



**TAL
TECH**

KONTORIHOOONETE UUED JAHUTUSE PROJEKTEERIMISE MEETODID.

Jevgeni Lukaštšuk,
Martin Thalfeldt, Jarek Kurnitski
Ehituse ja arhitektuuri instituut

10.06.26

**TALLINN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY**

SISUKORD

- Eesmärgid (optimaalne süsteem)
- Arvutusliku ja mõõdetud tipukoormuse võrdlus uuritud hoonetes
- *Case-study* büroohoone toimivus 2022.aasta suvise kuumalaine ajal
- Arvutuslikud välitingimused ja sisemised vabasoojused
- Jahutuse projekteerimine CAV ja nõudluspõhises (DCV) süsteemis
- Soojusliku ebamugavuse riski analüüs
- Investeeringu ja energiatarbimise kulude hinnang

Optimaalse süsteemi dimensioneerimine:

- Soojusliku sisekliima tagamine
- Riskide maandamine kuumalaine ajal
- Minimaalsed investeeringu – ja ekspluatatsioonikulud (CAPEX, OPEX)

SOOJUSLIK SISEKLIIMA JAHUTUSPERIOODIL

EN16798-1:2019+NA:2019

- Välisõhu temperatuur jahutusperioodi määramiseks $> 17\text{ °C}$ (15 °C)
- Kontorihoone: riietuse soojustakistus 0.5clo , aktiivsus 1.2met

Parameeter	I. Kategooria	II. Kategooria
PMV (prognoositud keskmine soojustunne)	$-0.2 < \text{PMV} < +0.2$	$-0.5 < \text{PMV} < +0.5$
PPD (prognoositud rahulolematute osakaal)	$< 6\%$	$< 10\%$
Soovituslik operatiivne temperatuur jahutusperioodil	$23.5 - 25.5\text{ °C}$	$23.0 - 26.0\text{ °C}$
Maksimaalne õhu liikumise kiirus jahutusperioodil	0.19 m/s	0.25 m/s
Tõmbusindeks (DR, Draught Rating)	≤ 15	≤ 20

Lisaks, soovituslik piirata ruumiõhu absoluutset niiskust suuruseni 12 g/kg ($\sim 25\text{ °C}$ $60\text{ \%RH}$).

Määrus nr 58:

(2¹) Kui hoone on varustatud jahutussüsteemiga, võib dūnaamilises arvutuses jahutuse temperatuuriseade vārtust vōrreldes ehitusseadustiku § 65 lõike 3 alusel kehtestatud määruſes toodud ruumitemperatuuri seadevārtusega langetada, mitte enam kui **23 kraadini**.

MÕÕDETUD JA ARVUTUSLIKU JAHUTUSTIPUKOORMUSE VÕRDLU

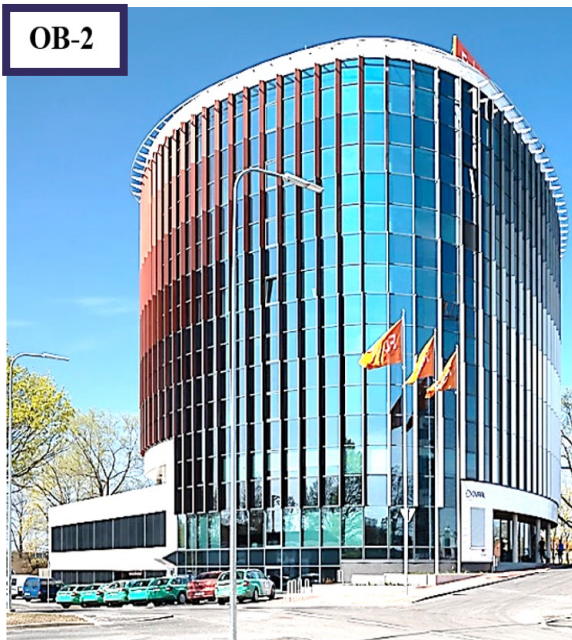
Uuritud hoonete projekteeritud väärtused

Build.	Year	Conditioned area (m ²)	Solar factor (g)	Window-to-wall ratio (%)	Zone coolers	Outdoor air (°C/%RH)	Total cooling, (W/m ²)
OB-1	2017	16257.0	0.30	40	ACB	27 / 60	48
OB-2	2019	6822.2	0.21	45	ACB	27 / 50	35
OB-3	2020	5407.4	0.21	45	FC	27 / 50	44
OB-4	2023	2668.0	0.21	45	FC	27 / 50	43

OB-1



OB-2



OB-3

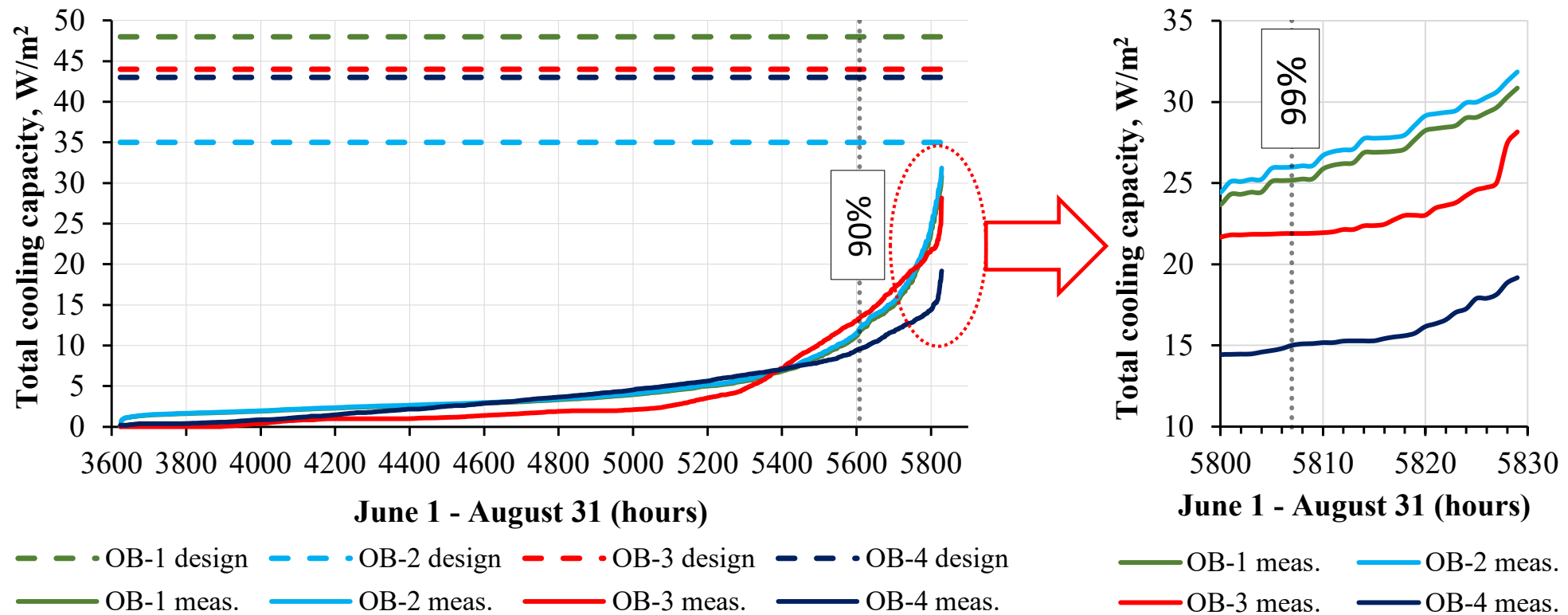


OB-4



MÕÕDETUD JA ARVUTUSLIKU JAHUTUSTIPUKOORMUSE VÕRDLU

Mõõdetud jahutustipukoormused olid oluliselt madalamad kui projekteeritud väärtused.



