatud alapeatükis 2.2. Hoone ümbruse varieerimine käis tuule rõhukoefitsientide muutmise kaudu, millest on põhjalikumalt juttu alapeatükis 2.3.

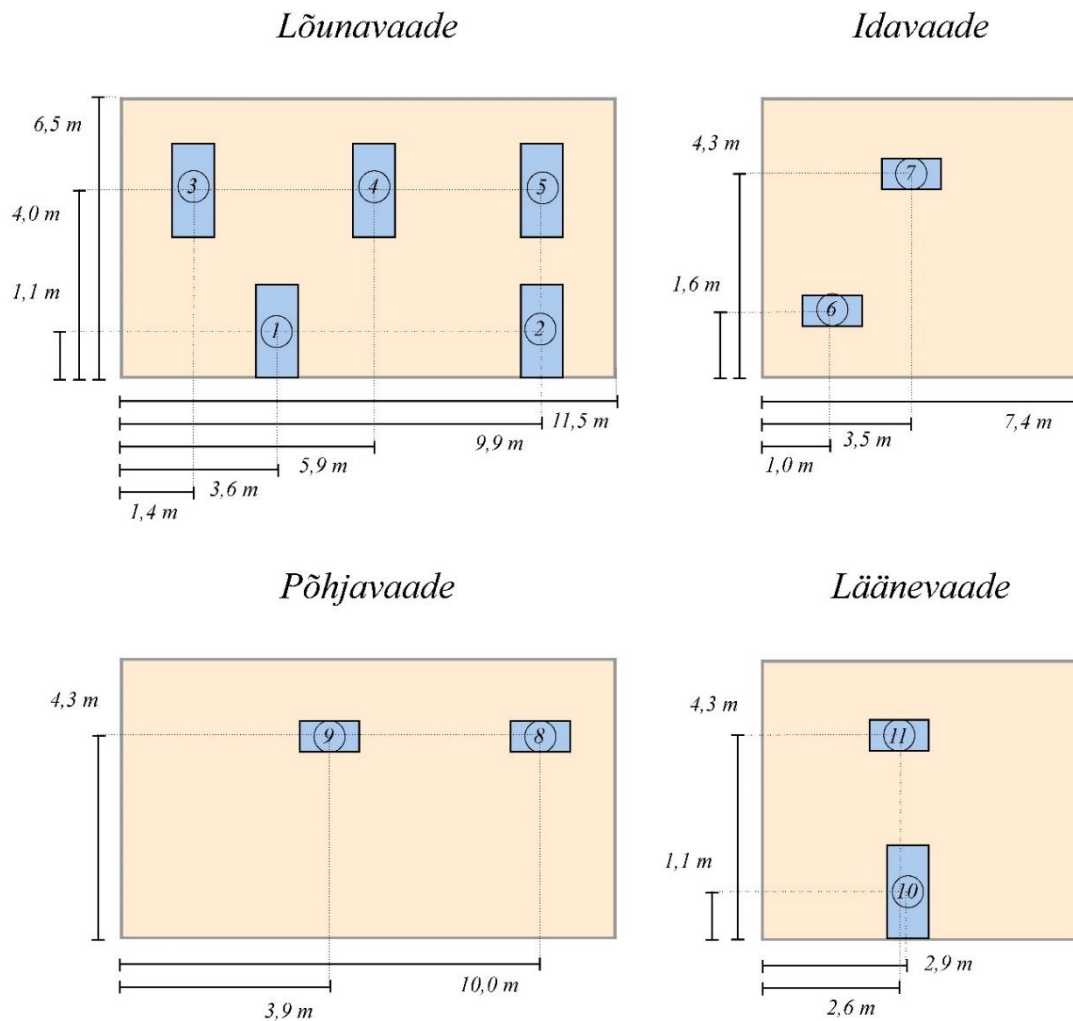
Töös kasutati tüüpilise kahekorruselise elamuhoone mudelit, mis on ehitatud energiatõhusa ehituse printsiipide järgi. See tähendab, et hoone lõunaküljel asub suurem osa akendest ning põhjaküljel kõige vähem klaaspinda. Mudeli loomise aluseks võeti reaalne elamu, mis asub Õssu külas aadressil Pihla 2 ja millele on omistatud passiivmaja sertifikaat. Joonised ja fotod Pihla 2 hoone välisvaadetest on toodud lisas 1. Lähtehoone valikul lähtuti teadmisest, et selles hoones tekib suvekuudel jahutusvajadus ning selleks kasutatakse lisaks mehhaanilisele ventilatsioonile ka loomulikku õist ventilatsiooni. Mudelahoone teljed on paralleelsed põhjalõuna ja ida-lääne suundadega ning hoonefassaadide vaated koos mõõtude ning akende paigutuse ja nummerdusega on toodud joonisel 3. Hoone laius on 11,5 m, sügavus 7,4 m ning kõrgus 6,5 m, mis on jagatud kaheks võrdseks 3,25 m kõrguseks korruseks.

Mudelhoonel on kahte tüüpi aknaid, mis mõlemad avanevad vertikaalselt tuulutusasendisse 15° nurga all. Hoone akende kuju ja mõõdud on toodud joonisel 4. Lähtehoones on avatavad vaid lõuna- ja lääneküljel paiknevad aknad 1-5 ja 10-11, sest avatavate akende hind on kõrgem kui mitteavatavatel akendel. Katses viidi simulatsioon läbi 60 erineva akende avatuse kombinatsiooni jaoks kolmes erinevas ümbruses – varieeriti nii akende paigutust üksteise suhtes kui ka summaarset avatud akende arvu.

Simulatsioonid viidi läbi TMY2 standardaasta Tartu-Tõravere kliimaandmestikuga, mida on täpsemalt kirjeldatud alapeatükis 2.4. Vaadeldavateks kuudeks olid juuni, juuli ja august ning öiseks ajavahemikuks 22:00–7:00. Uuritava perioodi valikul lähtuti temperatuuri käigu sobilikkusest loomulikuks öiseks ventilatsiooniks: juunist augustini on päevased õhutemperatuurid aasta kõrgeimad ning jahutusvajaduse teke on kõige tõenäolisem. Öötundide

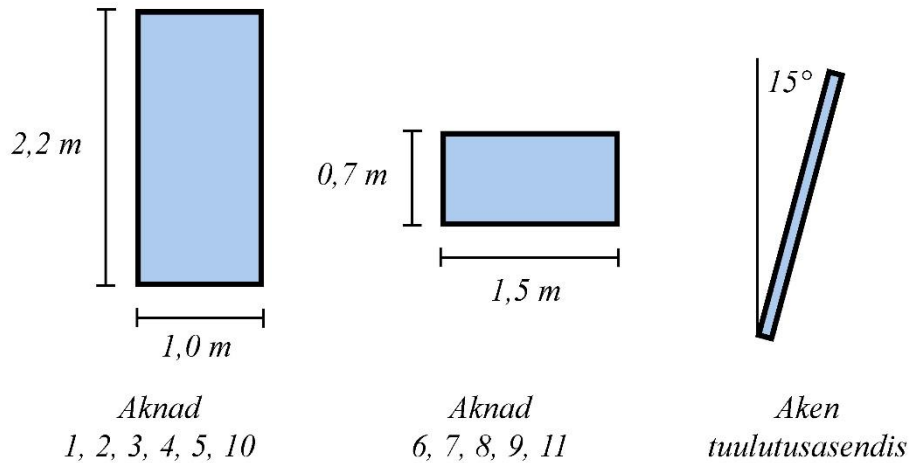
vahemik valiti selline, mil välistemperatuur langeb sisetemperatuurist madalamale. Kuna akende avamist hoones kontrollib enamasti selle kasutaja, võeti arvesse ka inimeste ööpäevast rutiini.

Mudelhoone fassaadide välisvaated



Joonis 3. Joonisel on toodud mudelhoone fassaadide välisvaated. Hoone telg on paralleelne põhja-lõuna suunaga. Joonisel on toodud hoone gabariitmõõdud ning akende nummerdus ja nende keskpunktide koordinaadid hoone fassaadidel.

Katse eesmärk oli leida tendentsid ning üldised seaduspärad loomulikku õist ventilatsiooni mõjutavatest teguritest elamahoones Eesti kliima kontekstis. Uuritavaks parameetriks simulatsioonides oli kogu hoone õhuvahetuse kordsus.



Joonis 4. Joonisel on toodud mudelhoone põhiversiooni kahe aknatüübi mõõdud ning akna avanemise viisi illustratsioon.

2.2 Simulatsioonitarkvara COMIS 3.2

2.2.1 Ülevaade arvutusmeetodi põhimõttest ja kasutusest

Käesoleva töö eesmärkide saavutamiseks sooviti leida loomulikke õist ventilatsiooni mõjutavate tegurite tendentsid ja üldjoontes kehtivad seaduspärad, oluline ei olnud kvantitatiivselt täpsete tulemuste saamine. Samuti seati eesmärgiks anda projekteerijatele juhiseid võrdlemise kiire ja efektiivse meetodi kasutamiseks ventilatsioonipotentsiaali hindamisel. Eelmainitud põhjustel valiti probleemi lahendamiseks mitme tsooni õhuvahetuse mudel COMIS 3.2. [26] Tegemist on ühe põhjalikuima mitme tsooni õhuvahetuse mudeliga, mida saab kasutada eraldi programmina ventilatsioonisüsteemide analüüsimiseks, kuid võimaldab ka kasutust ühe moodulina hoonete energiasimulatsioonides [14].

COMIS 3.2 mudelis jagatakse hoone tubade või korruste kaupa tsoonideks, milledes on tundmatu väärtusega rõhusõlmed. Tsooni piires loetakse õhu parameetrid homogeeneks. Tsoone ühendavad diskreetsed õhuvooluteed (praod, šahtid, ukSED või aknad) tundmatu massivooluga. Mudel koosneb mittelineaarsetest võrranditest, mis baseeruvad massi jäävuse seadusel rõhusõlmedes ning rõhu-voolu suhetel õhuvooluteedel. COMIS tarkvarapakett käsitleb rõhusõlmi iseseisvatena ning arvutab vooluhulga vastavalt rõhu väärtuse hinnangutele rõhusõlmedes, mida õhuvoolutee ühendab, võttes arvesse temperatuurigradienti, tuule rõhku

ning mehaanilist ventilatsiooni. Olgu rõhk kahes rõhusõlmes, mida õhuvoolutee ühendab, P_i ja P_j , siis ideaalsel juhul sõltub vooluhulk nende rõhkude vahest:

$$f_{i-j} = f_{i-j}(P_i - P_j). \quad (12)$$

COMIS 3.2 kasutatav arvutusmeetod on usalduspiirkonnaga Newton-Raphson'i meetod, mille abil lahendatakse eelnevalt kirjeldatud mittelineaarne võrrandisüsteem. Sisendparameetrina antakse iga ajasammu kohta rõhu väärtus välistes rõhusõlmedes (välisõhurõhk ja tuule poolt tekitatud lisarõhk). Iga iteratsiooniga antakse hinnang rõhule kõigis rõhusõlmedes, summeerides vooluhulkasid, mis vastavasse rõhusõlme tulevad ning võttes arvesse massi jäävuse seadust. Olgu rõhuvektor k -ndal iteratsioonil $P_{[k]}$ ja vastavad vooluhulkade summad $r_{[k]}$, siis $r_{[k]}$ annab jääkviigade vektori, mida mudel püüab nullida. Selleks kasutataksegi Newton-Raphson'i meetodi põhimõtet. Leitakse Jakobi maatriks $J_{[k]}$, mis sisaldab jääkviigade vektori $r_{[k]}$ tuletisi. Jakobi maatriksit kasutades arvutab COMIS igas rõhusõlmes uue rõhu väärtuse nii, et jääkvead võrduksid nulliga. Rõhkude arvutamise algoritm on

$$P_{[k+1]} = P_{[k]} - J_{[k]}^{-1} r_{[k]}. \quad (13)$$

Mudelites, mis sisaldavad tugevalt mittelineaarseid komponente, näiteks ventilatsioonišahtid ja suured avad, ei pruugi Newton-Raphsoni meetod tulemust anda, sest samm $P_{[k+1]}$ -ni võib olla suurem vahemikust, milles tuletise info Jakobiaanist kehtib. Selle probleemi ületamiseks on COMIS'es Newton-Raphson'i meetodile seatud usalduspiirkond. Mudel kasutab summutustegurit μ , et summutada Newton-Raphson'i sammu,

$$P_{[k+1]} = P_{[k]} - \mu J_{[k]}^{-1} r_{[k]}. \quad (14)$$

Kui $0 < \mu < 1$, siis otsitakse $P_{[k+1]}$ -d väiksemast vahemikust, kus tuletistes sisalduv informatsioon veel kehtib. Sobiva μ leidmiseks moodustatakse jääkviigadest skalaarne kulufunktsioon ning leitakse selle miinimum. Kulufunktsiooniks sobib jääkviigade ruutude summa. [35]

COMIS 3.2 mudeli eeliseks enamike mitme tsooni mudelite ees on erinevate modulite olemasolu erineva dünaamikaga õhuvooluteede jaoks, mis tõstavad simulatsioonitulemuste täpsust. Kui tavaliselt arvutatakse mitme tsooni mudelites õhuvoolu hulk läbi õhuvoolu tee

vaid selle keskel, siis näiteks suurte avade puhul, nagu ukсед ja aknad, kus toimub õhu liikumine mõlemas suunas, leiab COMIS vooluhulga mõlemas suunas, arvutades vooluhulga nii ava üleval ja allas kui ka vahepealsetel tasanditel. Koguvooluhulk leitakse iga tasandi vooluhulkade summeerimisel. Samuti võetakse vastavat rõhuprofiili kasutades arvesse turbulentside efekte. [14]

Mitme tsooni mudelite puuduseks on sageli ka vastavate eksperimentaalandmete puudumine terviklike hoonete kohta, mistõttu mudelid on enamasti valideerimata. COMIS arvutusmudeli valideerimiseks ja arendamiseks viidi läbi üheksa eksperimentaaluuringut, kus kasutati mürkgaasi mõõtmisi elumajades, korterites, väiksemates büroohoonetes ja testruumides. Lisaks viidi läbi tundlikkusanalüüs, et määrata mudeli usaldusväärsuse piirid, ning ulatuslikud jõudlustestid ning võrdlused teiste ventilatsioonimudelitega. [14]

On leitud, et simulatsioonitulemustes esinevad vead või kõrvalekalded eksperimentaalsetest tulemustest tekivad sageli kasutajate poolt tehtud vigadest sisendfaili ettevalmistamisel. Taoliste vigade vältimiseks on pidevalt täiustatud COMIS'e kasutusjuhendit, mis selgitab üksikasjalikult kõikide sisendparameetrite tähendust. Samuti on programmi lihtsamaks kasutamiseks loodud graafiline kasutajaliides Simulation Studio. [36] Sisendparameetritest omavad tulemuste täpsusele tugevat mõju tuule rõhukoefitsiendid, mistõttu ei ole soovitatav kasutada üle hoone seina keskmistatud C_p tegureid. Madalate hoonete uurimisel tiheda hoonestusega aladel on soovitatav kasutada lausa eksperimentaalseid või tuuletunnelis saadud tuule rõhukoefitsiente. [26] Läbiviidud võrdluseksperimentid näitavad, et COMIS'ega saadud simulatsioonitulemused vastavad madalamate tuule kiiruste korral hästi eksperimentaalsetele tulemustele, kuid ei pruugi saavutada rahuldavat täpsusastet suurte tuule kiiruste korral [37]. Samuti tuleb arvesse võtta, et COMIS'e mudeli puhul on tegemist lihtsustusega, kus iga tsooni piires loetakse temperatuur, õhurõhk ja -niiskus konstantseks, mistõttu on täpsemate tulemuste saavutamiseks soovituslik kasutada reaalseid eksperimente või CFD simulatsioone. [14]

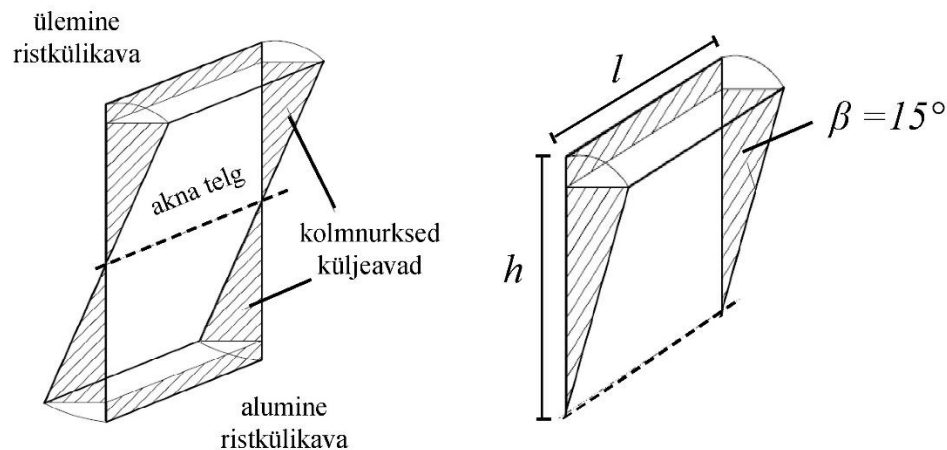
2.2.2 COMIS'es loodud mudel

COMIS'e simulatsioonimudelis on hoone jagatud kaheks võrdseks tsooniks, millede mõõtmed vastavad korruste mõõtmetele, mis on toodud alapeatükis 2.1. Kahte korrust ehk tsooni ühendab trepikoda, mis on mudelis kirjeldatud horisontaalse avana mõõtmetega $4,2\text{ m} \times 1\text{ m}$.