OB-2 büroohoone jahutussüsteemi toimivus 2022. a. kuumalaine ajal

Jahutuse tipukoormusepäev (29.06.2022)

Projekteerimistingimused

- Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg
- Sissepuhkeõhk: 17 °C
- Külmakandja: 14 / 17 °C
- Külmaallikas: 35 W/m²
- Ruumiõhk: ≤25 °C (DB)

Tegelik olukord

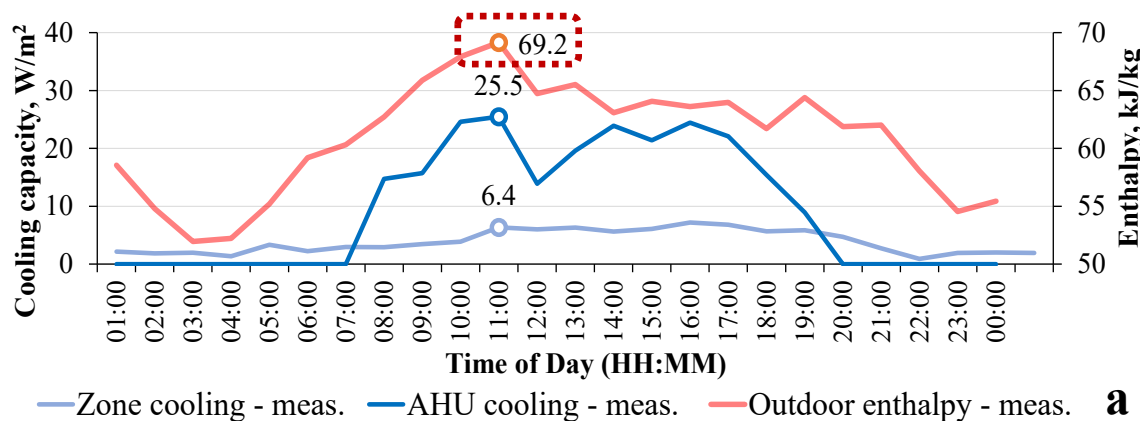
27.9 °C (DB), 69.2 kJ/kg

~19.2 °C

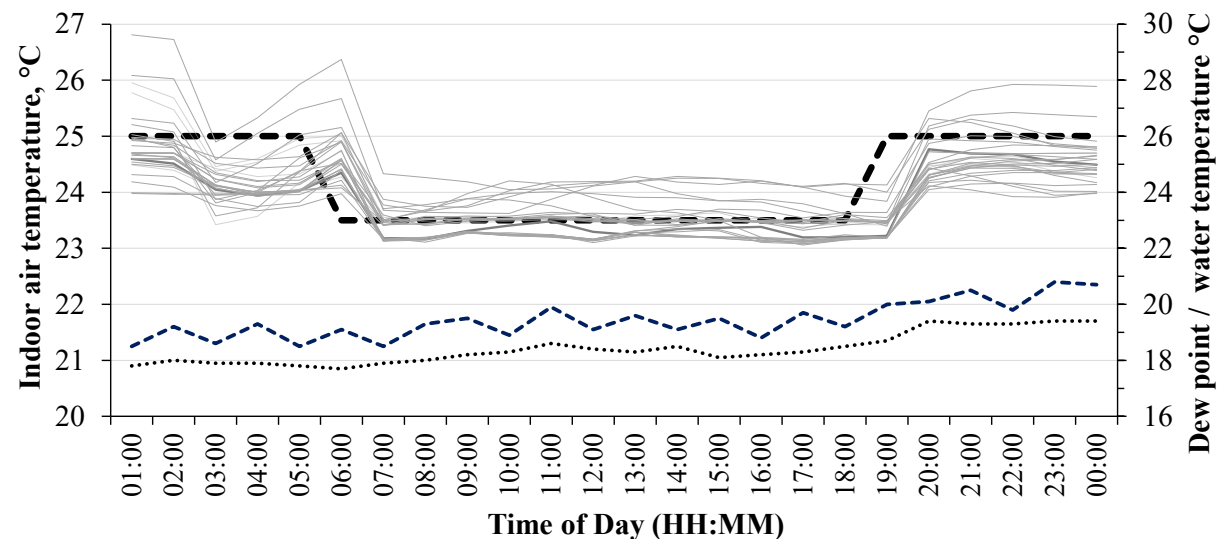
>19.5 °C (väljatõmbeõhu kastepunkt >18 °C)

32 W/m²

< 25 °C (DB)



a



--- Zones temp. set-point

— Zones temp.

..... Return air dew point - measured

--- ACB inlet water temp. - measured

b

ARVUTUSLIKUD VÄLISTINGIMUSED

EVS 906:2018:

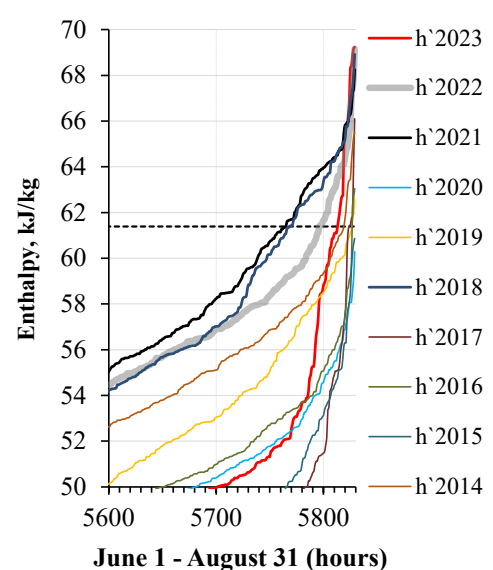
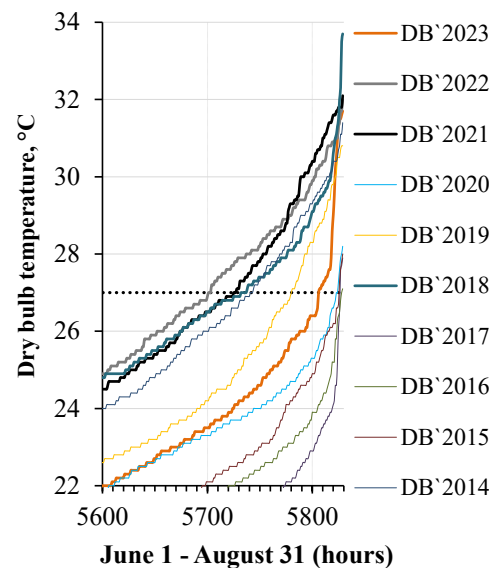
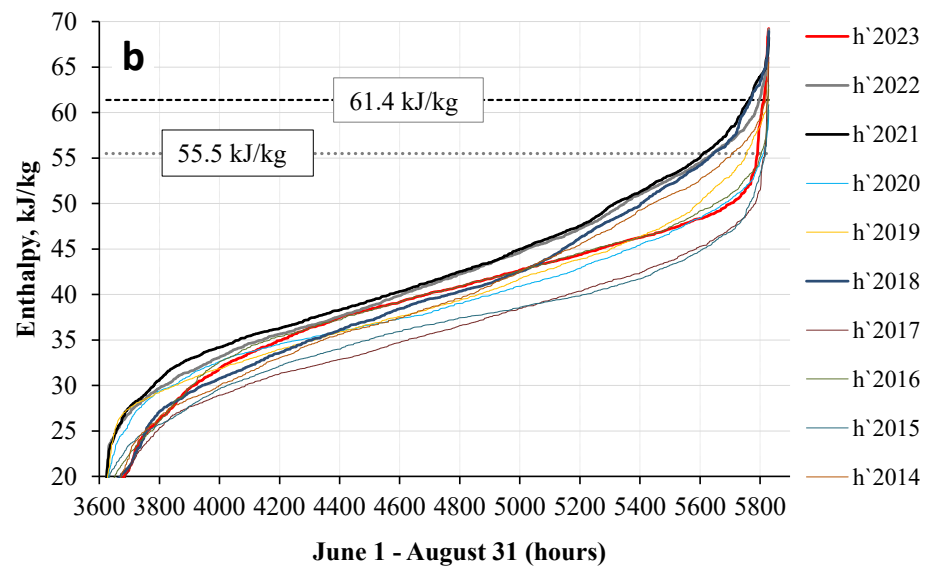
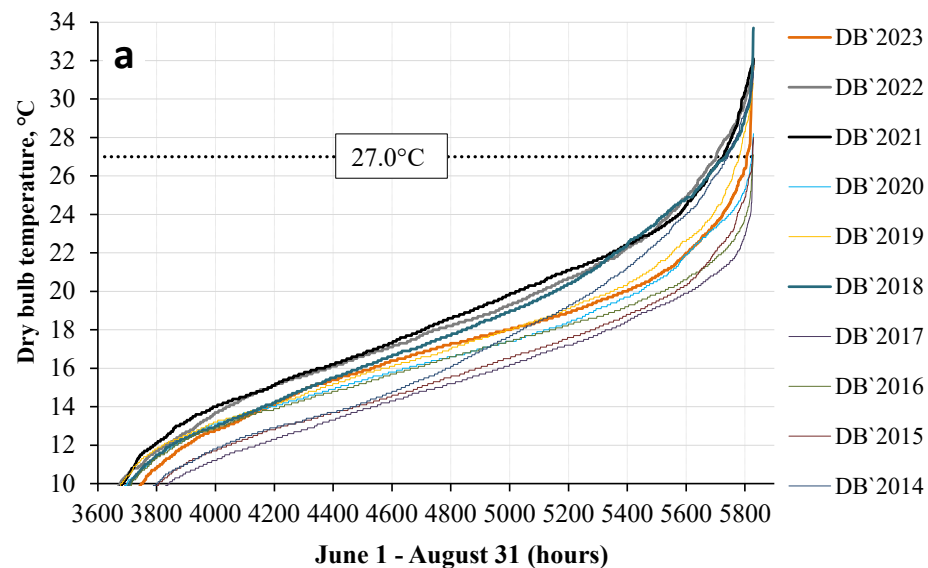
a) Jahutuse dimensioneerimisel üldiselt:

27°C 50%RH $h=55,5$ kJ/kg

b) Kondensaativabade süsteemide jahutuspatareide dimensioneerimisel:

27°C 60%RH $h=61,4$ kJ/kg

Mõõdetud välistingimused jahutusperioodil 2014–2023



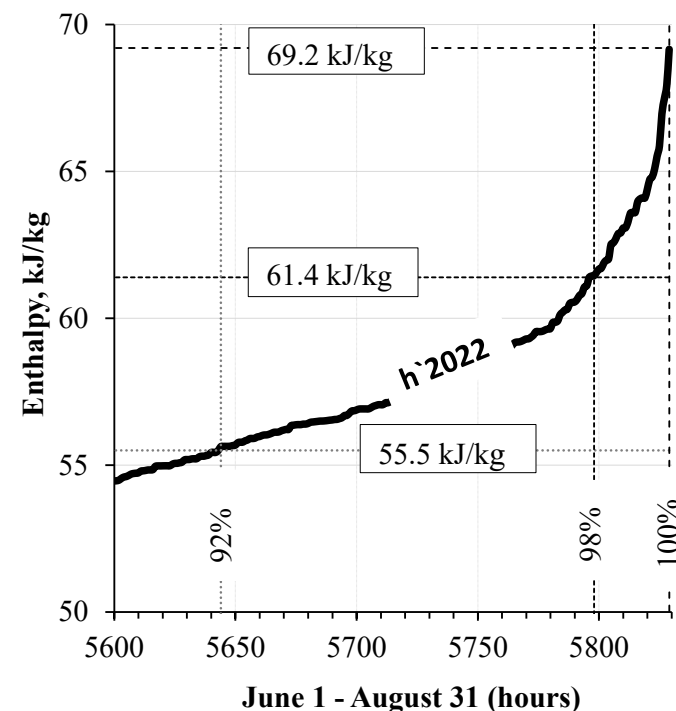
DB' – kuiva õhu temperatuur (°C)
h' – entalpia (kJ/kg)

2022 aasta

$h_{\max} = 69.2 \text{ kJ/kg}$

$h \geq 61.4 \text{ kJ/kg}$ (98%) - 44 h

$h \geq 55.5 \text{ kJ/kg}$ (92%) - 177 h



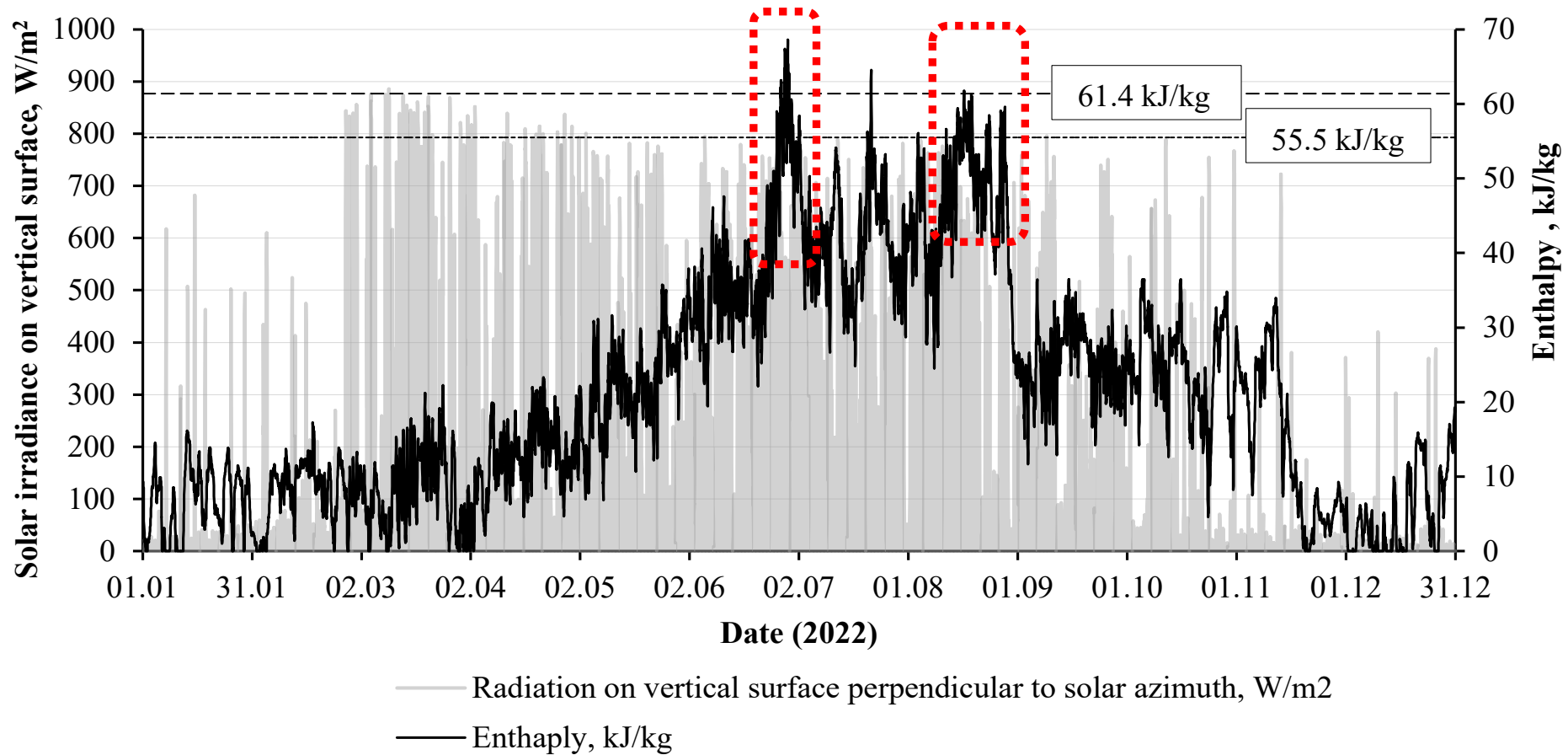
Välisõhu entalpia ja vertikaalne päikesekiirgus (2022)