Akende mõõdud on toodud joonisel 4 alapeatükis 2.1 ning valitud akna tüübiks on LVO 2 (*Large Vertical Opening*), mille avanemisviis on illustreeritud joonisel 5. Akna efektiivne avatud pindala ehk voolutee ristlõike pindala arvutatakse valemist [16]

$$S_{ef} = h \cdot (h \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + l - l \cdot \cos\beta). \quad (15)$$

Hoone sisetemperatuuriks võeti simulatsioonides 23 °C ning suhteliseks õhuniiskuseks 50%. Sisekliima parameetrite valikul põhineti lähtehoones läbiviidud mõõtmiste tulemustel. Mudeli sisendparameetrite koondtabel on toodud lisas 2.



Joonis 5. COMIS Large Vertical Opening 2 (LVO 2) aknatüübi avanemisviis on toodud vasakpoolsel joonisel. Parempoolne joonis illustreerib käesoleva töö mudelisse sisestatud akende telje asukohta ning avanemist. Akna efektiivne avatud pindala on joonisel viirutatud. [25]

2.3 Tuule rõhukoefitsientide mudel CpCalc+

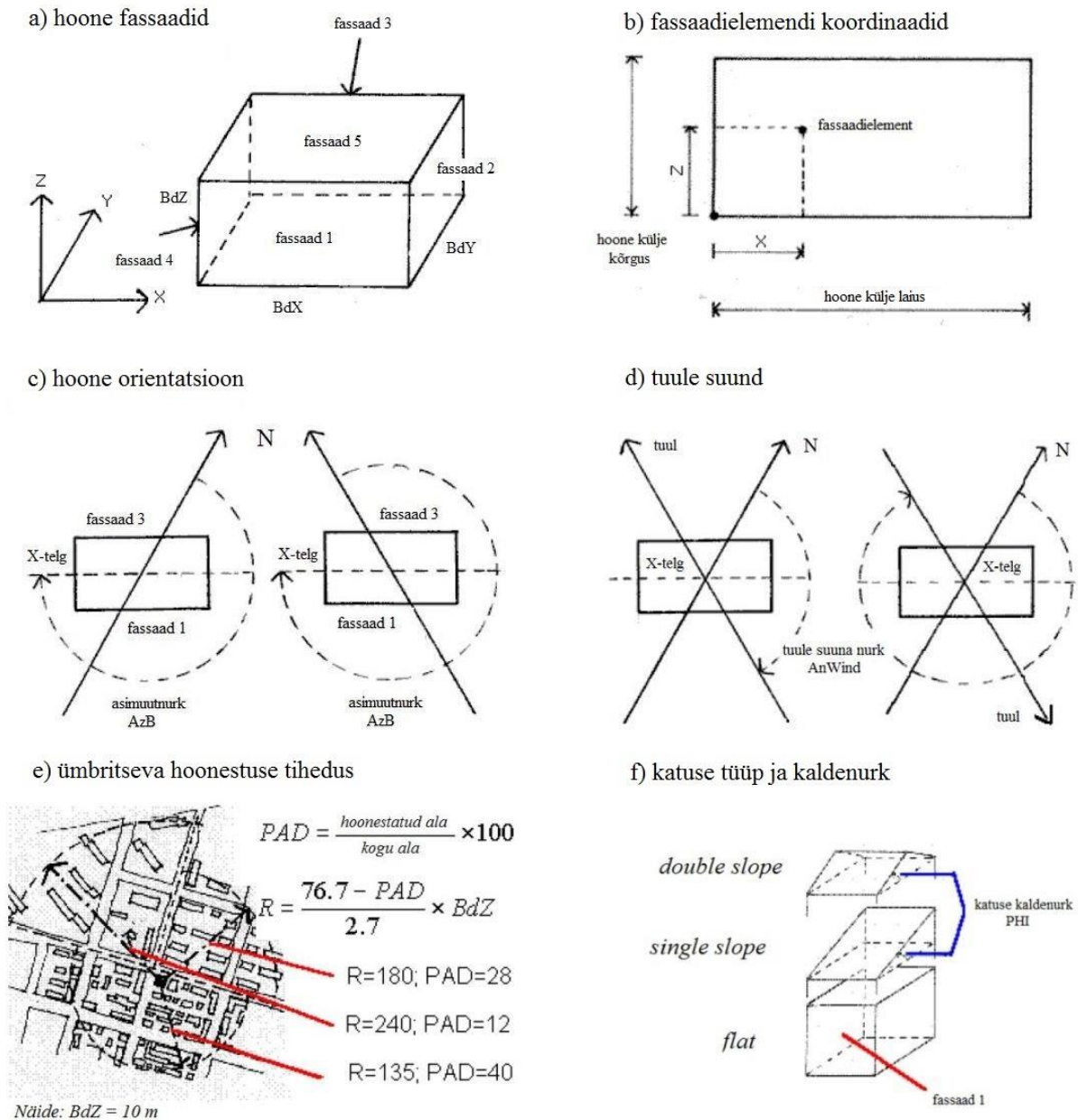
COMIS 3.2 mudelis sisendina kasutatud C_p tegurid uuritava hoone jaoks leiti tuule rõhukoefitsientide mudeli CpCalc+ abil. CpCalc+ tarkvara loodi algselt COMIS'e projekti käigus loodud CpCalc programmi edasiarendusena eesmärgiga pakkuda kasutajatele võimalust uurida ka hooneid, mis paiknevad mittetasasel maastikul. CpCalc+ põhineb tuuletunneli eksperimentitulemuste parameetrilisel analüüsil: regressioonanalüüsi põhjal loodi sobiv

algoritm tuule rõhukoefitsientide leidmiseks erineva tuule profiili ja suuna ning erineva geomeetria ja ümbrusega hoonete jaoks. [38-39]

CpCalc+ mudel võimaldab arvutada C_p tegureid risttahukakujuliste hoonete seinte ja katuse (võimalik määrata kaldenurka) igas punktis. Tarkvara võtab arvesse hoone geomeetria, hoone ümbrust ning tuule profiili ja suunda. CpCalc+ sisendparameetrid koos tähistega ja selgitustega on toodud tabelis 3 ning illustreeritud joonisel 6. Programmi poolt arvutatud tuule rõhukoefitsiendid ei ole usaldusväärsed väga tiheda hoonestusega ümbruse ning kõrghoonete korral. [40]

Tabel 3. CpCalc+ sisendparameetrite tähised, ühikud ja kirjeldused.

Tähis	Ühik	Kirjeldus
x	m	punkti x -koordinaat hoone fassaadil (määratakse vastaval hoone küljel)
y	m	punkti y -koordinaat hoone fassaadil (määratakse vastaval hoone küljel)
BdX	m	hoone pikkus
BdY	m	hoone laius
BdZ	m	hoone kõrgus
$ISLOPE$	–	katuse tüüp (<i>flat</i> (lame), <i>single slope</i> (ühe kaldega), <i>double slope</i> (topeltkaldega))
PHI	°	katuse kaldenurk
AzB	°	hoone asimuutnurk (hoone orientatsioon ilmakaarte suhtes)
PAD	%	hoonete all oleva pindala protsent kogupindalast teatud raadiuses uuritava hoone ümbruses (<i>plan area density</i>)
SbH	m	ümbritsevate hoonete keskmine kõrgus
$VeEXP$	–	tuuleprofiili eksponendi koefitsient α , mis iseloomustab hoonet ümbritsevate takistuste (ehitised, haljastus, maapinna ebatasasused) tihedust
$AnWind$	°	tuule suund



Joonis 6. CpCalc+ sisendparameetreid selgitavad joonised: a) hoone fassaadide nummerdus, b) hoone fassaadielemendi koordinaadid, c) hoone asimutnurk põhjakaare suhtes, d) tuule suuna nurk põhjakaare suhtes, e) ümbritseva hoonestuse tihedust määrav parameeter PAD, f) katuse tüüp ja kaldenurk. [40]

Käesolevas töös uuriti hoonet kolme erineva hoonestustihedusega ümbrose kontekstis: A - avatud ala, B - äärelinn ja C - linn. PAD, VeEXP ja SbH väärtused kolme eelmainitud ümbrose jaoks valiti tuginedes varasematele uuringutele ning tarkvara autorite suunistele [22, 26, 40-42]. Cp tegurid leiti 24 erineva tuule suuna jaoks 15° sammuga alates 0° (põhjasuund).

CpCalc+ sisendparameetrid kolme ümbruse jaoks on toodud tabelis 4 ning saadud tuule rõhukoefitsientide väärtused lisas 3.

Tabel 4. CpCalc+ sisendparameetrid kolme erineva ümbruse jaoks.

Parameeter	A (avatud ala)	B (äärelinn)	C (linn)
<i>BdX</i>	11,5	11,5	11,5
<i>BdX</i>	7,4	7,4	7,4
<i>BdZ</i>	6,5	6,5	6,5
<i>ISLOPE</i>	<i>flat</i>	<i>flat</i>	<i>flat</i>
<i>PHI</i>	0°	0°	0°
<i>AzB</i>	270 °	270 °	270 °
<i>PAD</i>	0%	10%	20%
<i>SbH</i>	–	6,5 m	13 m
<i>VeEXP</i>	0,14	0,22	0,33

2.4 Kliimaandmed

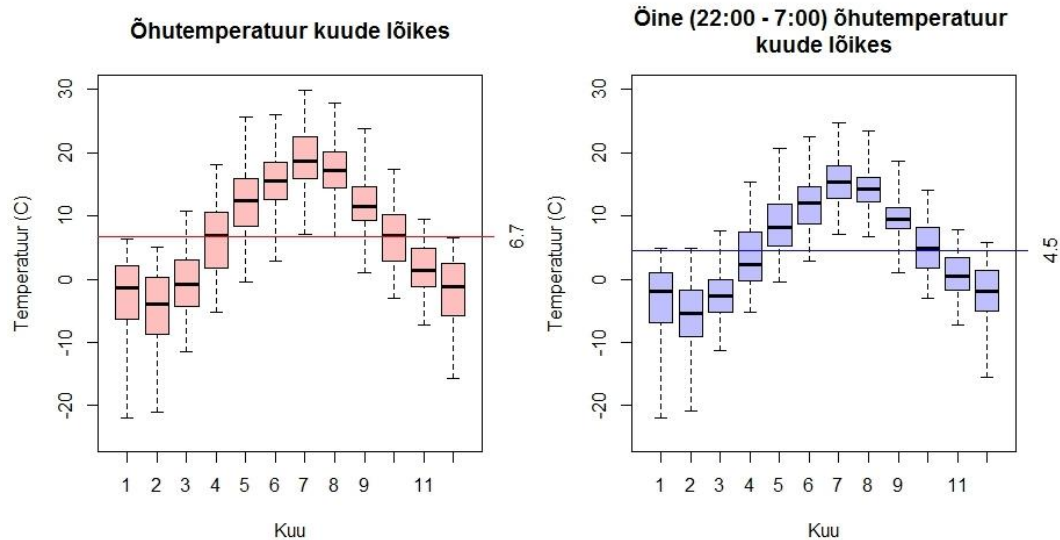
COMIS 3.2 mudel kasutab sisendina kliimaandmeid, milledeks on tuule suund, tuule kiirus, õhutemperatuur, õhuniiskus ja õhurõhk. Kliimaandmeid on COMIS'e sisendfaili võimalik sisestada tabelina, kus ajasammude vahe on vähemalt üks sekund. Arvutused tehakse iga ajasammu jaoks eraldi ning programm väljastab uuritava väljundparameetri, milleks käesoleva töö puhul on õhuvahetuse kordsus, iga ajasammu jaoks. [26]

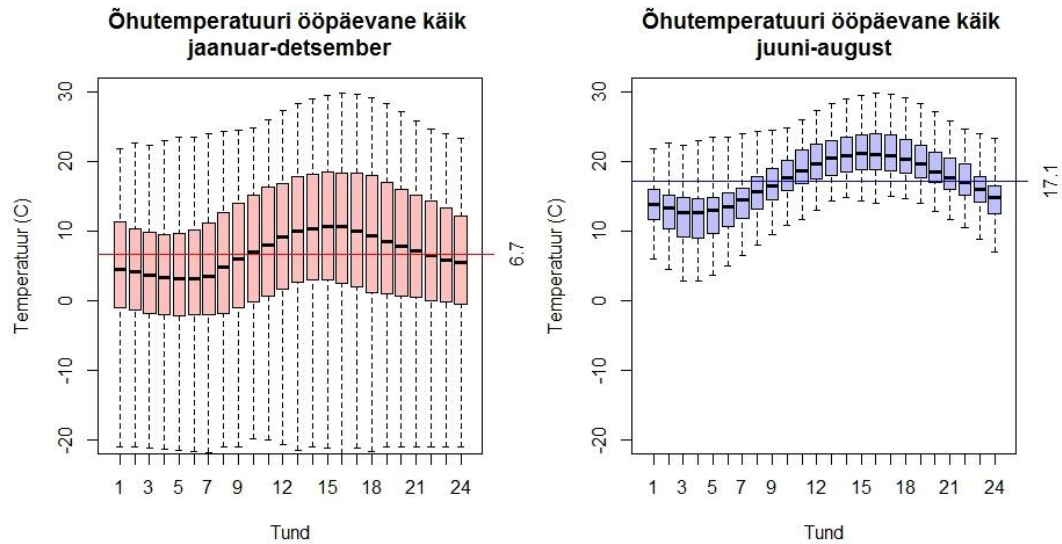
Käesoleva töö eesmärk oli uurida loomulikku ventilatsiooni Eesti kliima kontekstis ehk tüüpilisel aastal Eestis. Kasutatud kliimaandmestikuks on TMY2 ehk *Typical Meteorological Year 2* Tartu jaoks. Tegemist on aastapikkuse andmestikuga, kus kliimaparameetrid on antud tunniajase sammuga. Standardaasta koostamise meetodi eesmärk on saada iseloomulik aastapikkune kliimaandmestik uuritava asukoha jaoks. Selles töös kasutatud TMY2 põhineb 2000-2009 aastatel Tõraveres mõõdetud andmetel. Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam asub 70 m kõrgusel merepinnast ning selle koordinaadid on 58°15'51'' N ja 26°27'41'' E [43]. TMY2, varasemat TMY ja hilisemat TMY3 standardaastat kasutatakse sageli just

hoonesimulatsioonides. TMY2 andmestik saadi Meteonorm 7.3.1 [44] andmebaasist ning konverteeriti COMIS' e jaoks sobivaks failiks kliimaandmete töötlemiseks mõeldud lisamooduli COMISWeather abil [26]. COMIS 3.2 ja COMISWeather ei toeta uemat TMY3 kliimaandmestikku, mistõttu kasutati töös TMY2 standardaastat. Mõlemad standardid on loodud sarnaste algoritmidega, seega võib 2000-2009 mõõteandmetel põhinevat TMY2 kliimaandmestikku usaldusväärseks lugeda. [45]

Joonisel 7, kus on kujutatud TMY2 standardaasta õhutemperatuuride kuist jaotust, võib näha, et nii ööpäevased kui ka öised õhutemperatuurid on Eesti kliimas kõrgeimad perioodil juuni kuni august. Mais ja oktoobris on öiste õhutemperatuuride mediaanväärtus juba alla 10 °C. Õhutemperatuuride ööpäevase käigu, mida kujutavad alumised graafikud joonisel 7, ning töötavate inimeste rutiini põhjal valiti ööperioodiks ajavahemik 22:00–7:00. Joonisel 8 on toodud õhutemperatuuride sagedusgraafik, mille põhjal võib väita, et ka perioodil juuni kuni august langevad öised õhutemperatuurid kohati alla 10 °C.

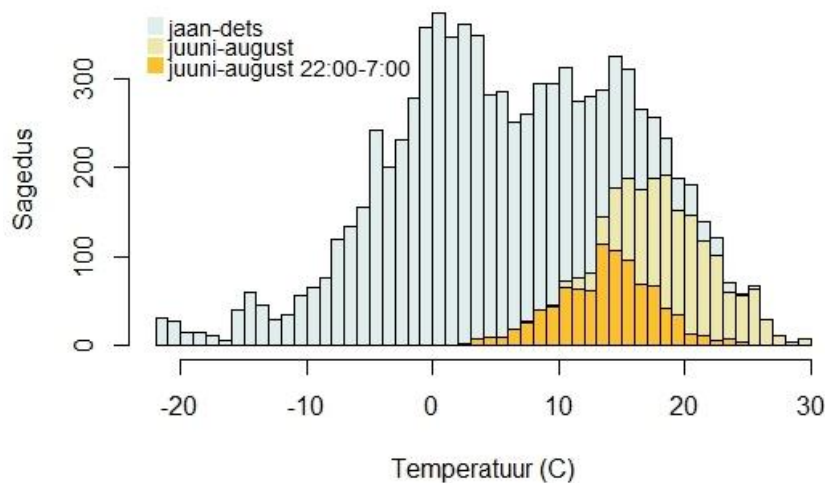
Joonised 9 ja 10 iseloomustavad tuule kiirust ja suunda TMY2 standardaastal. Tuule suund 0° märgib põhja-, 90° ida-, 180° lõuna- ja 270° läänesuunda. Eesti kliimas tõuseb tuule kiirus harva üle 10 m/s ning jääb enamasti alla 5 m/s. Valdavateks tuule suundadeks on edela- ja põhjasuund. Jooniselt 11 on näha, et kui õhurõhk jälgib suvel samu sagedustrende kui kogu aasta vältel, siis õhuniiskus on suvekuudel võrreldes kogu aastaga kõrgem.