Estonian TRY 1990-2020:

$h \geq 55.5 \text{ kJ/kg}$ $G_{\text{vert.max}} \approx 640 \text{ W/m}^2$

$h \geq 61.4 \text{ kJ/kg}$ $G_{\text{vert.max}} \approx 563 \text{ W/m}^2$

- Suurim vertikaalkiirgus esines kevadel ($\sim 880 \text{ W/m}^2$)
- Väga kõrged entalpiad ei langenud kokku maksimaalse vertikaalkiirgusega



SISEMISED VABASOOJUSED

Määrus nr 58 – standardised vabasoojused

“...jahutusvõimsuse dünaamiline arvutus...”

“...kasutatakse tabelis 1 esitatud vabasoojuse väärtusi...”

	Kontor	Nõupidamisruum
▪ Valgustus (W/m^2)	8 ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾
▪ Seadmed (W/m^2)	12	50
▪ Inimesed (W/m^2)	5	25
▪ Pind inimese kohta (m^2/in)	17	3.4

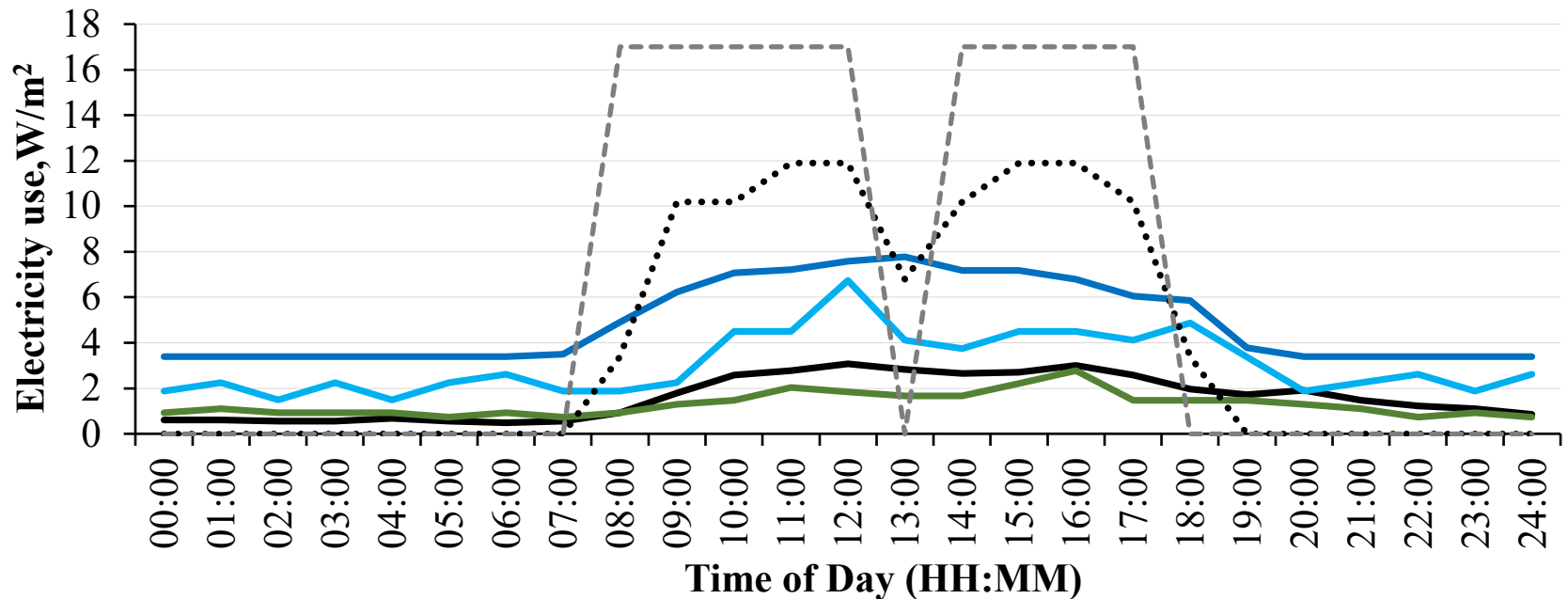
1) Elektrivalgustuse arvutuslik väärtus (... W/m^2)

SISEMISED VABASOOJUSED

Mõõdetud ja Määrus nr 58 kohaste vabasoojuste võrdlus

Seadmete mõõdetud elektritarbimine jahutuse tipupäeval

Mõõdetud seadmete elektritarbimine oli oluliselt madalam kui MKM 58 standardväärtused.



— OB-1 (Mon.)

— OB-2 (Wed.)

— OB-3 (Fri.)

— OB-4 (Tue.)

..... MKM 58_ landscaped

- - - MKM 58_ single office

OB-2 HOONE ENERGIASIMULATSIOONIMUDEL

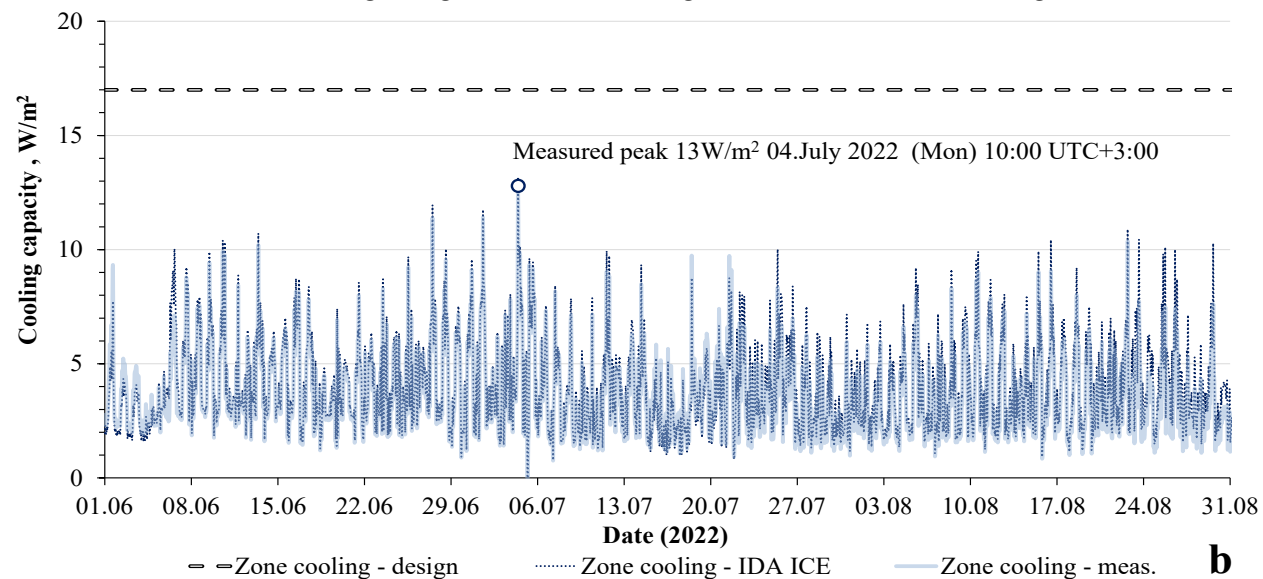
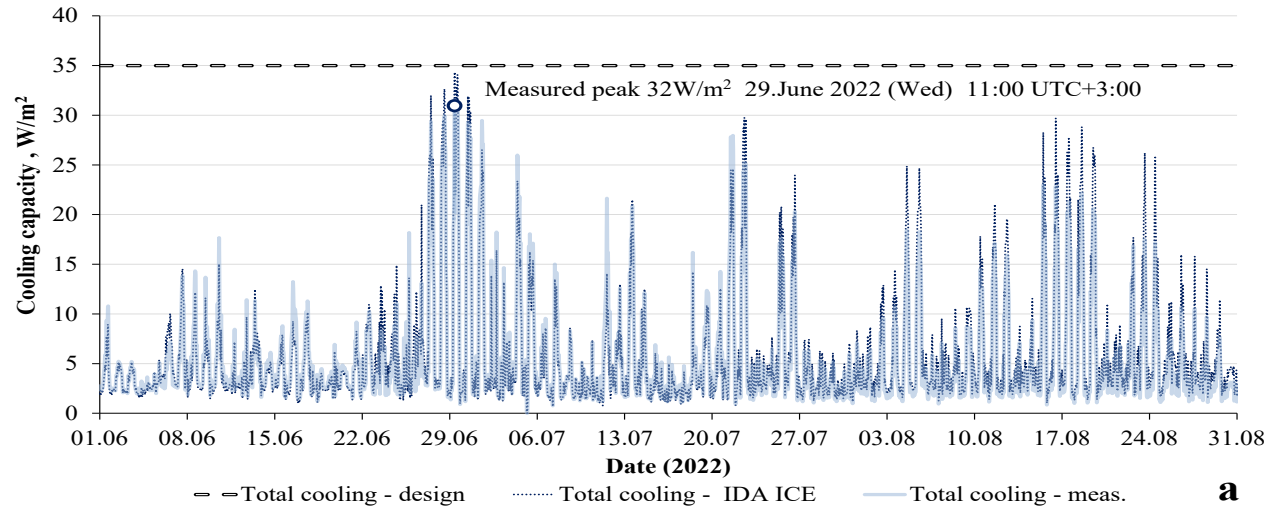


Simulatsioonimudel (IDA-ICE) kasutatud tsoonitüübid ja nende pindalad (59 tsooni).

Avatud kontorid moodustasid ~87% kogu konditsioneeritud pinnast.

Tsoonitüüp	Lühend	Arv	Pindala (m ²)	Osakaal kogupinnast (%)
Avatud kontor	LO	17	4849.3	86.5
Tubakontor	SO	24	459.2	8.2
Nõupidamisruum	Mtg	18	299.2	5.3

OB-2 hoone energiasimulatsioonimudeli valideerimine



ASHRAE Guideline 14 KPI-d

Metrics	Zone cooling	Total cooling	ASHRAE Limit
CV(RMSE) (%)	15.9	30.4	≤ 30 (hourly)
NMBE (%)	-9.4	-10.6	$\leq \pm 10$ (hourly)
R ²	0.94	0.93	≥ 0.75

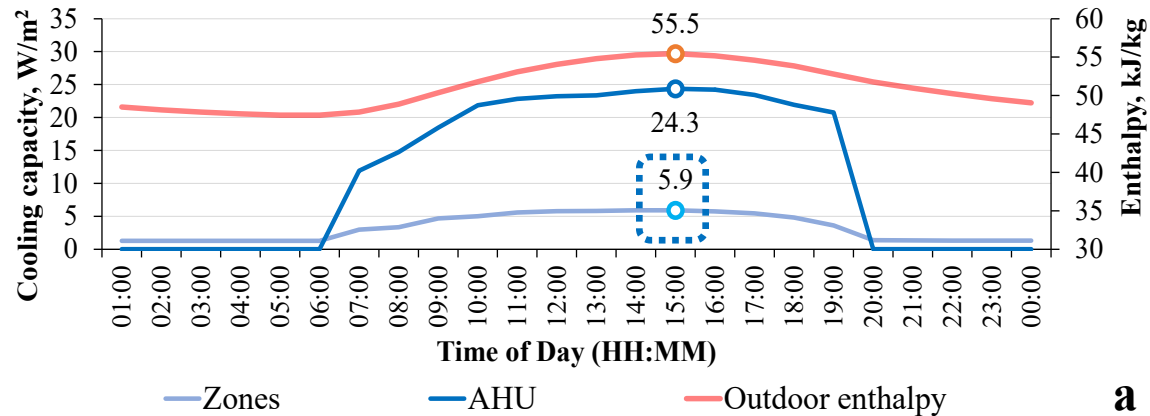
Kalibreeritud mudel kirjeldab hästi nii kogu- kui ka tsoonipõhise jahutuse dünaamikat vaadeldud perioodil.

Mudeli täpsus vastab ASHRAE Guideline 14 nõuetele.

OB-2 jahutussüsteemi simulatsioon (CAV süsteem)

Arvutuslikud tingimused

- Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg
- Ruumiõhk: ≤25 °C (DB)
- Külmakandja: 14 / 17 °C
- Sissepuhkeõhk 16 °C (DB) 9.2 g/kg
- Sisemised vabasoojused – MKM 58

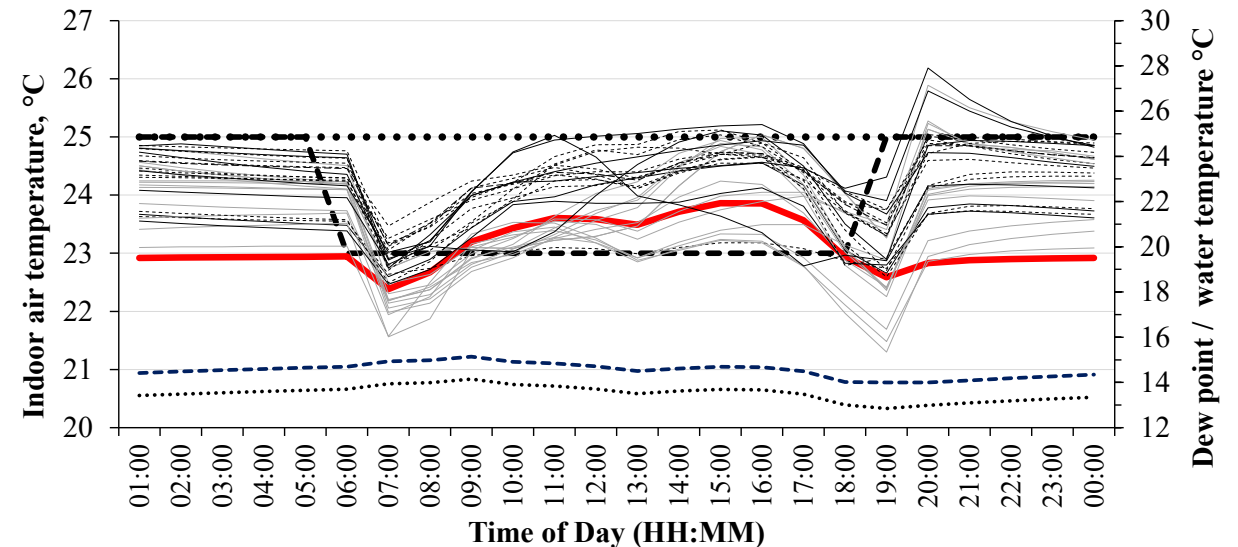


a

Eeljahutus (termilise massi aktiveerimine)