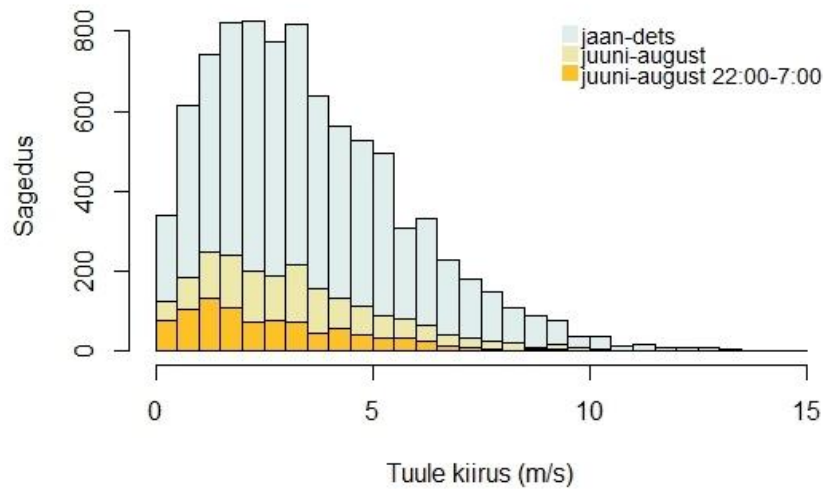
Joonis 7. Vasakpoolsel ülemisel graafikul on kujutatud kogu aasta temperatuuri jaotust kuude lõikes ning parempoolsel ülemisel graafikul öise temperatuuri (22:00–7:00) jaotust kuude lõikes. Vasakpoolsel alumisel graafikul on kujutatud kogu aasta temperatuuri ööpäevane käik ning parempoolsel alumisel graafikul temperatuuri ööpäevane käik ajavahemikul juuni kuni august. Horisontaaljoontega on kujutatud temperatuuride keskvärtust vastavatel ajaperioodidel. Värviliste ristkülikutega on kujutatud kvartiilhaare, paksu horisontaaljoonega mediaanvärtus ning katkendjoon ühendab maksimaalset ja minimaalset väärtust.

Standardaasta TMY2 õhutemperatuuri sagedusgraafik



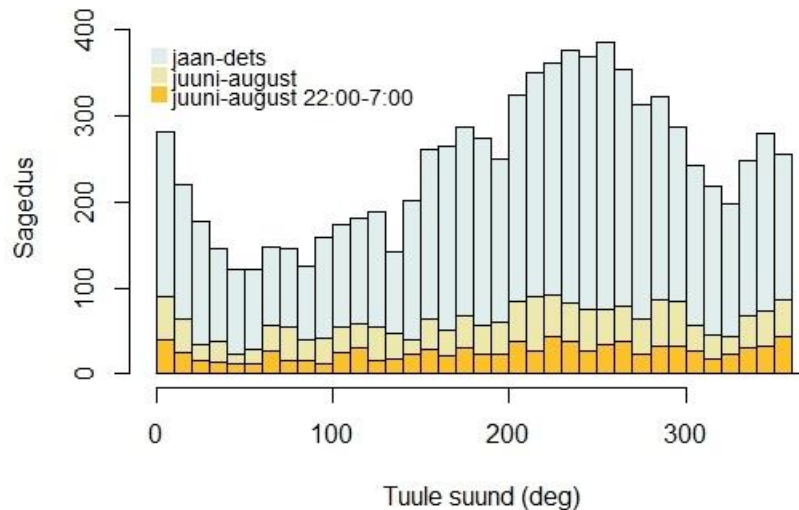
Joonis 8. TMY2 standardaasta õhutemperatuuri tunniandmete sagedusgraafik, kus helesinisega on tähistatud kogu aasta andmed, helekollasega andmed juuni algusest augusti lõpuni ja oranžiga andmed ajavahemikus 22:00–7:00 juuni kuni august.

Standardaasta TMY2 tuule kiiruse sagedusgraafik

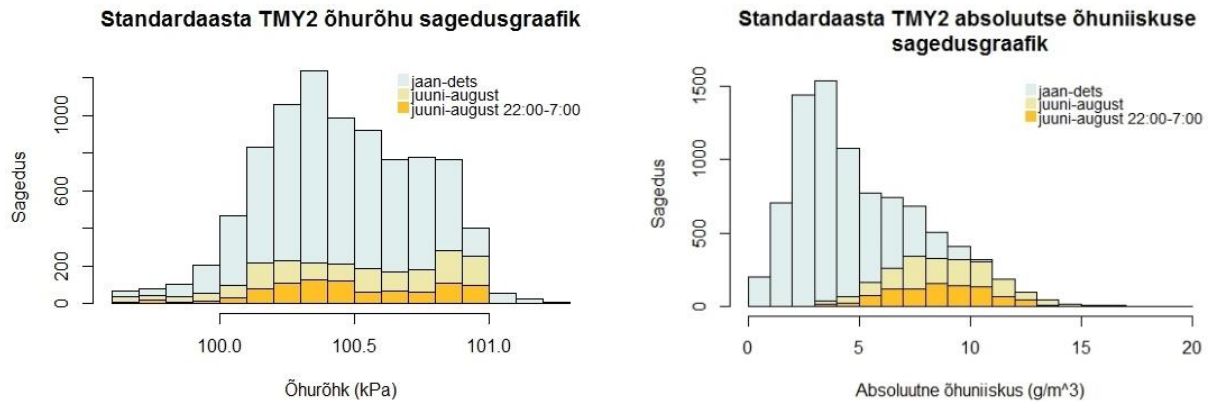


Joonis 9. TMY2 standardaasta tuule kiiruse tunniandmete sagedusgraafik, kus helesinisega on tähistatud kogu aasta andmed, helekollasega andmed juuni algusest augusti lõpuni ja oranžiga andmed ajavahemikus 22:00–7:00 juuni kuni august.

Standardaasta TMY2 tuule suuna sagedusgraafik



Joonis 10. TMY2 standardaasta tuule suuna tunniandmete sagedusgraafik, kus helesinisega on tähistatud kogu aasta andmed, helekollasega andmed juuni algusest augusti lõpuni ja oranžiga andmed ajavahemikus 22:00–7:00 juuni kuni august. 0° märgib põhjasuunda.



Joonis 11. TMY2 standardaasta õhurõhu ja absoluutse õhuniiskuse tunniandmete sagedusgraafikud, kus helesinisega on tähistatud kogu aasta andmed, helekollasega andmed juuni algusest augusti lõpuni ja oranžiga andmed ajavahemikus 22:00–7:00 juuni kuni august.

Loomuliku õise ventilatsiooni uurimiseks Eesti kliima kontekstis valiti ajavahemik juuni kuni august, kuivõrd need on kolm kõrgeima õhutemperatuuriga kuud aastas, mis tähendab ka kõige suuremat jahutusvajadust. Loomuliku õise ventilatsiooni tehnika kasutamiseks ei tohi õised õhutemperatuurid liiga madalale langeda, sest see võib omakorda tuua kaasa küttevajaduse tekke liigse jahutuse tõttu. Ööpäevases tsüklis uuriti perioodi 22:00–7:00, mil õhutemperatuurid on ööpäeva lõikes enamasti kõige madalamad.

Lisas 4 on toodud õhutemperatuuri, tuule kiiruse ja suuna, õhurõhu ja absoluutse õhuniiskuse sagedusgraafikud eraldi juuni, juuli ja augusti jaoks nii kogu ööpäeva kui ka valitud õise perioodi 22:00–7:00 jaoks.

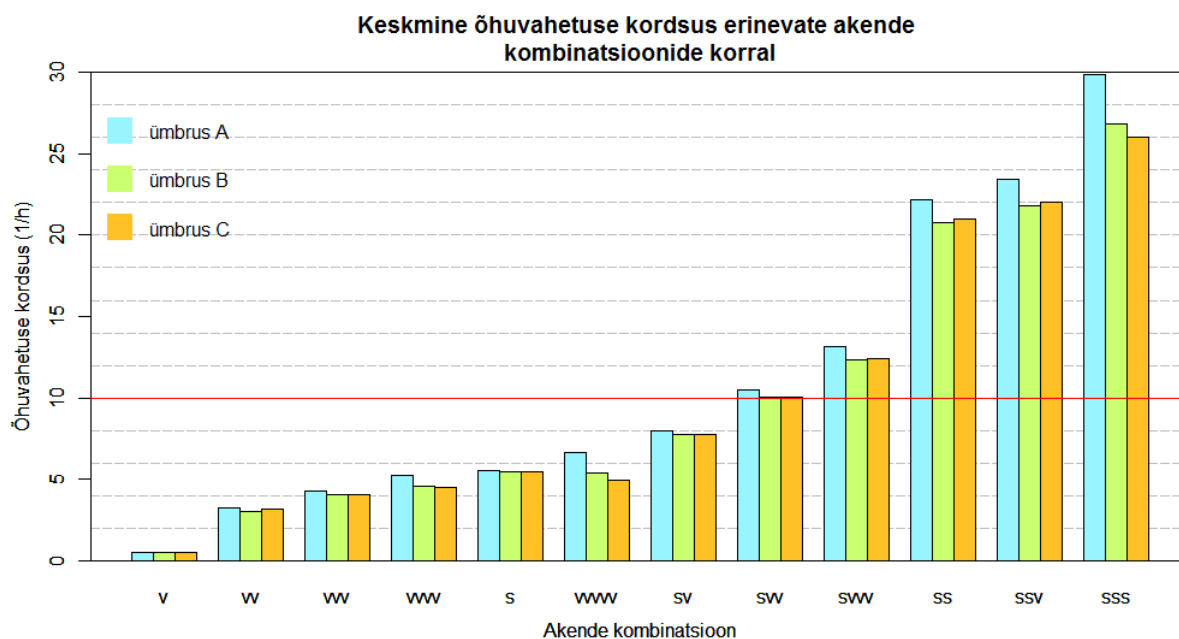
Töös kasutatud andmete töötlemiseks, analüüsiks ning visualiseerimiseks kasutati andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel 2013 ning statistikaprogrammi R 3.1.2.

3 Tulemused ja analüüs

3.1 Akende avatuse ja paigutuse mõju loomulikule öisele ventilatsioonile

3.1.1 Avatud akende kombinatsioon

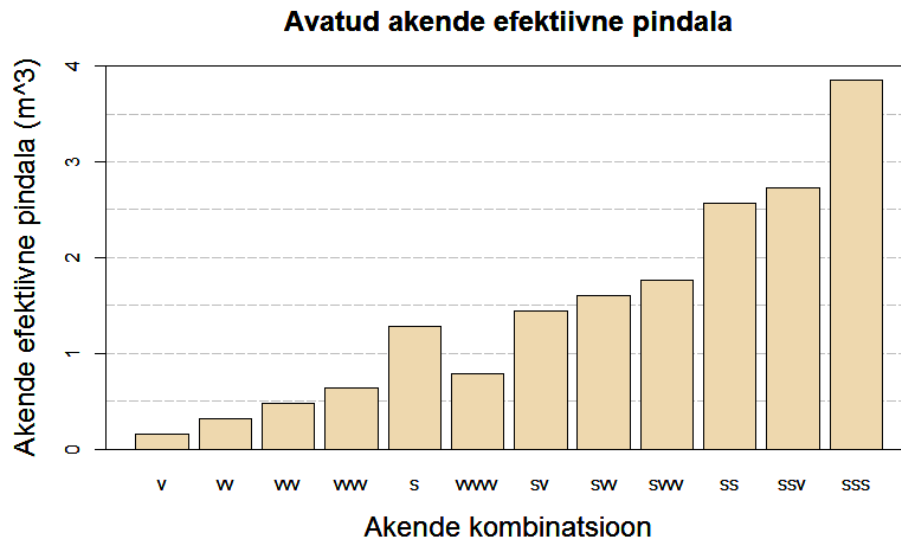
Töös simuleeriti 60 erinevat akende avatuse kombinatsiooni kolme erineva ümbruse kontekstis. Variandid jaotati avatud suurte ja väikeste akende arvu järgi 12 kategooriasse: v , vv , vvv , $vvvv$, s , $vvvvv$, sv , svv , $svvv$, ss , ssv , sss , kus s tähistab ühte avatud suurt akent ning v tähistab ühte avatud väikest akent (joonis 4). Kõikide akende avatuse kombinatsioonide korral leiti õhuvahetuse kordsus iga tunni jaoks ajavahemikus 22:00–7:00 perioodil juuni kuni august. Seejärel arvutati iga akende avatuse kombinatsiooni tulemuste keskmine õhuvahetuse kordsus. Iga 12 akende kombinatsiooni kategooria variantide keskmistest õhuvahetuse kordsuse tulemustest leiti maksimaalne ning tulemused kanti graafikule, mis on toodud joonisel 12. Kõikide simulatsioonide koondtulemused on toodud lisas 5.



Joonis 12. Keskmine õhuvahetuse kordsus 12 akende avatuse kategooria ja kolme ümbruse jaoks (A – avatud ala, B – äärelinn, C – linn). Tähed s ja v tähistavad vastavalt ühte avatud suurt ja väikest akent. Iga kategooria erinevatest akende avatuse variantidest on graafikul toodud kõrgeima keskmise õhuvahetuse kordsusega variant. Punase horisontaaljoonega on tähistatud loomuliku öise ventilatsiooni jahutavaks toimeks vajalik keskmine õhuvahetuse kordsus 10 h^{-1} .

Avatud akende kombinatsioonid, mille korral keskmine õhuvahetuse kordsus uuritud perioodil on vähemalt $10 h^{-1}$, loeti sobivaks jahutusvajaduse alandamise eesmärgil läbiviidava loomuliku öise ventilatsiooni jaoks. Akende avatuse variantide loomulikuks öiseks ventilatsiooniks sobivuse hindamise kriteerium $10 h^{-1}$ valiti varasemate uurimuste põhjal [31-33].

Joonisel 12 toodud graafikult on näha, et väikeste akende avamisega vajalikku õhuvahetuse kordsuse taset saavutada ei ole võimalik. Ventilatsioonihulga $10 h^{-1}$ saavutamiseks peab avatud olema vähemalt üks suur aken ning kaks väikest akent (akende efektiivne pindala $1,6 m^2$ ning kogupindala $4,3 m^2$) või vähemalt kaks suurt akent. Joonisel 13 on toodud avatud akende efektiivne pindala 12 akende avatuse kategooria jaoks. Efektiivse pindala leidmise valem ning selgitus on toodud alapeatükis 2.2.2. Võib täheldada, et õhuvahetuse kordsus kasvab ühe erandiga avatud akende summaarse efektiivse pindala suurenedes.

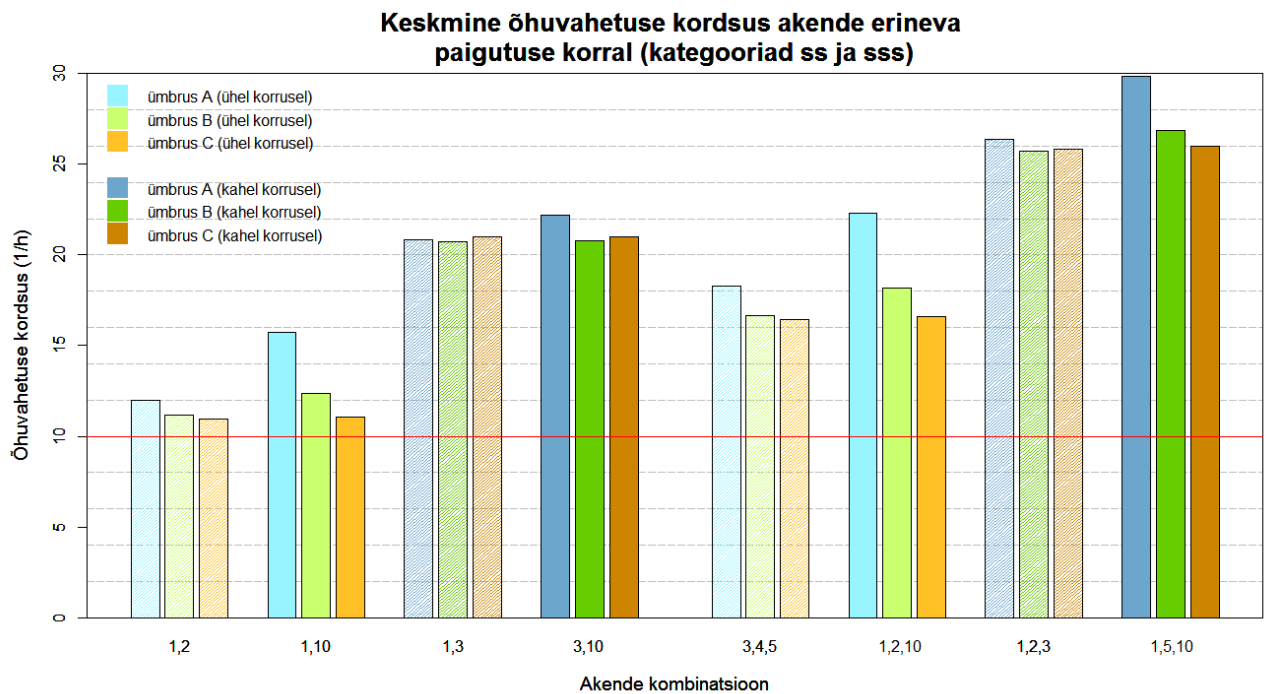


Joonis 13. Akende summaarne efektiivne pindala 12 akende avatuse kategooria jaoks.

Edaspidi vaadeldakse töös vaid akende avatuse kategooriaid svv, svvv, ss, ssv ja sss, mille korral keskmine õhuvahetuse kordsus ületab vajaliku $10 h^{-1}$ piiri.

3.1.2 Akende paiknemine üksteise suhtes

Alapeatükis 3.1.1 selgus, et ventilatsioonihulk ei sõltu ainult avatud akende summaarsest pindalast. Käesolevas alapeatükis võrreldakse akende avatuse variante, mille korral avatud akende summaarne pindala on võrdne, kuid paiknemine üksteise suhtes erinev. Joonisel 14 on kategooriate *ss* ja *sss* jaoks toodud keskmine õhuvahetuse kordsus nelja erineva akende paiknemise kombinatsiooni korral. Heledate toonidega on tähistatud variante, kus avatud aknad asuvad samal korrusel ning tumedate toonidega variante, kus avatud aknad asuvad mõlemal korrusel. Poolläbipaistvad tulpad esindavad ühepoolse ventilatsiooni olukordi, mitteläbipaistvad tulpad ristventilatsiooni olukordi.