- Seadearv: 23.0 °C (06:00-18:00)
- Ruumiõhk: ≤25 °C (tipukoormuse ajal)

Eeljahutus vähendas projekteeritud tsoonipõhist jahutusvõimsust 17 W/m² kuni 5.9 W/m² (~65 % võrra).



b

DCV MÕJU JAHUTUSSÜSTEEMIDE DIMENSIONEERIMISELE

- EPBD recast (EU 2024/1275) tugevdab nõudeid siseõhu kvaliteedi jälgimisele ja ventilatsiooni juhtimisele mitteeluhoonetes.
- **Alates 2028. aastast** peavad uued avalikud hooned vastama heitevaba (ZEB) hoonete nõuetele
- Heitevabad hooned peavad olema varustatud **siseõhu kvaliteedi mõõte- ja juhtimiseseadmetega**.
- Sellest tulenevalt suureneb nõudluspõhiste ventilatsioonisüsteemide (**DCV**) kasutamine tuleviku hoonetes märkimisväärselt.
- Muutuva õhuvooluhulgaga DCV-süsteemides võivad jahutuse tipukoormused oluliselt erineda tavapärastest CAV-süsteemidest.

DCV-süsteemide õhuvoolu juhtloogika

Ventilatsiooni õhuvooluhulcade modelleerimine vastavalt **CEN 16798-1 (IEQ II)** nõuetele CO₂-põhise juhtimisega.

Parameeter	Avatud kontor	Nõupidamisruum
Ruumivajadus inimese kohta	10 m ² /in	2.1 m ² /in
Maksimaalne kasutusaste (tunnipõhine)	0.7	1.0
q _p (inimesed)	7 L/s·in	7 L/s·in
q _β (hoone)	0.7 L/s·m ²	0.7 L/s·m ²
CO ₂ seadeväärtus	725 ppm	900 ppm
Maksimaalne õhuvooluhulk	1.2 L/s·m²	4.0 L/s·m ²

Avatud kontorites arvestatud kasutusaste 0.7 oluliselt vähendas DCV-süsteemi õhuvooluhulka võrreldes CAV-süsteemidega (1.5 L/s·m²).

JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

CAV - juhtimisstrateegiad ja analüüsitud parameetrid

- Baasstsenaarium: **versioon 3**
- Varieeritud parameetrid:
 - sissepuhkeõhu temperatuur,
 - ruumiõhu temperatuuri seadeväärtus,
 - AHU töögraafik (S1–S4).
- Kõikides versioonides kasutati kiirguspaneele (RP).

Parameter / Version	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
External shading	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Supply air temp. (°C)	16	16	16	16	16	16	16	16	18	18	18
Zone setpoint (°C)	25	25	25	23	23	23	23	23	23	23	23
False ceiling in LO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Mtg. occupancy	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	0.6
AHU schedule	S1	S1	S1	S1	S2	S3	S4	S4	S1	S4	S4

JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

DCV - juhtimisstrateegiad ja analüüsitud parameetrid

- Juhtimine: **CO₂-TE põhiselt**
- Varieeritud parameetrid:
 - sissepuhkeõhu temperatuur,
 - ruumiõhu temperatuuri seadeväärtus (air-side setpoint, °C),
 - jahutusvee temperatuuri nihe (water-side setpoint, °C),
 - AHU töögraafik (S1–S4).
- Avatud kontorid modelleeriti avatud laega.

Avatud kontor — **725ppm**

Nõupidamisruum — **900ppm**

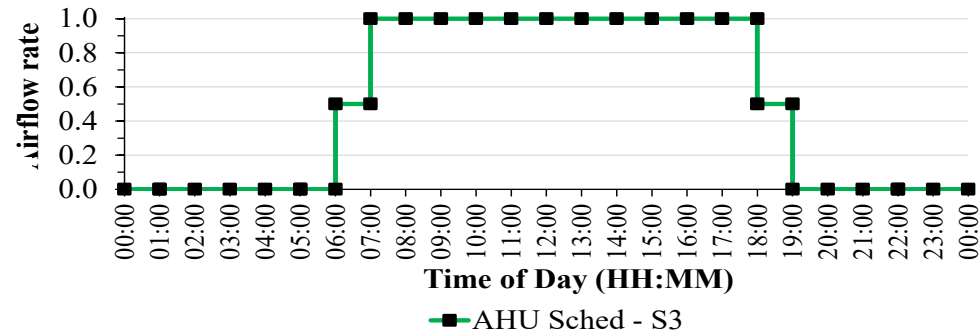
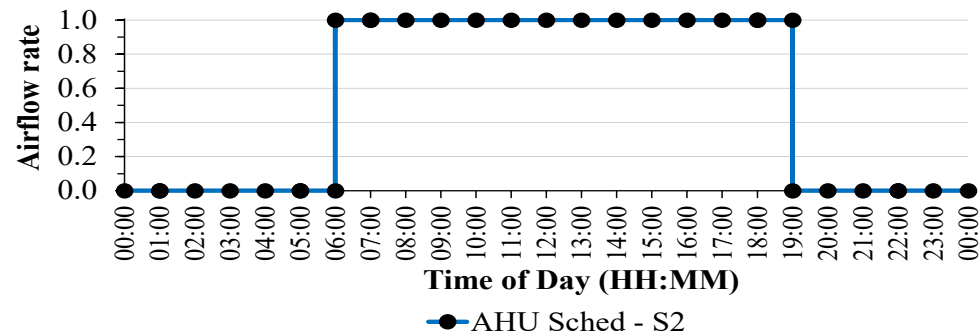
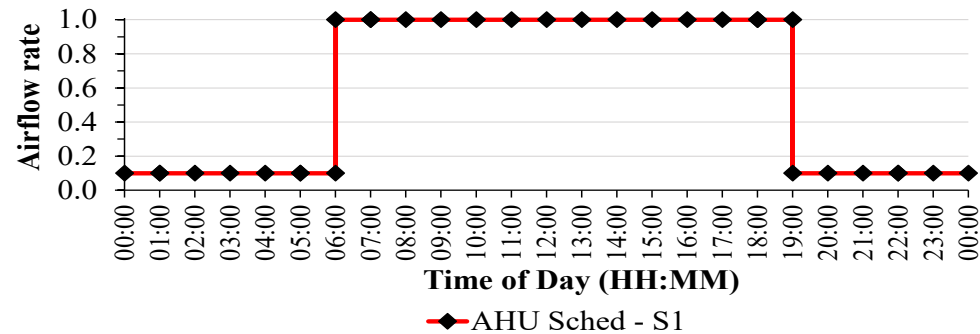
RP — radiant panels