Joonis 14. Keskmise õhuvahetuse kordsuse graafik avatud akende erineva paigutuse korral kategooriate *ss* ja *sss* jaoks (avatud vastavalt kaks või kolm suurt akent). Heledate toonidega on tähistatud akende kombinatsioonid, kus avatud aknad asuvad ühel korrusel, tumedaga kombinatsioonid, kus aknad asuvad kahel korrusel. Poolläbipaistvate tulpadega on esitatud ühepoolse ventilatsiooni olukorrad ning mitteläbipaistvate tulpadega ristventilatsiooni olukorrad.

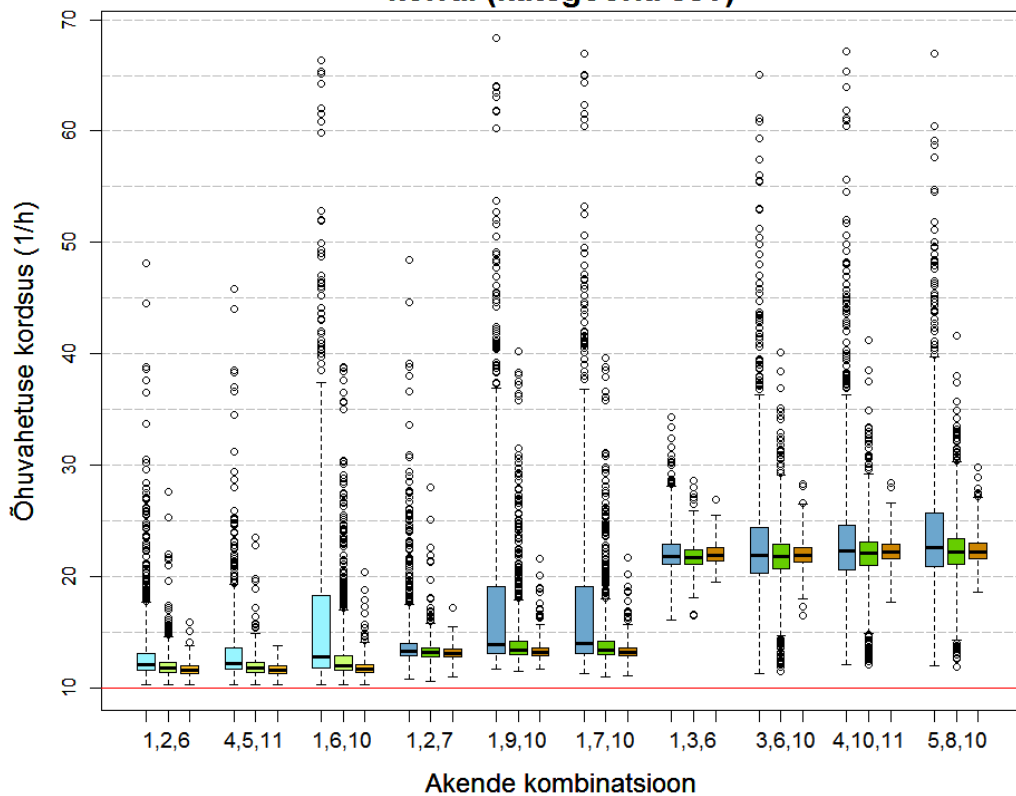
Graafikult selgub, et akende omavahelise paiknemise puhul mõjutab ventilatsioonihulka enim akende vaheline kõrgus: variantidel, kus aknad on avatud mõlemal korrusel, on keskmine õhuvahetuse kordsus ligi 10 h^{-1} võrra ehk kuni ligi 50% suurem kui variantidel, kus avatud

aknad asuvad samal korrusel. Tendentsi selgitab asjaolu, et üleslükkejõu mõjul toimiva ventilatsiooni hulk suureneb sisse- ja väljavoolu avade vahelise kõrguse kasvades. Ümbruse A (avatud ala) korral joonistuvad välja ka selged erinevused ventilatsioonihulgas ühepoolse ja ristventilatsiooni vahel, mis ulatuvad ligi $2 - 4 h^{-1}$ ehk kuni ligi 25%. Ümbruse B (äärelinn) korral on erinevused juba väiksemad, ligi $0 - 2 h^{-1}$, ning ümbruse C (linn) korral erinevusi ühepoolse ja ristventilatsiooni vahel praktiliselt ei esine. Kuivõrd A, B ja C variante eristavad vaid tuule rõhukoefitsientide väärtused ning tuule mõjul toimiv ventilatsioon on efektiivsem ristventilatsiooni olukorras, võib järeldada, et ristventilatsiooni eelis ühepoolse ventilatsiooni ees on esilekerkiv vaid hõreda hoonestusega ümbruses suuremate tuulekiiruste korral. Seega on hoonete projekteerimisel oluline luua võimalus akende avamiseks mõlemal korrusel. Samas ei paranda võimalus avada aknaid hoone erinevatel külgedel oluliselt loomuliku ventilatsiooni mõju hoone jahutamiseks ning on eeliseks vaid avatud aladel paiknevate elamute korral.

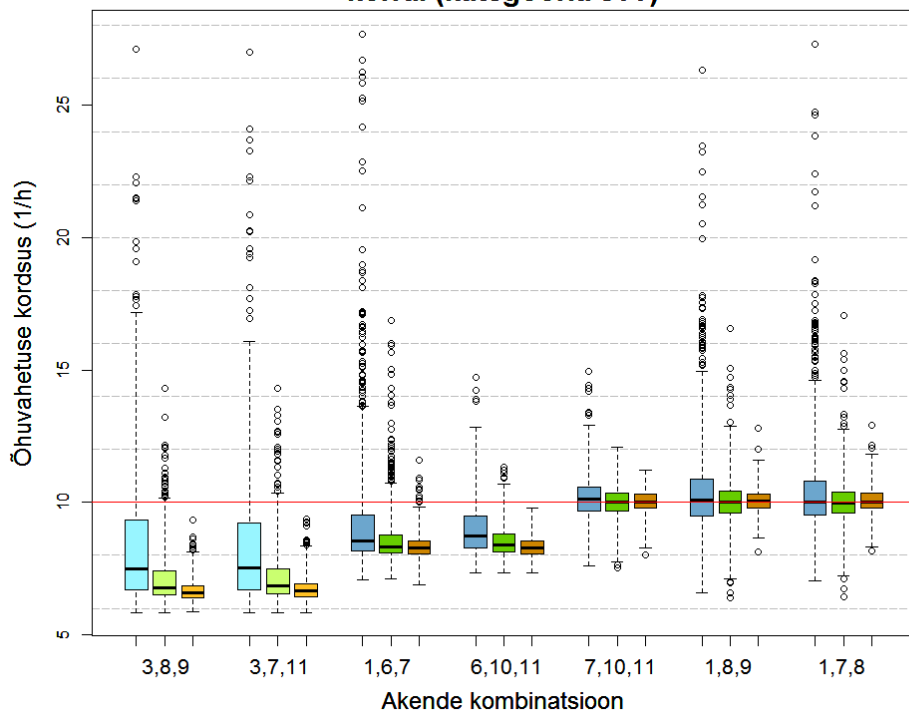
Järgnevalt vaadeldakse ventilatsioonihulkade mediaanväärtusi ja kvartiilhaaret akende avatuse kategooriate *ssv*, *svv* ja *svvv* korral, et tuvastada, kuidas akende paiknemine üksteise suhtes veel ventilatsioonihulka mõjutab. Joonisel 15 on toodud karpdiagrammid kategooriate *ssv*, *svv* ja *svvv* jaoks. Igal graafikul on esitatud vastava kategooria kõikide simuleeritud variantide tulemused ajavahemikus 22:00–7:00 perioodil juuni kuni august. Mustad horisontaaljooned tähistavad mediaanväärtuseid, värvilised kastid kvartiilhaaret, vertikaalsed katkendjooned ulatust 5-protsentiilist 95-protsentiilini ning mustad täpid erindeid.

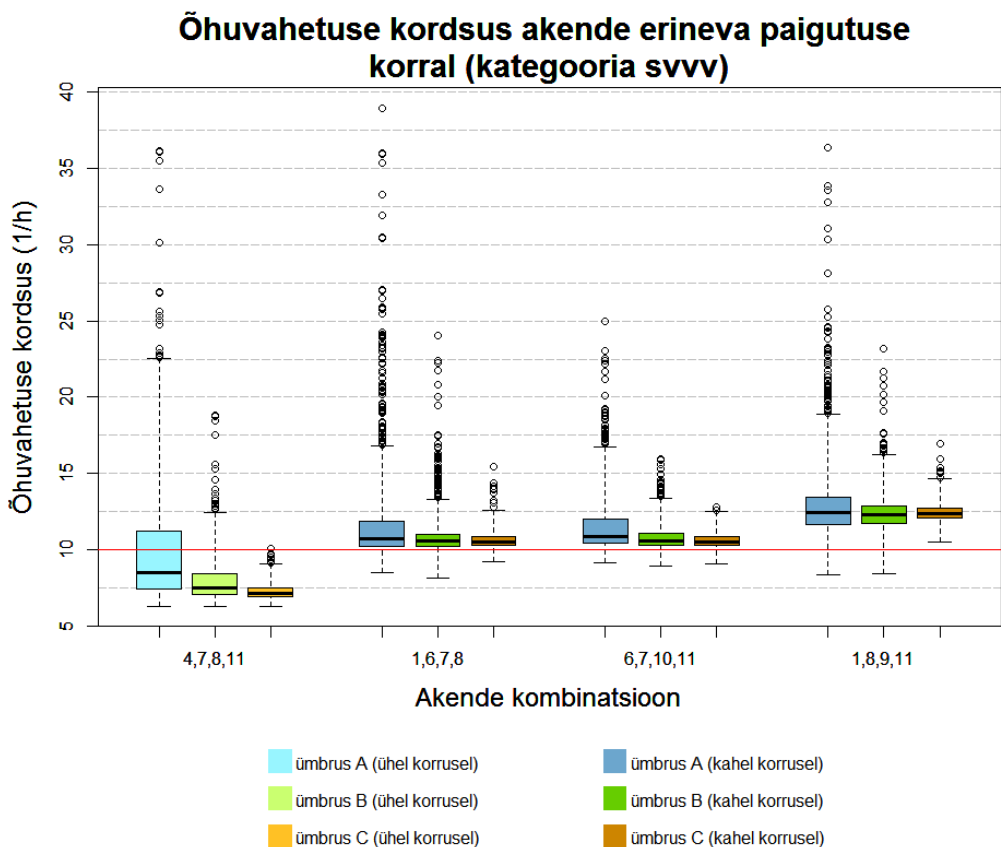
Kõigi kolme kategooria puhul joonistub taas välja, et ventilatsioonihulk on suurem juhul, kui avatud aknad asuvad kahel korrusel. Samuti võib täheldada, et ümbruse A korral on õhuvahetuse kordsuse mediaanväärtus keskmiselt veidi kõrgem (kuni $1 h^{-1}$) kui ümbruste B ja C korral ning ümbruse C puhul on mediaanväärtused kolmest madalaimad. Ümbriseva hoonestuse tiheduse mõju, mida käesolevas töös avaldati tuule rõhukoefitsientide kaudu, on veelgi suurem ventilatsioonihulga maksimaalsele väärtusele. Sama avatud akende kombinatsiooni korral ulatub erinevus õhuvahetuse kordsuses ümbruste A ja C korral ligi $4 h^{-1}$ (variandid *svv*: (6,10,11) ja (7,10,11)) kuni $46 h^{-1}$ (variant *ssv*: (1,9,10)). Saab järeldada, et ümbruse hoonestustiheduse mõju õhuvahetuse kordsuse mediaanväärtusele ei ole märkimisväärne, kuid avatud alal asuva hoone puhul on ventilatsioonihulkade maksimaalväärtused oluliselt kõrgemad kui linnaümbruses asuvatel hoonel.

Õhuvahetuse kordsus akende erineva paigutuse korral (kategooria ssv)



Õhuvahetuse kordsus akende erineva paigutuse korral (kategooria svv)





Joonis 15. Õhuvahetuse kordsuse karpdiagrammid avatud akende erineva paigutuse korral kategooriate ssv, svv ja svvv jaoks. Mustad horisontaaljooned tähistavad mediaanväärtust, värvilised kastid kvartiilhaaret, vertikaalsed katkendjooned ulatuvad 5-protsentiilist 95-protsentiilini ning mustade täppidega on tähistatud erindid. x-teljel on toodud avatud akende numbrid.

Viidates joonisele 9 alapeatükis 2.4, mis kujutab simulatsioonides kliimaandmestikuna kasutatud standardaasta TMY2 tuule kiiruse sagedusgraafikut, võib ümbruse hoonestustiheduse madalat mõju ventilatsioonihulga mediaanväärtusele põhjendada asjaoluga, et Eesti kliimas jäävad tuule kiirused enamasti alla 5 m/s. Seetõttu ei ole valdaval osal uuritud ajaperioodist hoone avatus tuulele peamiseks õhuvahetuse kordsust mõjutavaks teguriks.

Esimesel graafikul joonisel 15 on kujutatud õhuvahetuse kordsuse väärtuseid kümne erineva akende kombinatsiooni jaoks, kus avatud on kaks suurt ja üks väike aken. Ventilatsioonihulga mediaanväärtused on kõrgeimad neljal juhul: (1,3,6), (3,6,10), (4,10,11) ja (5,8,10), kus kaks avatud suurt akent asuvad erinevatel korrustel. Seega ei ole kõrgema õhuvahetuse kordsuse tagamiseks oluline ainult akende avamine mõlemal korrusel, vaid ka erinevatel korrustel

avatud akende pindalade suhe. Kõrgema ventilatsioonihulga saavutamiseks peaksid erinevatel korrustel avatud akende efektiivsed pindalad olema ligikaudu võrdsed. Variantidel (1,2,6), (4,5,11), (1,2,7) ja (1,3,6) on õhuvahetuse kordsuse maksimaalväärtused teistest märkimisväärselt madalamad – trend joonistub eriti ilmekalt välja just ümbruse A korral, kus hoonestustihedus on madalaim ja tuule mõju kerkib esile. Põhjuseks võib olla asjaolu, et nende akende kombinatsioonide korral asuvad mõlemad avatud suured aknad hoone samal küljel ning ühepoolne ventilatsioon domineerib ristventilatsiooni üle. Niisiis tuleks selleks, et kiirema tuule korral ventilatsioonihulk oluliselt kasvaks, paigutada avatud aknapinnad võimalikult võrdselt erinevatele hoone külgedele.

Teisel graafikul joonisel 15 selgub, et variantidel (1,6,7) ja (6,10,11) on õhuvahetuse kordsuse mediaanväärtused madalamad kui variantidel (7,10,11), (1,8,9) ja (1,7,8), kuigi kõigi viie kombinatsiooni korral on aknad avatud mõlemal korrusel. Erinevus seisneb selles, et kahe esimese variandi puhul on esimesel korrusel avatud üks suur ja üks väike aken, teisel korrusel vaid üks väike aken. Kolme viimase variandi puhul on alumisel korrusel avatud üks suur aken ning ülemisel korrusel kaks väikest akent. Taaskord selgub, et ventilatsioonihulk suureneb kui avatud akende pindala on korruste vahel võrdselt jaotunud. Seitsmest *svv* kategooria variandist on (6,10,11) ja (7,10,11) puhul maksimaalsed ventilatsioonihulgad teiste sama kategooria kombinatsioonidega võrreldes selgelt madalamad, mida võib ka siinkohal põhjustada asjaolu, et hoone ühel küljel on avatud üks suur ja üks väike aken ning hoone vastasküljel vaid üks väike aken. Seega võib taaskord nentida, et ristventilatsiooni korral on soodsam paigutada avatud aknapind võrdselt elamu erinevate külgede vahel.

Viimasel graafikul joonisel 15, kus on kujutatud simulatsioonitulemused kategooria *svvv* nelja variandi jaoks, joonistuvad välja sarnased trendid, mis kahe eelneva kategooria tulemuste graafikutelt. Kombinatsiooni (1,8,9,11) mediaanväärtus on kõrgeim, sest avatud akende pindala on kahe korruse vahel jaotunud proportsionaalselt: esimesel korrusel üks suur ning teisel korrusel kaks väikest akent. Samuti on ventilatsioonihulkade maksimaalsed väärtused kõrgemad siis, kui avatud aknad asuvad hoone kolmel või neljal küljel (variandid (4,7,8,11), (1,6,7,8) ja (1,8,9,11)), mis loob soodsamad tingimused ristventilatsiooni jaoks erinevate tuule suundade korral.

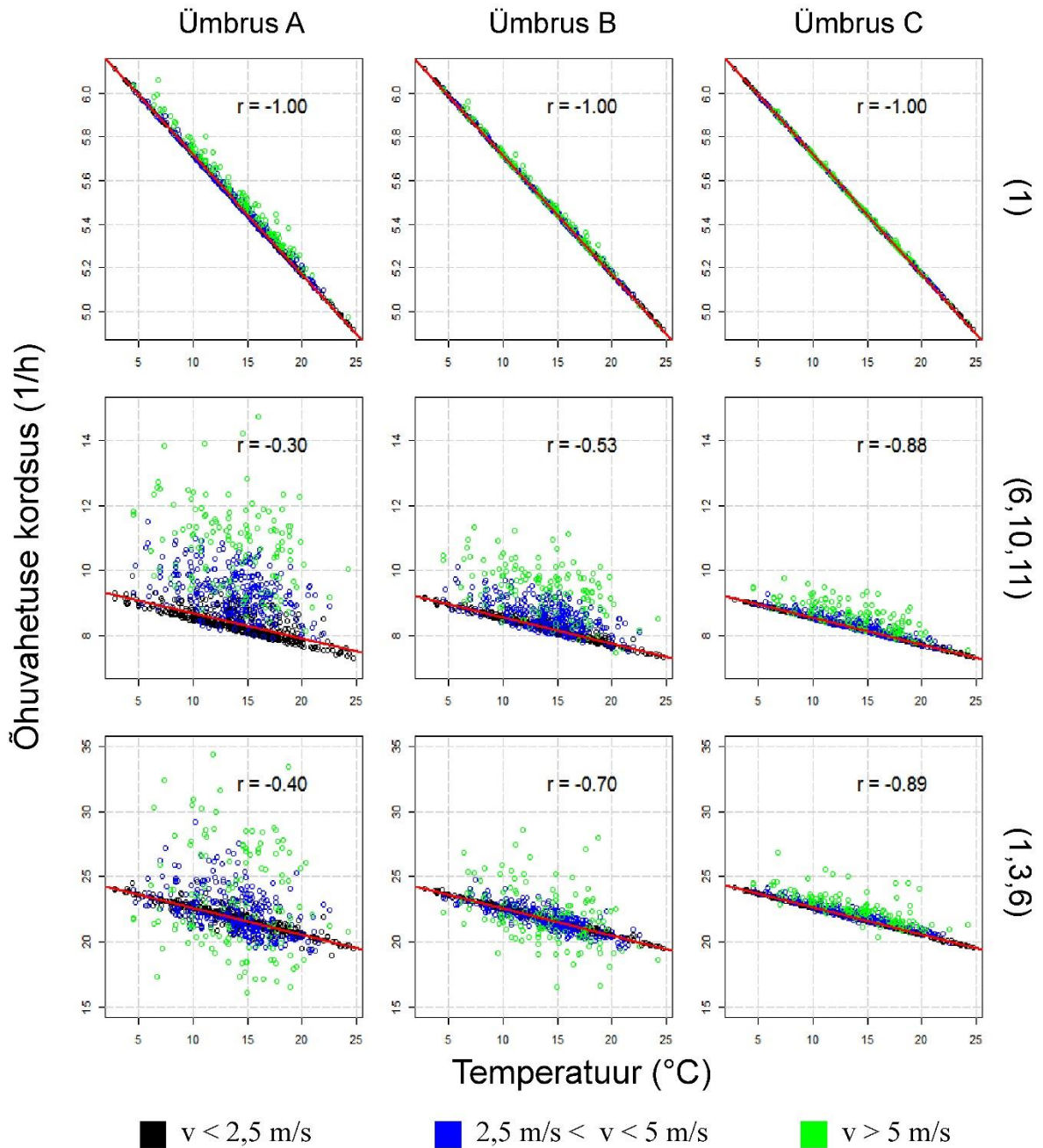
Ka varasemad uuringud kinnitavad, et ventilatsioonihulk on suurem, kui sisse- ja väljavoolu avade pindalade suhe on üks või veidi suurem. [46-47] Käesolevas katses võib sisse- ja väljavoolu avadeks jagada vastavalt esimese ja teise korruse avatud aknad või erinevatel hoone külgedel asuvad aknad sõltuvalt tuule suunast.

3.2 Kliimaparametrite mõju loomulikule öisele ventilatsioonile

3.2.1 Temperatuur

Käesolevas alapeatükis analüüsitakse välisõhu temperatuuri mõju ventilatsioonihulgale erinevate akende avatuse kombinatsioonide korral. Kolme kombinatsiooni: *s*: (1), *svv*: (6,10,11) ja *ssv*: (1,3,6) simulatsioonitulemuste jaoks kolmes erinevas ümbruses koostati hajuvusgraafik ning leiti korrelatsioonikordaja välisõhu temperatuuri ja õhuvahetuse kordsuse vahel. Tulemused on toodud joonisel 16. Erinevate värvidega on märgitud ventilatsioonihulga väärtused erinevate tuule kiiruse vahemikkude korral. Kombinatsiooni (1) puhul, kus avatud on üks suur aken ehk toimub ühepoolne ventilatsioon, võib täheldada, et korrelatsioon õhuvahetuse kordsuse ja temperatuuri vahel on tugev: temperatuuri kasvades väheneb õhuvahetuse kordsus lineaarselt. Akende kombinatsioonide (6,10,11) ja (1,3,6) korral väheneb ventilatsioonihulk temperatuuri kasvades samuti lineaarselt, kuid avatud alal (ümbrus A) suuremate tuule kiiruste korral ei ole temperatuuri mõju enam määrav ning korrelatsioon õhuvahetuse kordsuse ja temperatuuri vahel on nõrk. Seda illustreerivad joonisel 16 teise ja kolmanda rea graafikutel rohelised ja osaliselt ka sinised punktid, mis tähistavad simulatsioonitulemusi, millede korral tuule kiirus on vastavalt $v > 5 \text{ m/s}$, ja $2,5 \text{ m/s} < v < 5 \text{ m/s}$. Ümbruses C, kus ümbritsev hoonestus on kõige tihedam, on ka suuremate tuule kiiruste korral korrelatsioon temperatuuri ja õhuvahetuse kordsuse vahel tugev. Seega vastavad simulatsioonitulemused varasemate uuringute tulemustele: mida suurem on temperatuurigradient sise- ja välisõhu vahel, seda suurem on ventilatsioonihulk [17]. Samas domineerib avatud aladel suurte tuule kiiruste korral tuule mõju temperatuuri üle, millest võib järeldada, et nendes tingimustes on tuule mõjul toimiv ventilatsioon valdav võrreldes üleslükkejõul toimiva ventilatsiooniga.

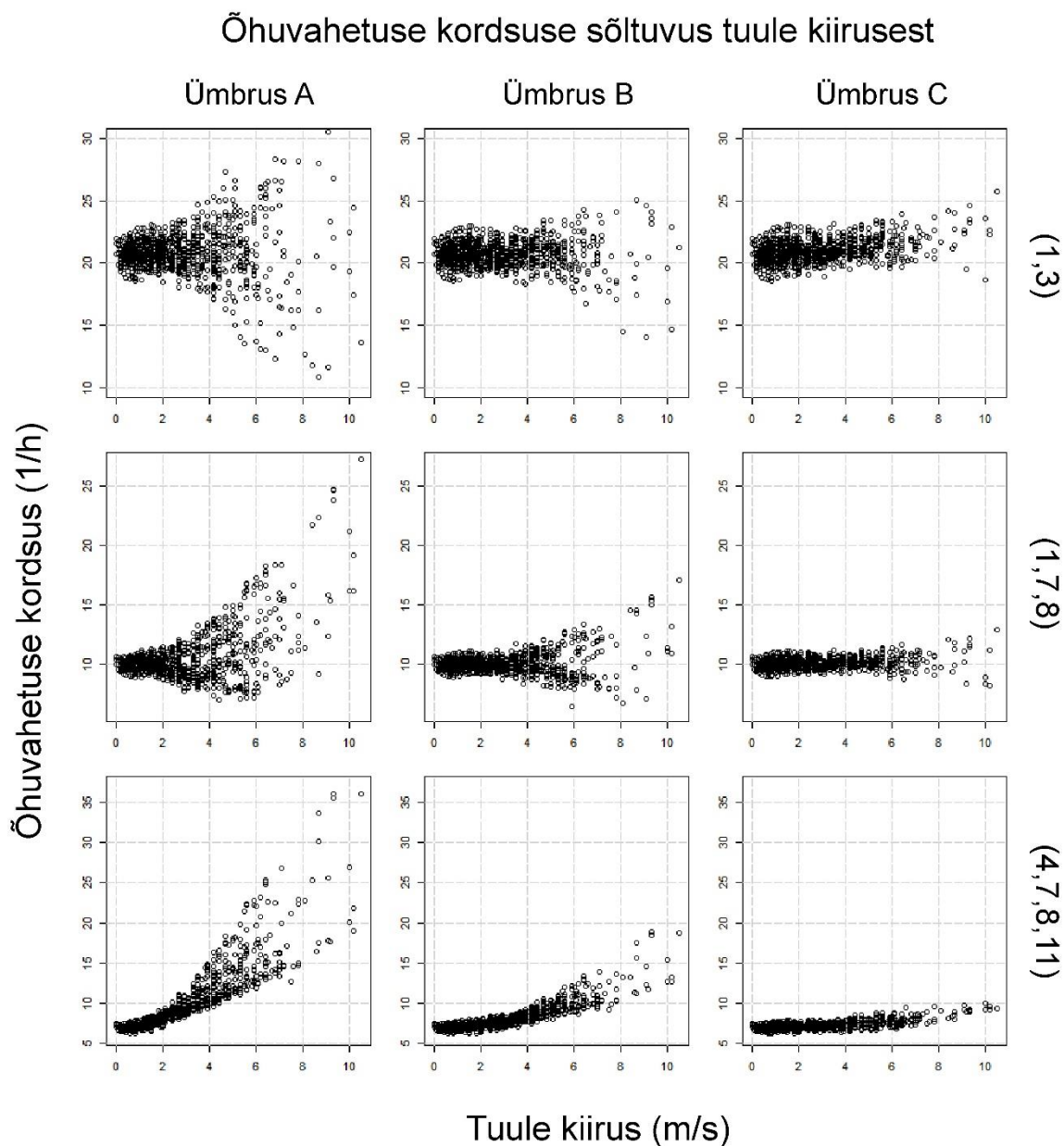
Õhuvahetuse kordsuse sõltuvus välisõhu temperatuurist



Joonis 16. Õhuvahetuse kordsuse sõltuvus välistemperatuurist kolme akende avatuse variandi jaoks (märgitud joonise paremal küljel) kolme ümbruse korral (märgitud graafikute kohal). Erinevate värvidega on tähistatud simulatsioonitulemused, mis vastavad erinevatele tuule kiirustele. Graafikutele on märgitud korrelatsioonikoefitsient r ning punase joonega regressioonsirge.

3.2.2 Tuule kiirus

Joonisel 17 on toodud õhuvahetuse kordsuse ja tuule kiiruse hajuvusgraafikud kolme erineva akende avatuse kombinatsiooni jaoks kolmes käsitletud ümbruses.



Joonis 17. Õhuvahetuse kordsuse sõltuvus tuule kiirusest kolme akende avatuse variandi jaoks (märgitud joonise paremal küljel) kolme ümbruse korral (märgitud graafikute kohal).

Nagu selgus ka alapeatükis 3.1.2, varieerub ventilatsioonihulk tihedama hoonestusega ümbruse korral oluliselt vähem kui avatud alal, näiteks ligi 7,5 korda variandi (4,7,8,11) korral. Põhjuseks on tuule suurem mõju väiksema hoonestustihedusega aladel, sest tuule teele jääb ette vähem takistusi ning tuule rõhk hoonefassaadidel on suuremate tuule kiiruste korral suhteliselt kõrgem. Graafikutelt joonisel 17 on näha, et iga ümbruse jaoks eksisteerib ligikaudu selline tuule kiirus, millest kõrgematel tuule kiirustel tulemuste hajuvus hüppeliselt kasvab. Avatud ala, äärelinna ja linna ümbruse jaoks on need ligikaudsed väärtused vastavalt 3 m/s, 5 m/s ja 8 m/s.

Akende avatuse kombinatsiooni *ss*: (1,3) korral, mil avatud on üks suur aken alumisel ning üks ülemisel korrusel hoone samal küljel, võib tuule kiiruse kasv ventilatsioonihulka nii kasvatada kui ka kahandada, mida illustreerib esimene graafikute rida joonisel 17. Ventilatsioonihulga muutuse erinevad trendid tuule kiiruse kasvades ilmnevad tõenäoliselt tuule erineva suuna korral: kui aknad on avatud hoone tuulealusel küljel, väheneb ventilatsioonihulk tuule kiiruse kasvades. Tuule kiiruse kasvu varieeruv mõju õhuvahetuse kordsusele tuleb nõrgemalt esile ka akende avatuse variandi *svv*: (1,7,8) korral, mil avatud on üks suur aken esimese korruse lõunaküljel ning üks väike aken teise korruse ida- ja põhjaküljel. Võib eeldada, et ventilatsioonihulk väheneb kindlate tuule suundade korral, mil kõigil avatud akendel tekib negatiivne tuule rõhk. Akende avatuse kombinatsiooni *svvv*: (4,7,8,11) korral, kus igal hoone küljel on avatud üks aken, on tuule kiiruse ja õhuvahetuse kordsuse vahel selge positiivne korrelatsioon. Tulemustest selgunud seaduspärad vastavad varasematele uuringutele, mis käsitlevad tuule ja üleslükkejõu mõjul toimivate ventilatsiooniefektide vastumõju ühepoolse ventilatsiooni korral, mida on täpsemalt kirjeldatud alapeatükis 1.2.2.

Saadud simulatsioonitulemuste ja nende analüüsi põhjal võib järeldada, et COMIS 3.2 ja CpCalc+ on sobivad tarkvarapaketid hoone loomulikku ventilatsiooni mõjutavate tegurite leidmiseks ning nende mõju suhtelise ulatuse hindamiseks. Selgunud tendentsid vastavad varasemates uuringutes leitud seaduspäradele.

Kokkuvõte

2020. aastaks peavad Euroopa Liidus kõik uuna ehitatavad hooned olema liginullenergiahooned, mis toodavad kogu neis kuluva energia ise või oma vahetus läheduses. Karmistuvate nõuete tõttu on energiatõhus ehitus kiiresti arenev teadusvaldkond, kus otsitakse lahendusi hoonete energiatarbe vähendamiseks. Jahutuseks kuluva energia alandamiseks on parasvöötme kliimas võimalik suveperioodil rakendada loomulikku öist ventilatsiooni, milleks hoonel energiat ei kulu.

Eestis ei ole seni hoone energiatõhususe analüüsimisel viidud läbi arvutusi ehitise loomuliku ventilatsiooni efektiivsuse leidmiseks ning seda mõjutavate tegurite analüüsimiseks. Käesoleva töö eesmärgiks oli leida hoone loomulikku öist ventilatsiooni mõjutavad tegurid Eesti kliimas ning anda tulemuste põhjal soovitusi arhitektidele loomuliku öise ventilatsiooni potentsiaali maksimaalseks realiseerimiseks elamu projekteerimisfaasis. Lisaks seati eesmärgiks anda projekteerijatele juhiseid mitme tsooni õhuvahetuse mudeli kasutamiseks ventilatsioonipotentsiaali hindamisel.

Töös kirjeldati mitme tsooni õhuvahetuse mudelit ning selleks kasutatud tarkvara COMIS 3.2. Uurimisküsimustele vastamiseks loodi kahekordse elamahoone mitme tsooni õhuvahetuse mudel, mille abil modelleeriti 60 erinevat akende avatuse kombinatsiooni kolmes erinevas ümbruses: linn, äärelinn ja avatud ala. Ümbruse varieerimine viidi läbi tuule rõhukoefitsiente muutes. Kliimaandmestikuna kasutati Tartu-Tõravere mõõteandmete põhjal koostatud TMY2 standardaastat.

Tulemuste põhjal analüüsiti avatud akende efektiivse pindala, akende omavahelise paiknemise, ümbruse hoonestustiheduse, välistemperatuuri ja tuule kiiruse mõju loomulikule öisele ventilatsioonile. Leiti, et kahekordses elamuhooones ei piisa loomuliku öise ventilatsiooni jahutusefekti saavutamiseks vaid ühe akna avamisest. Näiteks mudelhoone korral (mõõtmetega $11,5 \times 7,4 \times 6,5 \text{ m}$) katses fikseeritud kahe akna suuruse puhul, peaks avatud akende efektiivne pindala optimaalse õhuvahetuse kordsuse 10 h^{-1} saavutamiseks olema vähemalt $1,6 \text{ m}^2$ (akende kogupindala $4,3 \text{ m}^2$). Samas ei ole efektiivne pindala ventilatsioonihulka üheselt määravaks teguriks. Akende avamine erinevatel korrustel võib tõsta õhuvahetuse kordsust kuni ligi 50%. Ühtlasi on sealjuures oluline, et avatud akende efektiivne pindala oleks korruste vahel võrdselt jaotunud. Avatud akende paiknemine hoone

erinevatel külgedel suurendab ventilatsioonihulka võrreldes olukorraga, kus avatud aknad paiknevad elamu samal küljel, kuni ligi 25%, kuid seda vaid suuremate tuule kiiruste korral juhul, kui ehitised asub hõreda hoonestustihedusega avatud alal. Seejuures peab ka silmas pidama, et avatud akende efektiivne pindala oleks hoone ristuvate või vastaskülgede vahel võrdselt jaotunud. Linnaümbruses ei suurenda akende avamine hoone erinevatel külgedel õhuvahetuse kordsust olulisel määral.

Selgus, et üldiselt langeb ventilatsioonihulk välisõhu temperatuuri kasvades lineaarselt. Korrelatsioon temperatuuri ja õhuvahetuse kordsuse vahel on tiheda hoonestusega ümbruses ja madalate tuule kiiruste korral ka avatud aladel suur, kuni $r = -1.0$. Tuule suunast ja avatud akende kombinatsioonist sõltuvalt võib tuule kiiruse kasv ventilatsioonihulka nii kasvatada kui kahandada. Ühepoolse ventilatsiooni korral, mil aknad on avatud vaid ühel hoone küljel, võib suuremate tuule kiiruste korral – avatud aladel juba alates 3 m/s – ventilatsioonihulk langeda. Kui aknad on avatud hoone kõikidel külgedel, on tuule kiiruse kasvul õhuvahetuse kordsusele vaid positiivne mõju. Tihedama hoonestusega linnaümbruses varieerub ventilatsioonihulk tuule kiirusest sõltuvalt oluliselt vähem kui avatud aladel, näiteks ligi 7,5 korda, kui aknad on avatud kõigil hoone külgedel.

COMIS 3.2 ja CpCalc+ on võrdlemise lihtsad ja kiired vahendid leidmaks loomuliku ventilatsiooni mõjutegurite, nagu akende avatus ja paigutus üksteise suhtes, ümbruse mõju, kliima mõju, üldiseid trende ja seaduspärasid lihtsustatud geomeetriaga hoonemudelid. Seetõttu soovib autor ehitiste projekteerimisel, mil viiakse läbi simulatsioone ja arvutusi hoone energiatõhususe kindlustamiseks, kasutada ülalmainitud tarkvarapakette, et hinnata ka rajatise sobivust loomulikuks õiseks ventilatsiooniks. Sealjuures tuleb meeles pidada, et COMIS'e mudel on üldistav ning ei ole sobilik tööriist täpsete tulemuste saavutamiseks või detailsete nüansside, nagu akna geomeetria, mõju hindamisel.

Käesolevas töös uuriti õhuvahetuse kordsust loomuliku õise ventilatsiooni korral ning seda mõjutavaid tegureid Eesti kliimas. Loomulikku õist ventilatsiooni mõjutavad lisaks ventilatsioonihulgale veel mitmed hoone parameetrid. Selleks, et hinnata loomuliku õise ventilatsiooni potentsiaali jahutusvajaduse alandamiseks reaalse hoone korral, tuleks mitme tsooni õhuvahetuse mudeli kõrval viia läbi ka energiasimulatsioonid, mis võtavad arvesse ka hoone materjale ning konstruktsiooni.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Tõnu Muring'ut, kes andis alati asjakohast nõu töö koostamiseks ja sisulise osa läbiviimiseks ning aitas hoida fookust olulisel. Aruteludest juhendajaga kasvas alati välja palju uusi suundi ja ideid järgmisteks sammudeks. Tänan Margus Valge't, kes jagas mulle lahkelt andmeid ja kogemusi uuritud mudeli lähtehoone kohta. Samuti olen tänulik kaastudengitele energiatõhusa ehituse tuumiklaborist, kelle hoiak oli alati motiveeriv ja abivalmis. Viimaks soovin tänada ka oma perekonda, kes on mind füüsikaõpingute ja bakalaureusetöö koostamise vältel alati toetanud ning kaasa elanud.

The influencing factors of natural night-ventilation in Estonian climate on the basis of a multizone air-flow model

Anna-Helena Saarso

Summary

40% of energy in the European Union is used in buildings and by 2020 all newly built houses in the EU must be nearly zero-energy buildings producing most of the energy consumed itself. Therefore building physics is an expanding area of science where new energy efficient solutions and techniques are being developed. To reduce the cooling need of houses in temperate climate, the passive cooling technique of natural night-ventilation can be used.

The purpose of ventilation is to clean indoor air from pollutants and cool down the building. In summer in temperate climates, when outdoor air temperatures fall below the indoor temperature, the zero-energy technique of natural night-ventilation can be used to reduce the energy needed for cooling the building. Natural ventilation is operated by opening the windows of a building and is driven by wind and thermal buoyancy.

The most influential decisions determining the energy efficiency of a building are taken in the design phase. However, so far in Estonia, the factors influencing the building's potential for natural night-ventilation have not been analysed and taken into consideration. Therefore, the aim of this thesis was to analyse the influencing factors of natural night-ventilation in Estonian climate and on the basis of the results provide architects with suggestions on how to maximise a building's potential for natural night-ventilation and guidelines on how to conduct such analysis.

In this thesis, the multi zone air-flow network model COMIS 3.2 was used to study the natural night-ventilation of a two-storey dwelling in Estonian climate in three different surroundings: rural, suburban and urban environments. Variation of the surroundings was conducted by altering the wind pressure coefficients acquired from the analytical model CpCalc+. The typical meteorological year TMY2 derived from measurements taken in Tartu-Tõravere weather station was used in the simulations. The studied time-period for ventilation was June

to August from 22:00–7:00. 60 different window opening combinations were studied in order to find the influencing factors of natural night-ventilation.

The impact of the effective opening area and relative positioning of the windows on natural night-ventilation as well as the influence of temperature, wind speed and the surroundings were studied.

The simulation results showed that an optimal air change rate of $10 h^{-1}$ cannot be achieved with opening a single window. In case of a two-storey dwelling measuring $11,5 \times 7,4 \times 6,5 m$ and with two fixed window sizes chosen for the simulations, the effective opening area should be at least $1,6 m^2$ (with a total window area of $4,3 m^2$). However, the results showed that the effective opening area does not define the air change rate uniquely. It was found that opening windows on both stories at the same time can increase the air change rate by up to 50%, while the opening area should be equally divided between the two stories. In addition, the results showed that cross ventilation has an advantage of up to 25% over single-sided ventilation, but the differences only occur in rural areas and greater wind speeds. The increased air change rate due to cross ventilation can only be achieved when the opening area is relatively equally divided between the different facades of the building.

Air change rate was found to have a strong negative correlation with temperature, especially in the case of low wind speeds and urban or suburban areas, where the impact of wind is reduced. Given that windows are not open on all building facades, especially in case of single-sided ventilation, greater wind speeds can either increase or decrease the ventilation rate, depending on the wind direction. In densely built areas, air change rate varies much less with the variation of wind speed.

COMIS 3.2 and CpCalc+ were considered to be relatively easy and effective tools to study the general tendencies influencing natural night-ventilation of a building with simplified geometry, such as the opening of windows and their relative positioning, the impact of the surroundings and climate. Therefore, this study recommends to conduct such analysis of a building's potential for natural night-ventilation in the design phase with the aforementioned tools.

In order to fully assess a building's potential for natural night-ventilation and its cooling effect, in the future, energy simulations could be coupled with multizone air-flow models.

Kasutatud kirjandus

[1] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX_SESSIONID=3qqKJR8KVzf1vT1yxQqfJpvyQ7kmBT6Gpbt8LLtr4twc_pnkfHTPf!-837314370?uri=CELEX:32010L0031 (viimati külastatud 30/04/2015).

[2] Energiatõhususe miinimumnõuded. URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004> (viimati külastatud 30/04/2015).

[3] “Europe’s buildings under the microscope,” Buildings Performance Institute Europe (2011). URL: http://www.europeanclimate.org/documents/LR_%20CbC_study.pdf (viimati külastatud 30/04/2015).

[4] H. R. R. Santos, V. M. S. Leal, „Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context,” Energy Build. 54, 111-121 (2012).

[5] „Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU,” D2.3. of WP2 of the Entranze Project (2014). URL: http://www.entranze.eu/files/downloads/D2_3/Heating_and_cooling_energy_demand_and_loads_for_building_types_in_different_countries_of_the_EU.pdf (viimati külastatud 30/04/2015).

[6] R. Mai, T. Hartmann, „Cooling of residential buildings in Germany – prospect or dead end?,” REHVA Journal 1, 24-29 (2014). URL: http://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2014/RJ_issue_1/P.24/24-29_Cooling_of_residential_buildings_in_Germany_RJ1401_WEB.pdf (viimati külastatud 30/04/2015).

[7] M. Levine, D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, „Residential and commercial buildings,” kogumikus Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter6.pdf> (viimati külastatud 30/04/2015).

- [8] M. A. Kamal, „An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions,“ *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* 55/1, 84-97 (2012). URL: http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2012%281%29_8.pdf (viimati külastatud 30/04/2015).
- [9] „ASHRAE HVAC Fundamentals Handbook,“ ASHRAE, 26.5-26.6 (2001).
- [10] T. Kleiven, „Natural Ventilation in Buildings; Architectural concepts, consequences and possibilities,“ (2003). URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:126224/FULLTEXT01.pdf> (viimati külastatud 30/04/2015).
- [11] A. Walker, „Natural Ventilation,“ *Whole Building Design Guide* (2014). URL: <http://www.wbdg.org/resources/naturalventilation.php> (viimati külastatud 2/05/2015).
- [12] C.-R. Chu, B.-F. Chiang, „Wind-driven cross ventilation in long buildings,“ *Build. Environ.* 80, 150-158 (2014).
- [13] B. Taylor, „Wind pressure distribution around a building,“ (2011). URL: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind_pressure_distribution_around_a_building.png (viimati külastatud 2/05/2015).
- [14] H. E. Feustel, “COMIS – an international multizone air-flow and contaminant transport model,” *Energy Build.* 30/1, 3-18 (1999).
- [15] H. Wang, Q. Chen, „A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings,“ *Energy Build.* 54, 386-394 (2012).
- [16] M. Caciolo, P. Stabat, D. Marchio, „Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects,“ *Energy Build.* 43, 1765-1733 (2011).
- [17] T. S. Larsen, P. K. Heiselberg, „Single-sided Natural Ventilation Driven by a Combination of Wind Pressure and Temperature Difference,“ *kogumikus Proceedings III The 6th international Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings* (2007).

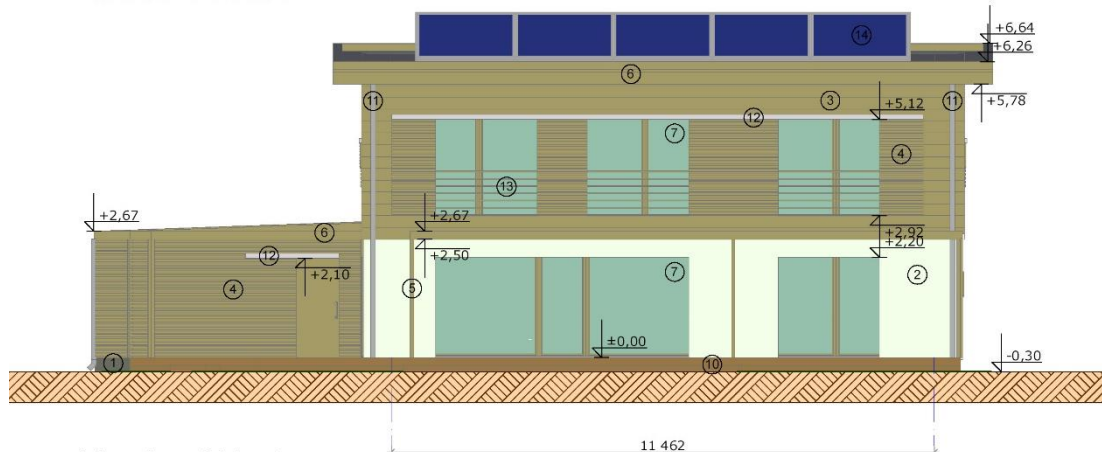
- [18] M. Caciolo, S. Cui, P. Stabat, D. Marchio, „Development of a new correlation for single-sided natural ventilation adapted to leeward conditions,“ *Energy Build.* 60, 372-382 (2013).
- [19] C. Allocca, Q. Chen, L. R. Glicksman, „Design analysis of single-sided natural ventilation,“ *Energy Build.* 35/8, 785-795 (2003).
- [20] C. F. Gao, W. L. Lee, „Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong,“ *Build. Environ.* 46/4, 961–969 (2011).
- [21] H. Shetabivash, „Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation,“ *Energy Build.* 93, 1-15 (2015).
- [22] G. van Moeseke, E. Gratia, S. Reiter, A. De Herde, „Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities,“ *Energy Build.* 37/8, 878-889 (2005).
- [23] S. A. Hsu, E. A. Meindl, D. B. Gilhousen, „Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea,“ *J. Appl. Meteor.* 33, 757-765 (1994).
- [24] Berlin Environmental Atlas. URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed403_01.htm (viimati külastatud 2/05/2015).
- [25] D. Cóstola, B. Blocken, J. L. M. Hensen, „Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs,“ *Build. Environ.* 10, 2027-2036 (2009).
- [26] COMIS 3.2 User Guide (2005).
- [27] D. Cóstola, B. Blocken, M. Ohba, J.L.M. Hensen, „Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients,“ *Energy Build.* 42/6, 881-888 (2010).
- [28] N. Artmann, H. Manz, P. Heiselberg, „Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation,“ *Renew. Energy* 30/12, 2589-2598 (2008).

- [29] N. Artmann, H. Manz, P. Heiselberg, „Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe,“ *Appl. Energy* 84/2, 187-201 (2007).
- [30] R. Ramponi, I. Gaetani, A. Angelotti, „Influence of the urban environment on the effectiveness of natural night-ventilation of an office building,“ *Energy Build.* 78, 25-34 (2014).
- [31] M. Kolokotroni, A. Aronis, „Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation,“ *Appl. Energy* 63/4, 241-253 (1999).
- [32] P. Roach, F. Bruno, M. Belusko, „Modelling the cooling energy of night ventilation and economiser strategies on façade selection of commercial buildings,“ *Energy Build.* 66, 562-570 (2013).
- [33] J. Le Dréau, P. Heiselberg, R. L. Jensen, „Experimental investigation of convective heat transfer during night cooling with different ventilation systems and surface emissivities,“ *Energy Build.* 61, 308-3017 (2013).
- [34] Q. Chen, “Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications,“ *Build. Environ.*, 44/4, 848-858 (2009).
- [35] D.M. Lorenzetti, M.D. Sohn, „Improving speed and robustness of the COMIS solver,“ (2000).
- [36] C.-A. Roulet, J.-M. Fürbringer, P. Cretton, „The influence of the user on the results of multizone air flow simulations with COMIS,“ *Energy Build.* 30/1, 73-86 (1999).
- [37] E. Dascalaki, M. Santamouris, M. Bruant, C.A. Balaras, A. Bossaer, D. Ducarme, P. Wouters, „Modeling large openings with COMIS,“ *Energy Build.* 30/1, 105-115 (1999).
- [38] M. Grosso, D. Marino, E. Parisi, „A wind pressure distribution calculation program for multizone airflow models,“ *kogumikus Proceeding of the 3rd International Conference on Building Performance Simulation*, 105-118 (1995).
- [39] R. Z. Freire, M. O. Abadie, N. Mendes, „On the improvement of natural ventilation models,“ *Energy Build.* 62, 222-229 (2013).

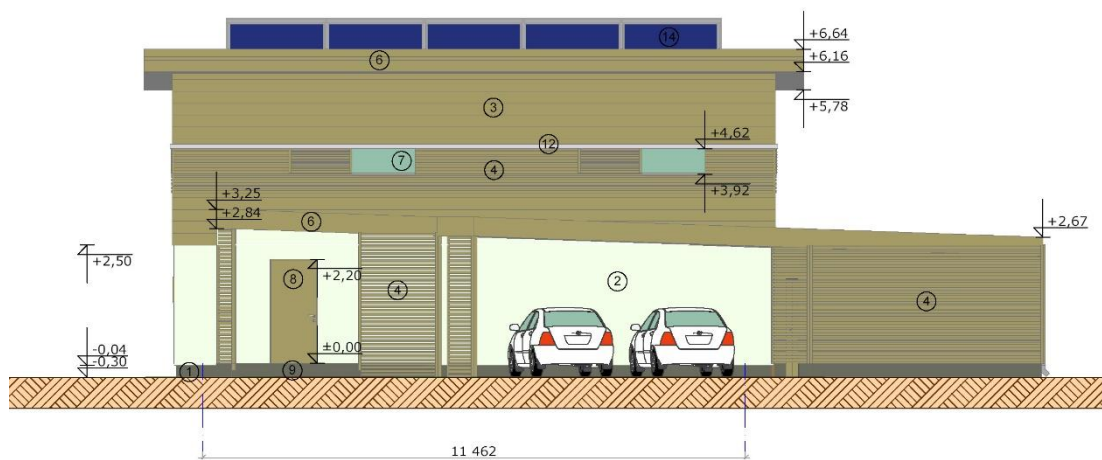
- [40] M. Grosso, „CpCalc+, Calculation of wind pressure coefficients on buildings, Users' manual,“ (1995).
- [41] E. C. C. Choi, „Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles,“ kogumikus The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (2009).
- [42] H. E. Feustel, A. Rayner-Hooson, „COMIS Fundamentals,“ Lawrence Berkley Laboratory (1990).
- [43] Riigi Ilmateenistus. URL: <http://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/tartu-toravere-meteoroloogiajaam/> (viimati külastatud 10/05/2015).
- [44] Meteonorm. URL: <http://meteonorm.com/> (viimati külastatud 10/05/2015).
- [45] W. Marion, K. Urban, „User Manual for TMY2s,“ National Renewable Energy Laboratory, USA (1995). URL: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/PDFs/tmy2man.pdf> (viimati külastatud 10/05/2015).
- [46] Z. Ghiabaklou, “Natural Ventilation as a Design Strategy for Energy Saving,” World Academy of Science, Engineering and Technology 4/11, 260-265 (2010).
- [47] „Cooling Buildings by Natural Ventilation,“ Unified Facilities Criteria (2004). URL: http://wbdg.org/ccb/DOD/UFC/INACTIVE/ufc_3_440_06n.pdf (viimati külastatud 14/05/2015).

Lisa 1 Pihla 2 hoone välisvaated

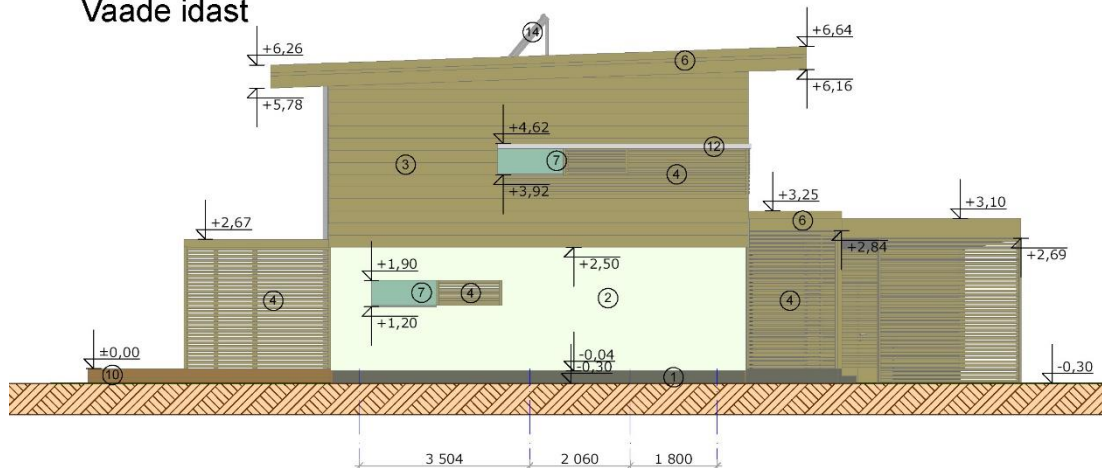
Vaade lõunast

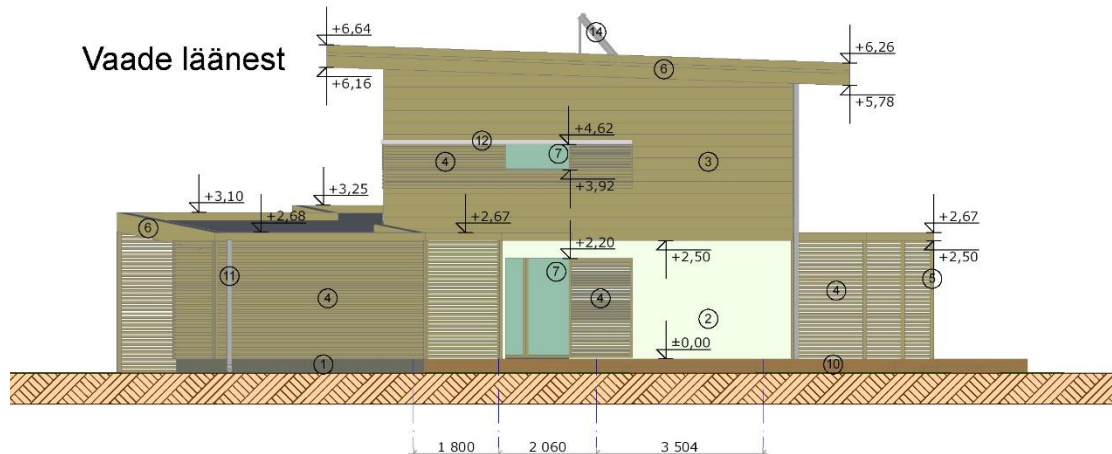


Vaade põhjast



Vaade idast





Joonis 18. Joonised Pihla 2 lõuna-, põhja-, ida- ja lääneküljest. Joonised on saadud hoone projektijuhilt Margus Valge'lt.



Joonis 19. Fotod Pihla 2 hoone välisvaadetest. Piltide allikaks on TÜTI energiatõhusa ehituse tuumiklabori andmebaas.

Lisa 2 COMIS'e mudeli sisendparameetrid

Tabel 5. COMIS'e mudeli sisendparameetrite väärtuste tähised, väärtused ja selgitused. Tabelis on toodud vaid parameetrid, mille väärtus ei vasta vaikeväärtusele või mille väärtust ei ole toodud peatükis 2. Parameetrid on koondatud COMIS'e sisendfaili andmeblokkide päiste alla.

Tähis	Väärtus	Selgitus
<i>&-CP-BUILDing (Building Reference Height)</i>		
<i>Height</i>	6,5 m	võrdlustasandi kõrgus tuule rõhukoefitsientide jaoks
<i>&-ENV-BUILDing (Building Related Parameters)</i>		
<i>Altitude</i>	30 m	hoone kõrgus merepinnast
<i>Angle Building</i>	0°	nurk hoone teljest põhja-lõuna teljeni mõõdetuna päripäeva
<i>Latitude</i>	58°4′	hoone asukoha laiuskraad (+N; -S)
<i>Longitude</i>	26°7′	hoone asukoha pikkuskraad (+E; -W)
<i>&-ENV-WIND and meteo related parameters</i>		
<i>Ref. Height for Wind Speed</i>	10 m	tuule kiiruse mõõtmise kõrgus maapinnast meteojaamas
<i>Altitude Meteo Station</i>	70 m	meteojaama kõrgus merepinnast
<i>Wind Velocity Profile Exponent Meteo Station</i>	0,14	tuule eksponentprofiili kordaja meteojaamas (α)

Lisa 3 Tuule rõhukoefitsiendid

Tabel 6. C_p tegurid ümbruse A (avatud ala) jaoks; $\alpha = 0,14$; PAD = 0%; SbH = -.

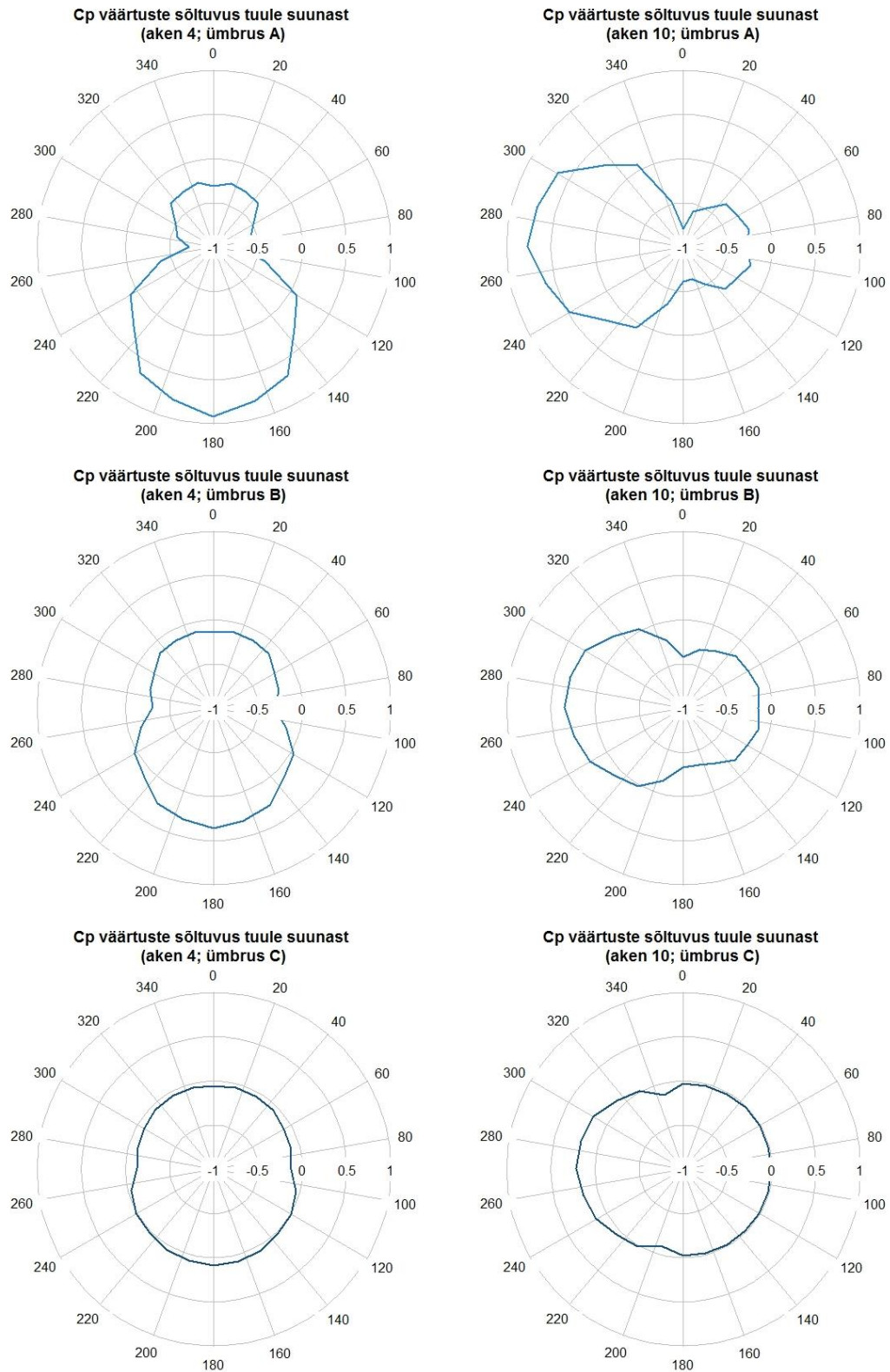
tuule suund	0	15	30	45	60	75	90	105
<i>aken1</i>	-0.339	-0.24	-0.351	-0.377	-0.589	-0.708	-0.609	-0.293
<i>aken2</i>	-0.335	-0.302	-0.288	-0.309	-0.473	-0.544	-0.923	-0.76
<i>aken3</i>	-0.331	-0.227	-0.365	-0.387	-0.57	-0.678	-0.467	-0.311
<i>aken4</i>	-0.31	-0.256	-0.28	-0.303	-0.495	-0.567	-0.74	-0.406
<i>aken5</i>	-0.329	-0.306	-0.273	-0.294	-0.455	-0.502	-0.882	-0.912
<i>aken6</i>	-0.446	-0.323	-0.104	-0.019	0.177	0.323	0.497	0.673
<i>aken7</i>	-0.592	-0.39	0.089	0.281	0.667	0.808	0.953	0.842
<i>aken8</i>	0.616	0.815	0.913	0.427	-0.069	-0.94	-0.879	-0.502
<i>aken9</i>	0.866	0.664	0.5	0.177	0.049	-0.305	-0.562	-0.613
<i>aken10</i>	-0.794	-0.585	-0.489	-0.318	-0.296	-0.23	-0.301	-0.216
<i>aken11</i>	-0.733	-0.457	-0.401	-0.254	-0.235	-0.228	-0.266	-0.209
tuule suund	120	135	150	165	180	195	210	225
<i>aken1</i>	0.025	0.13	0.383	0.519	0.675	0.684	0.656	0.306
<i>aken2</i>	-0.058	0.326	0.694	0.621	0.463	0.303	0.168	-0.014
<i>aken3</i>	-0.109	-0.023	0.202	0.353	0.595	0.802	0.906	0.424
<i>aken4</i>	0.088	0.293	0.676	0.798	0.914	0.783	0.652	0.278
<i>aken5</i>	-0.061	0.421	0.9	0.811	0.624	0.383	0.228	-0.005
<i>aken6</i>	0.755	0.354	-0.067	-0.834	-0.826	-0.486	-0.424	-0.277
<i>aken7</i>	0.72	0.315	0.092	-0.437	-0.64	-0.478	-0.418	-0.257
<i>aken8</i>	-0.456	-0.294	-0.273	-0.309	-0.331	-0.229	-0.362	-0.384
<i>aken9</i>	-0.53	-0.323	-0.297	-0.246	-0.315	-0.271	-0.278	-0.3
<i>aken10</i>	-0.307	-0.331	-0.52	-0.621	-0.61	-0.33	0.057	0.19
<i>aken11</i>	-0.25	-0.271	-0.447	-0.515	-0.485	-0.32	0.056	0.193
tuule suund	240	255	270	285	300	315	330	345
<i>aken1</i>	0.042	-0.533	-0.943	-0.634	-0.531	-0.349	-0.325	-0.269
<i>aken2</i>	-0.092	-0.296	-0.497	-0.718	-0.571	-0.391	-0.368	-0.23
<i>aken3</i>	-0.076	-0.948	-0.869	-0.499	-0.455	-0.293	-0.272	-0.31
<i>aken4</i>	0.087	-0.384	-0.712	-0.573	-0.5	-0.305	-0.281	-0.254
<i>aken5</i>	-0.092	-0.305	-0.464	-0.672	-0.567	-0.38	-0.357	-0.229
<i>aken6</i>	-0.257	-0.273	-0.301	-0.207	-0.331	-0.352	-0.512	-0.645
<i>aken7</i>	-0.237	-0.218	-0.264	-0.215	-0.239	-0.26	-0.426	-0.489
<i>aken8</i>	-0.571	-0.677	-0.467	-0.311	-0.101	-0.014	0.217	0.372
<i>aken9</i>	-0.473	-0.537	-0.874	-0.579	0.063	0.369	0.803	0.857
<i>aken10</i>	0.484	0.615	0.76	0.714	0.648	0.297	0.068	-0.475
<i>aken11</i>	0.532	0.7	0.903	0.884	0.821	0.376	0.069	-0.581

Tabel 7. C_p tegurid ümbruse B (äärelinn) jaoks; $\alpha = 0,22$; PAD = 10%; SbH = 6,5 m.

tuule suund	0	15	30	45	60	75	90	105
aken1	-0.178	-0.126	-0.184	-0.198	-0.309	-0.371	-0.32	-0.14
aken2	-0.176	-0.159	-0.151	-0.162	-0.248	-0.285	-0.484	-0.362
aken3	-0.142	-0.098	-0.157	-0.167	-0.246	-0.292	-0.201	-0.122
aken4	-0.134	-0.11	-0.12	-0.131	-0.213	-0.244	-0.319	-0.159
aken5	-0.142	-0.132	-0.118	-0.127	-0.196	-0.216	-0.38	-0.358
aken6	-0.24	-0.143	-0.046	-0.009	0.078	0.143	0.22	0.298
aken7	-0.248	-0.183	0.042	0.132	0.312	0.378	0.446	0.394
aken8	0.286	0.378	0.423	0.198	-0.032	-0.436	-0.363	-0.207
aken9	0.401	0.308	0.232	0.082	0.023	-0.141	-0.232	-0.253
aken10	-0.425	-0.313	-0.262	-0.17	-0.158	-0.123	-0.161	-0.116
aken11	-0.308	-0.192	-0.169	-0.107	-0.099	-0.096	-0.112	-0.088
tuule suund	120	135	150	165	180	195	210	225
aken1	0.012	0.062	0.183	0.247	0.322	0.326	0.312	0.146
aken2	-0.028	0.155	0.33	0.296	0.221	0.144	0.08	-0.007
aken3	-0.043	-0.009	0.079	0.138	0.233	0.314	0.355	0.166
aken4	0.035	0.115	0.265	0.313	0.358	0.307	0.256	0.109
aken5	-0.024	0.165	0.353	0.318	0.245	0.15	0.089	-0.002
aken6	0.334	0.157	-0.03	-0.369	-0.446	-0.262	-0.229	-0.149
aken7	0.337	0.147	0.043	-0.205	-0.269	-0.201	-0.175	-0.108
aken8	-0.189	-0.122	-0.113	-0.128	-0.137	-0.095	-0.15	-0.159
aken9	-0.219	-0.133	-0.123	-0.102	-0.13	-0.112	-0.115	-0.124
aken10	-0.164	-0.177	-0.278	-0.332	-0.326	-0.149	0.026	0.086
aken11	-0.105	-0.114	-0.188	-0.216	-0.204	-0.15	0.026	0.09
tuule suund	240	255	270	285	300	315	330	345
aken1	0.02	-0.254	-0.495	-0.333	-0.279	-0.183	-0.17	-0.141
aken2	-0.044	-0.141	-0.261	-0.377	-0.3	-0.205	-0.193	-0.121
aken3	-0.03	-0.372	-0.374	-0.215	-0.196	-0.126	-0.117	-0.134
aken4	0.034	-0.151	-0.307	-0.247	-0.215	-0.131	-0.121	-0.11
aken5	-0.036	-0.119	-0.2	-0.289	-0.244	-0.163	-0.154	-0.099
aken6	-0.139	-0.147	-0.162	-0.112	-0.179	-0.19	-0.276	-0.348
aken7	-0.099	-0.092	-0.111	-0.09	-0.1	-0.109	-0.179	-0.205
aken8	-0.236	-0.28	-0.193	-0.144	-0.047	-0.006	0.101	0.173
aken9	-0.196	-0.222	-0.361	-0.268	0.029	0.171	0.372	0.397
aken10	0.219	0.279	0.344	0.324	0.294	0.135	0.031	-0.215
aken11	0.249	0.328	0.423	0.414	0.384	0.176	0.032	-0.272

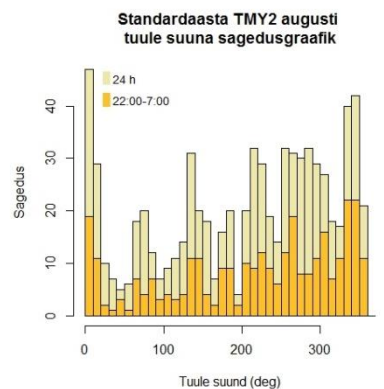
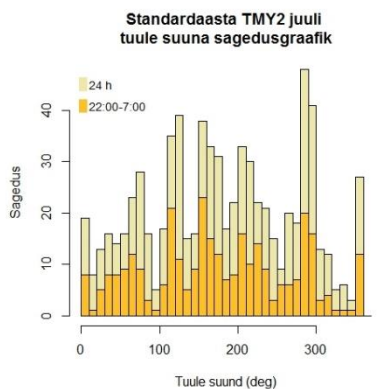
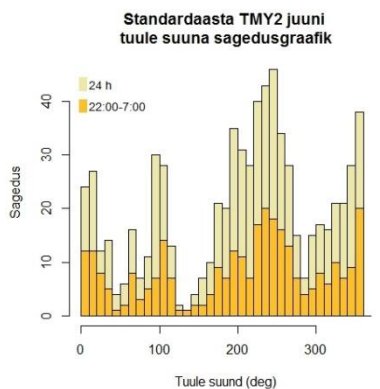
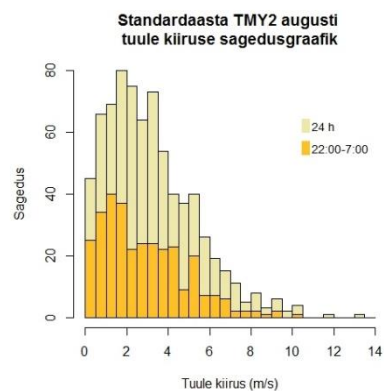
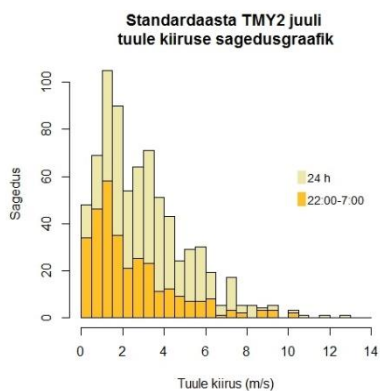
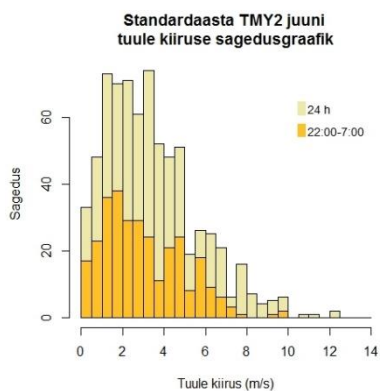
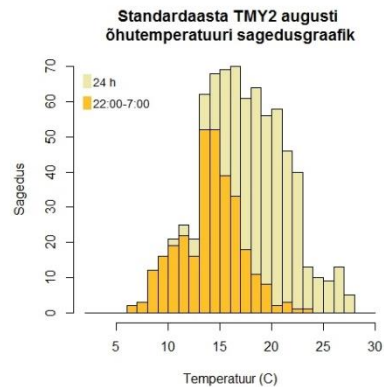
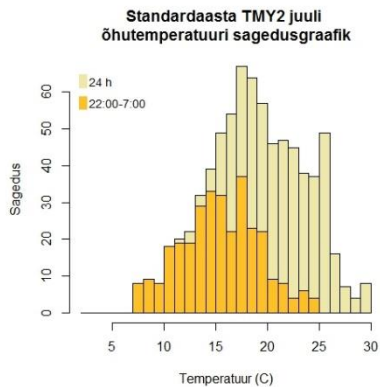
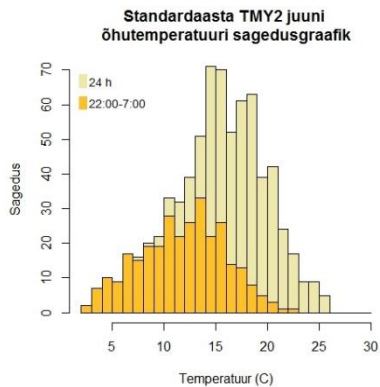
Tabel 8. C_p tegurid ümbruse C (linn) jaoks; $\alpha = 0,33$; $PAD = 20\%$; $SbH = 13$ m.

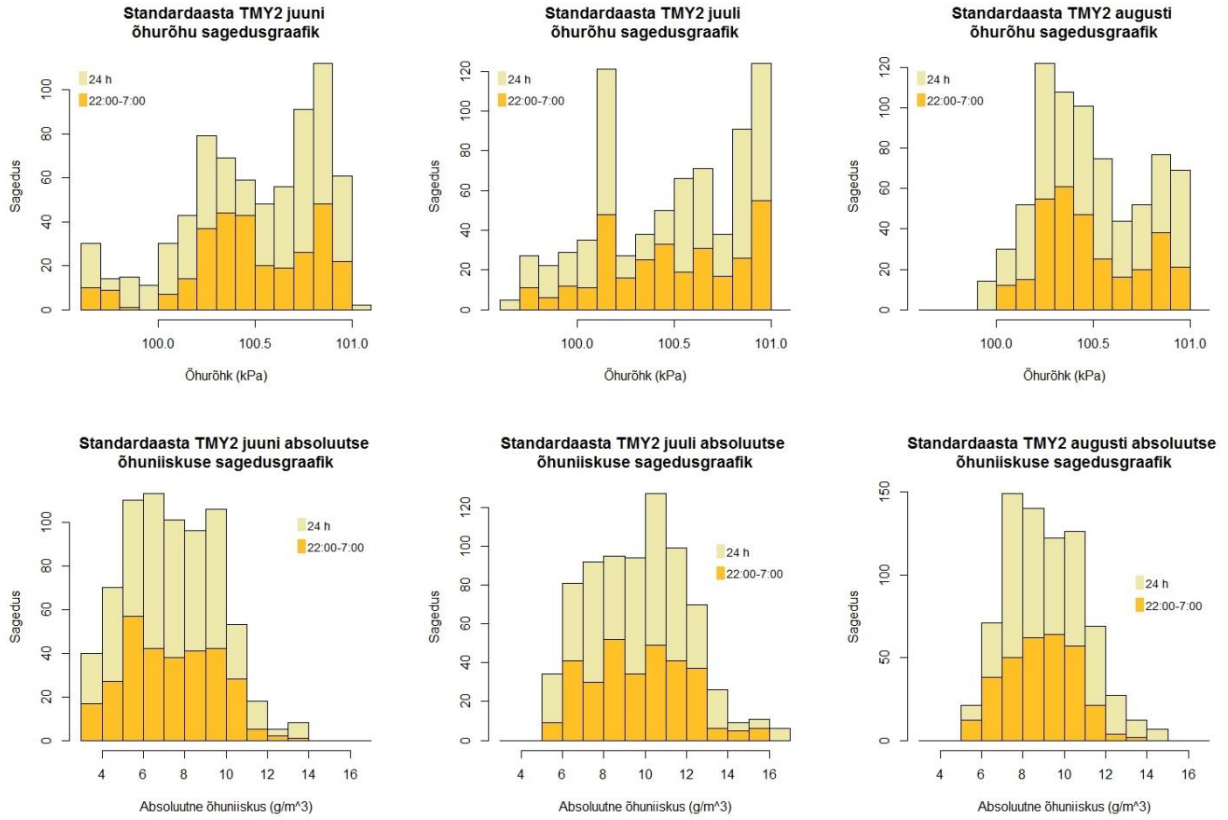
tuule suund	0	15	30	45	60	75	90	105
aken1	-0.011	-0.008	-0.011	-0.012	-0.019	-0.022	-0.019	-0.081
aken2	-0.011	-0.01	-0.009	-0.01	-0.015	-0.017	-0.029	-0.21
aken3	-0.059	-0.041	-0.065	-0.069	-0.102	-0.121	-0.084	-0.029
aken4	-0.056	-0.046	-0.05	-0.054	-0.089	-0.102	-0.133	-0.038
aken5	-0.059	-0.055	-0.049	-0.053	-0.082	-0.09	-0.158	-0.086
aken6	-0.032	-0.073	-0.024	-0.004	0.04	0.073	0.112	0.152
aken7	-0.103	-0.111	0.026	0.08	0.19	0.231	0.272	0.24
aken8	0.156	0.207	0.232	0.108	-0.018	-0.239	-0.15	-0.086
aken9	0.22	0.169	0.127	0.045	0.012	-0.077	-0.096	-0.105
aken10	-0.028	-0.021	-0.017	-0.011	-0.01	-0.008	-0.011	-0.008
aken11	-0.127	-0.079	-0.07	-0.044	-0.041	-0.04	-0.046	-0.036
tuule suund	120	135	150	165	180	195	210	225
aken1	0.007	0.036	0.106	0.144	0.187	0.189	0.181	0.085
aken2	-0.016	0.09	0.192	0.172	0.128	0.084	0.046	-0.004
aken3	-0.01	-0.002	0.019	0.033	0.056	0.076	0.085	0.04
aken4	0.008	0.028	0.064	0.075	0.086	0.074	0.061	0.026
aken5	-0.006	0.04	0.085	0.076	0.059	0.036	0.021	0
aken6	0.171	0.08	-0.015	-0.189	-0.059	-0.035	-0.03	-0.02
aken7	0.205	0.09	0.026	-0.125	-0.111	-0.083	-0.073	-0.045
aken8	-0.078	-0.05	-0.047	-0.053	-0.057	-0.039	-0.062	-0.066
aken9	-0.091	-0.055	-0.051	-0.042	-0.054	-0.046	-0.048	-0.051
aken10	-0.011	-0.012	-0.018	-0.022	-0.021	-0.092	0.016	0.053
aken11	-0.043	-0.047	-0.078	-0.09	-0.084	-0.091	0.016	0.055
tuule suund	240	255	270	285	300	315	330	345
aken1	0.012	-0.148	-0.03	-0.02	-0.017	-0.011	-0.01	-0.008
aken2	-0.026	-0.082	-0.016	-0.023	-0.018	-0.012	-0.012	-0.007
aken3	-0.007	-0.089	-0.156	-0.089	-0.081	-0.052	-0.049	-0.056
aken4	0.008	-0.036	-0.128	-0.103	-0.089	-0.055	-0.05	-0.046
aken5	-0.009	-0.029	-0.083	-0.12	-0.102	-0.068	-0.064	-0.041
aken6	-0.018	-0.019	-0.021	-0.015	-0.024	-0.025	-0.037	-0.046
aken7	-0.041	-0.038	-0.046	-0.037	-0.042	-0.045	-0.074	-0.085
aken8	-0.098	-0.116	-0.08	-0.079	-0.026	-0.004	0.055	0.094
aken9	-0.081	-0.092	-0.149	-0.147	0.016	0.094	0.204	0.218
aken10	0.135	0.172	0.212	0.2	0.181	0.083	0.019	-0.133
aken11	0.152	0.2	0.258	0.252	0.234	0.107	0.02	-0.166



Joonis 20. Illustreerivad graafikud: C_p tegurite väärtuste sõltuvus tuule suunast akende 4 ja 10 jaoks kolme erineva ümbruse (A, B, C) korral.

Lisa 4 Kliimaandmed





Joonis 21. TMY2 standardaasta juuni, juuli ja augusti õhutemperatuuri, tuule kiiruse, tuule suuna, õhurõhu ja absoluutse õhuniiskuse tunniandmete sagedusgraafikud, kus helekollasega on tähistatud kogu kuu andmed ja oranžiga andmed ajavahemikus 22:00–7:00.

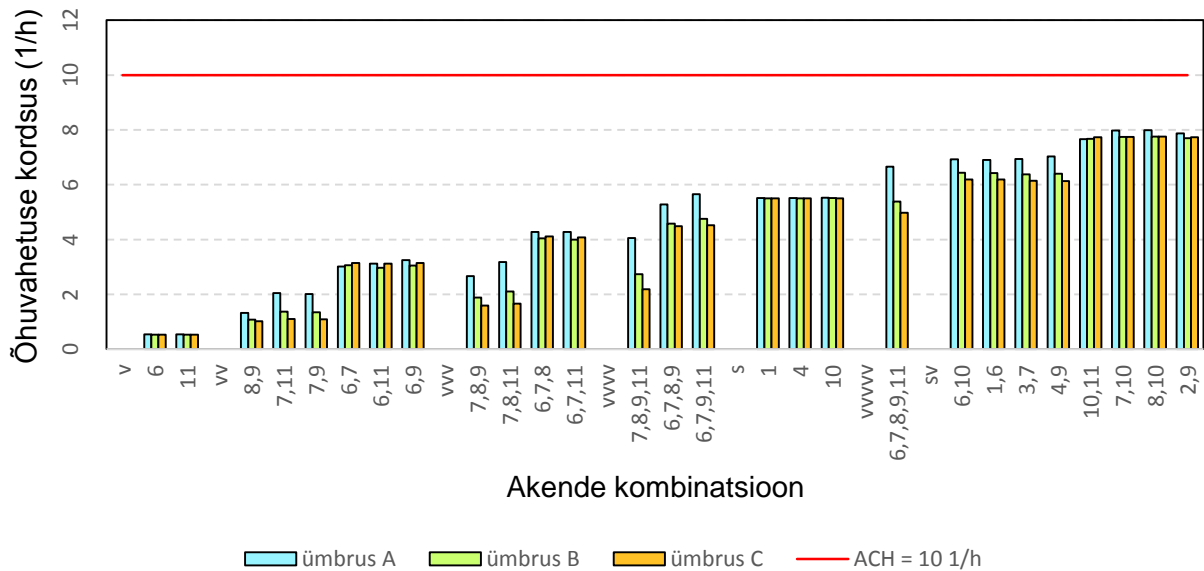
Lisa 5 Simulatsioonide koondtulemused

Tabel 9. 60 simulatsiooni koondtulemuste tabel: iga akende avatuse variandi kohta on toodud avatud akende numbrid, kategooria (vastavalt avatud suurte ja väikeste akende arvule) ning keskmine õhuvahetuse kordsus ümbruste A (avatud ala), B (äärelinn) ja C (linn) jaoks.

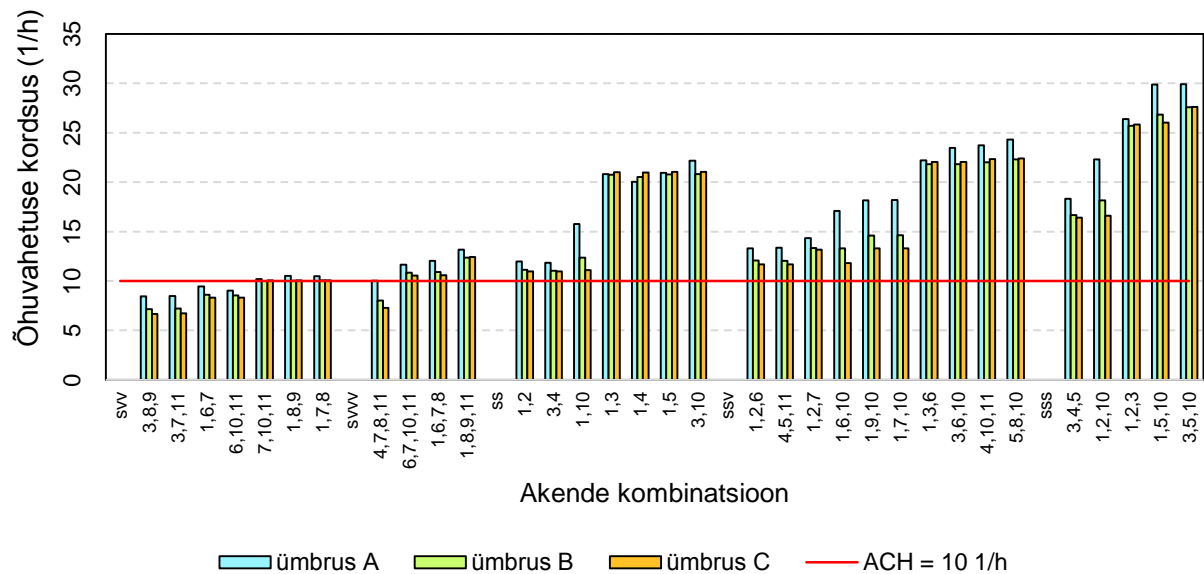
<i>Akende avatuse kombinatsioon</i>		<i>Keskmine õhuvahetuse kordsus (1/h)</i>		
<i>Akende avatuse kategooria</i>	<i>Akende avatuse variant (avatud akende numbrid)</i>	<i>ümbrus A</i>	<i>ümbrus B</i>	<i>ümbrus C</i>
v	6	0.5400954	0.5300547	0.5294552
	11	0.5422275	0.5287964	0.5264338
vv	8,9	1.325323	1.081953	1.01697
	7,11	2.044539	1.369923	1.102182
	7,9	2.007295	1.344562	1.089709
	6,7	3.018565	3.057526	3.147991
	6,11	3.123697	2.969299	3.117216
	6,9	3.244042	3.055718	3.145405
vvv	7,8,9	2.661708	1.880875	1.58579
	7,8,11	3.174196	2.102925	1.660525
	6,7,8	4.26985	4.038575	4.107141
	6,7,11	4.274934	3.993338	4.081012
vvvv	7,8,9,11	4.052013	2.731513	2.180878
	6,7,8,9	5.275795	4.578998	4.491334
	6,7,9,11	5.654072	4.758821	4.525172
s	1	5.513322	5.506336	5.505367
	4	5.51238	5.504825	5.503871
	10	5.519196	5.507543	5.505408
vvvvv	6,7,8,9,11	6.653321	5.38112	4.972133
sv	6,10	6.922267	6.433647	6.191436
	1,6	6.899836	6.423039	6.187929
	3,7	6.941336	6.377364	6.142579
	4,9	7.02946	6.396186	6.136842
	10,11	7.657134	7.677759	7.724647
	7,10	7.969672	7.73982	7.740711
	8,10	7.985157	7.752965	7.751658
	2,9	7.870678	7.691528	7.728807

svv	3,8,9	8.459349	7.163921	6.671877
	3,7,11	8.492659	7.228843	6.739585
	1,6,7	9.442942	8.611967	8.319849
	6,10,11	9.036328	8.546438	8.309001
	7,10,11	10.18475	9.992947	10.05
	1,8,9	10.51704	10.04119	10.07754
	1,7,8	10.4952	10.05518	10.07436
svvv	4,7,8,11	10.01813	8.029234	7.275766
	6,7,10,11	11.66533	10.83287	10.56406
	1,6,7,8	12.03476	10.92051	10.59194
	1,8,9,11	13.18606	12.37945	12.4348
ss	1,2	11.9889	11.14686	10.98105
	3,4	11.84677	11.05073	10.95815
	1,10	15.74942	12.3766	11.08965
	1,3	20.8126	20.74097	21.02215
	1,4	20.03268	20.51528	20.9895
	1,5	20.95425	20.77513	21.03078
	3,10	22.17196	20.80203	21.0255
ssv	1,2,6	13.30457	12.05912	11.6761
	4,5,11	13.37614	12.04126	11.68337
	1,2,7	14.33863	13.33689	13.17273
	1,6,10	17.07542	13.31148	11.79841
	1,9,10	18.15605	14.59914	13.29682
	1,7,10	18.18205	14.61497	13.29483
	1,3,6	22.20987	21.82547	22.03718
	3,6,10	23.45318	21.80411	22.03317
	4,10,11	23.72795	22.02563	22.33362
	5,8,10	24.30584	22.3189	22.40977
ss	3,4,5	18.31209	16.68177	16.4159
	1,2,10	22.30292	18.15278	16.59123
	1,2,3	26.39621	25.70641	25.82017
	1,5,10	29.87584	26.84205	26.02133
	3,5,10	29.9086	27.59312	27.59883

Õhuvahetuse kordsus erinevate akende kombinatsioonide korral



Õhuvahetuse kordsus erinevate akende kombinatsioonide korral



Joonis 22. Õhuvahetuse kordsus 60 erineva akende avatuse kombinatsiooni korral kolme erineva ümbruse jaoks. Tulemused on esitatud 12 kategooria kaupa (kategoriseeritud avatud suurte ja väikeste akende arvu järgi). Punase horisontaaljoonega on tähistatud loomuliku öise ventilatsiooni jahutavaks toimeks vajalik keskmine õhuvahetuse kordsus 10 h^{-1} .

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anna-Helena Saarso (sünnikuupäev: 21.12.1993) annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Hoone loomulikku õist ventilatsiooni mõjutavad tegurid Eesti kliimas mitme tsooni õhuvahetuse mudeli põhjal“, mille juhendaja on Tõnu Muring,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 26.06.2015