ACB — active chilled beams

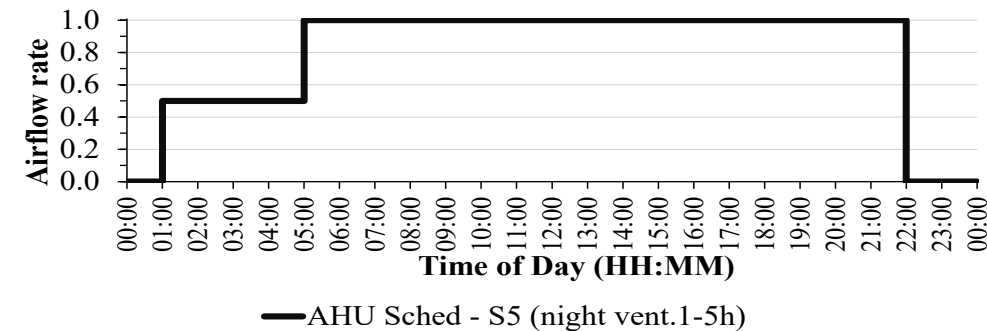
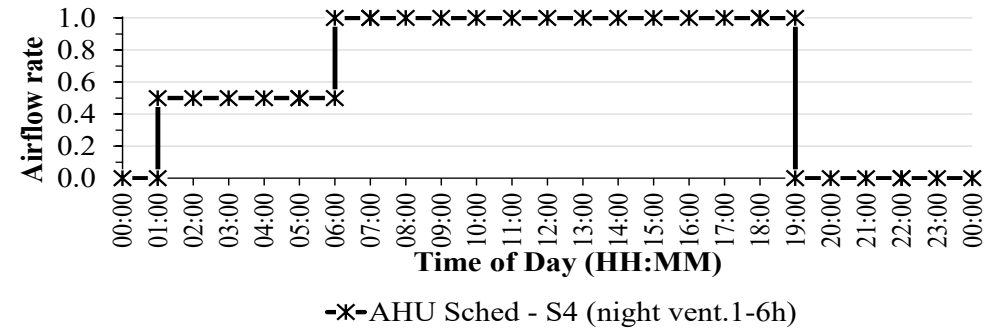
Parameeter/ Versioon	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Room unit	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB	RP	ACB
Supply air temp. (°C)	16	16	16	16	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	18	18
Air-side setpoint (°C)	25	25	25	25	24	24	23	23	25	25	25	25	24	24	23	23
Water-side offset (°C)	0	0	-2	-2	-1	-1	0	0	0	0	-2	-2	-1	-1	0	0
AHU schedule	S1	S1	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S1	S1	S4	S4	S4	S4	S4	S4

JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

AHU töögraafikud (S1-S5)



S4-S5 sisaldavad passiivset öist jahutust välisõhu abil ilma mehaanilise jahutuseta (ööine tuulutus).



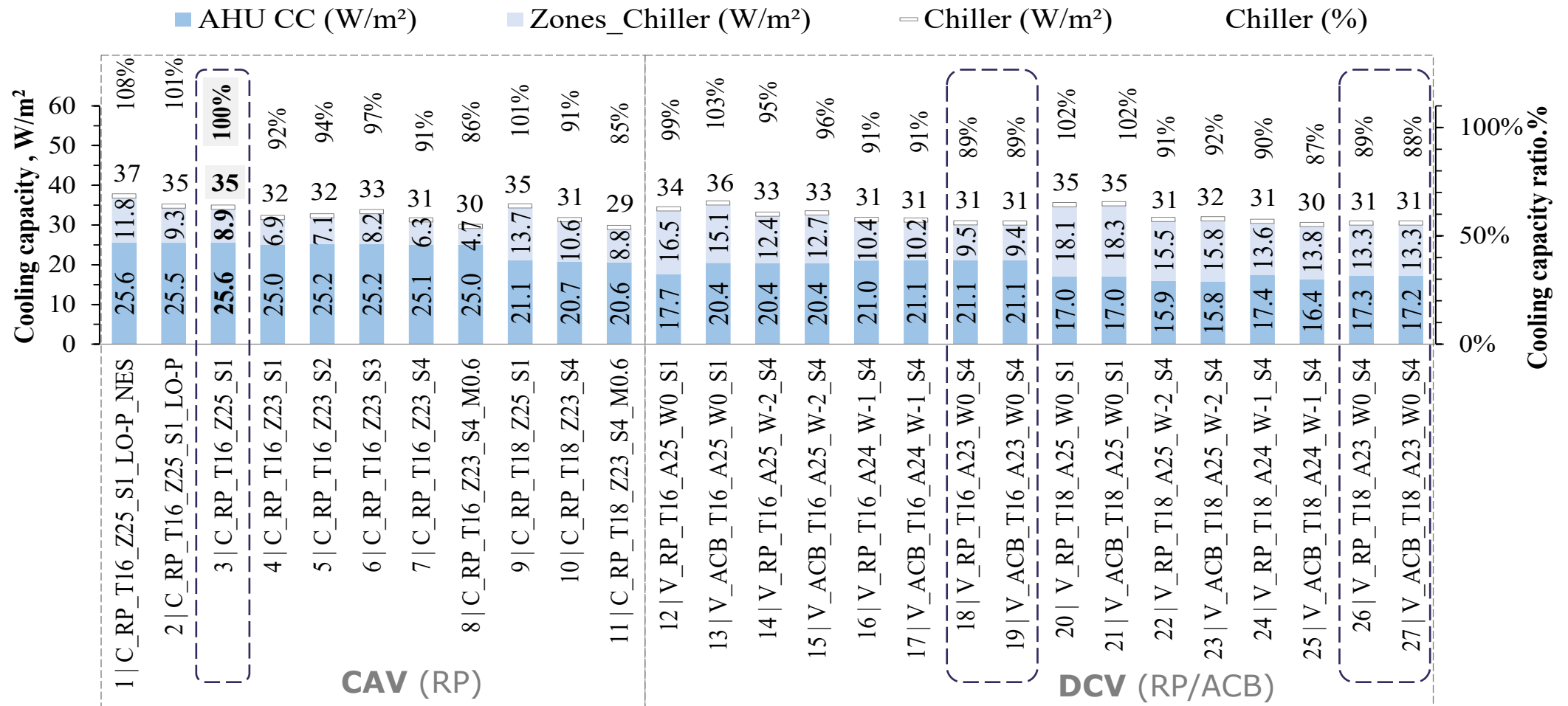
Öise tuulutuse juhtimine:

- Välisõhu temperatuur ≥ 12 °C (DB)
- Tsoonide keskmine temperatuur 23.0 °C (hüst. ± 0.5 °C)
- AHU kiirus: 50% õhuvooluhulgad (efektiivsus)
- VAV klapid maksimaalses asendis

JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

Külmaallika dimensioneerimise jahutusvõimsuse kokkuvõte

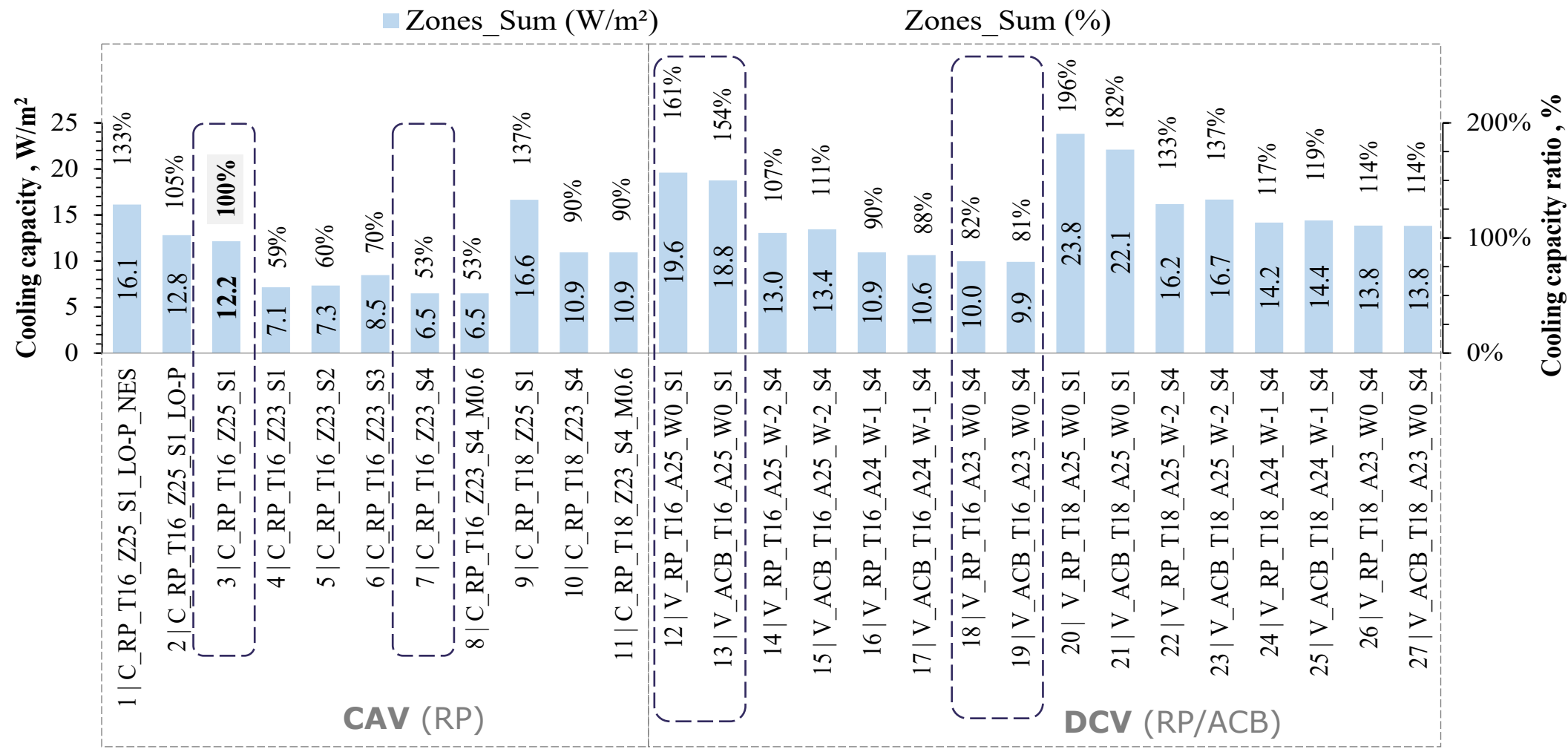
- DCV vähendas AHU jahutuskooormust ning suurendas tsoonipõhise jahutuse osakaalu.
- DCV + pre-cooling vähendas kogu jahutusvõimsust võrreldes CAV-baasmudeliga ~11%



JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

Tsoonipõhise jahutusvõimsuse kokkuvõtte paigaldatud süsteemikulude hindamiseks

Eelahutus vähendas tsoonipõhist jahutusvõimsust kuni ~25–49%.



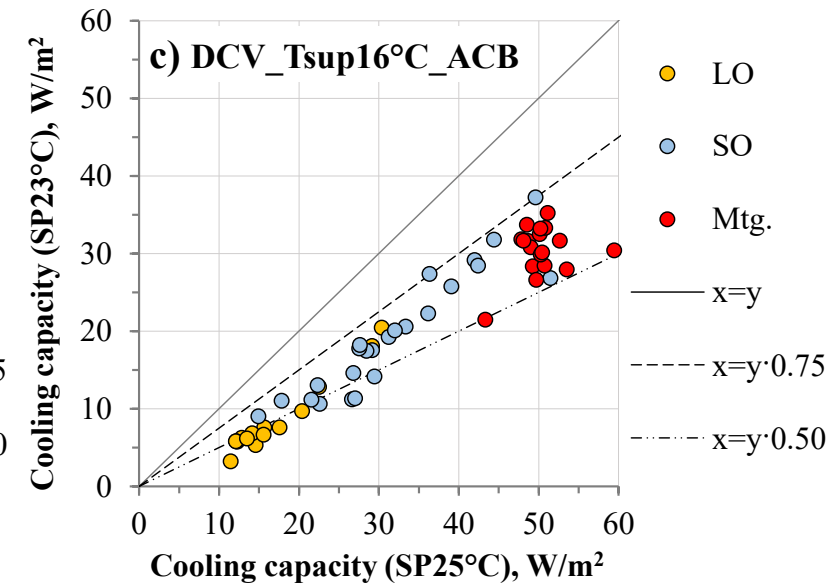
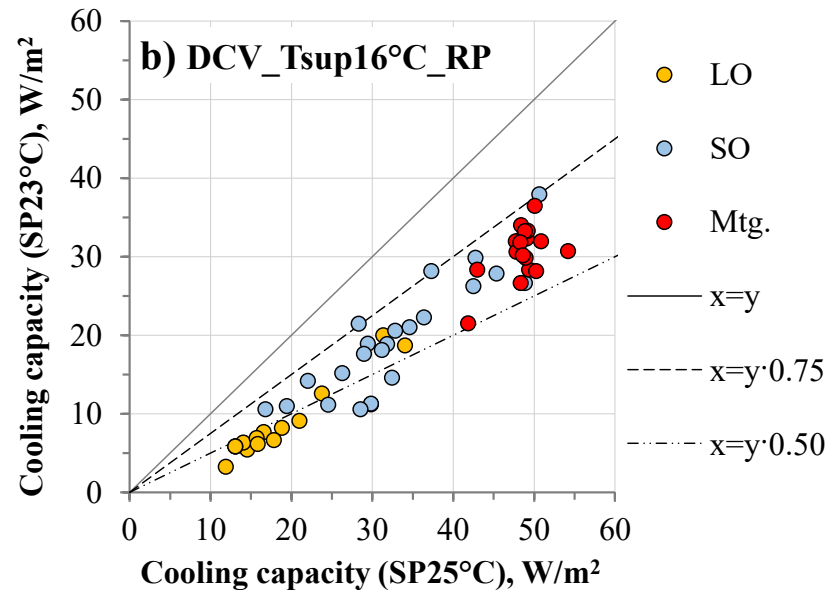
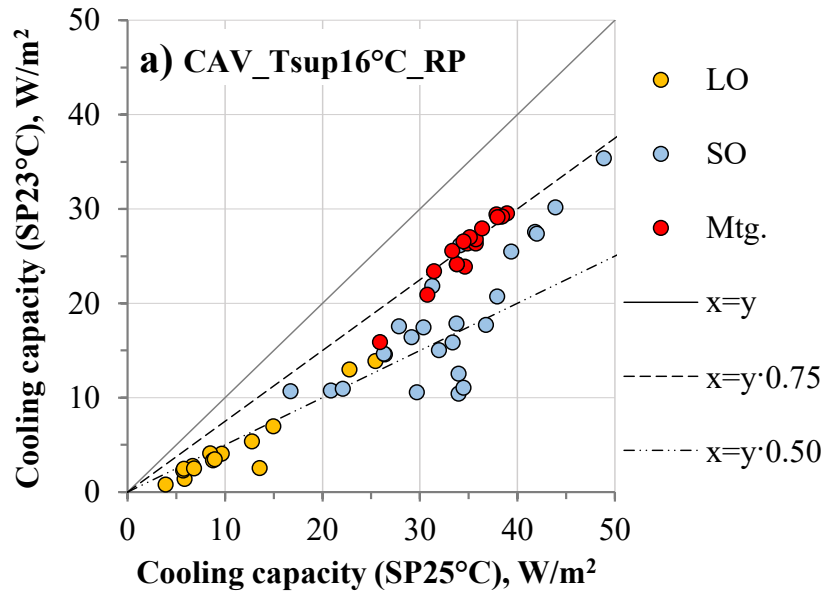
JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

Tsoonipõhiste jahutusvõimsuste võrdlus eeljahutusega ja ilma eeljahutusega

Eeljahutus (termilise massi aktiveerimine)

- Seade arv: 23.0 °C (06:00-18:00)
- Ruumiõhk: ≤ 25 °C (tipukoormuse ajal)

Eeljahutus vähendas vajalikku tsoonipõhist jahutusvõimsust kõigis stsenaariumides **$\sim 49\%$ võrra** (praktiline dimensioneerimistegur ~ 0.75).

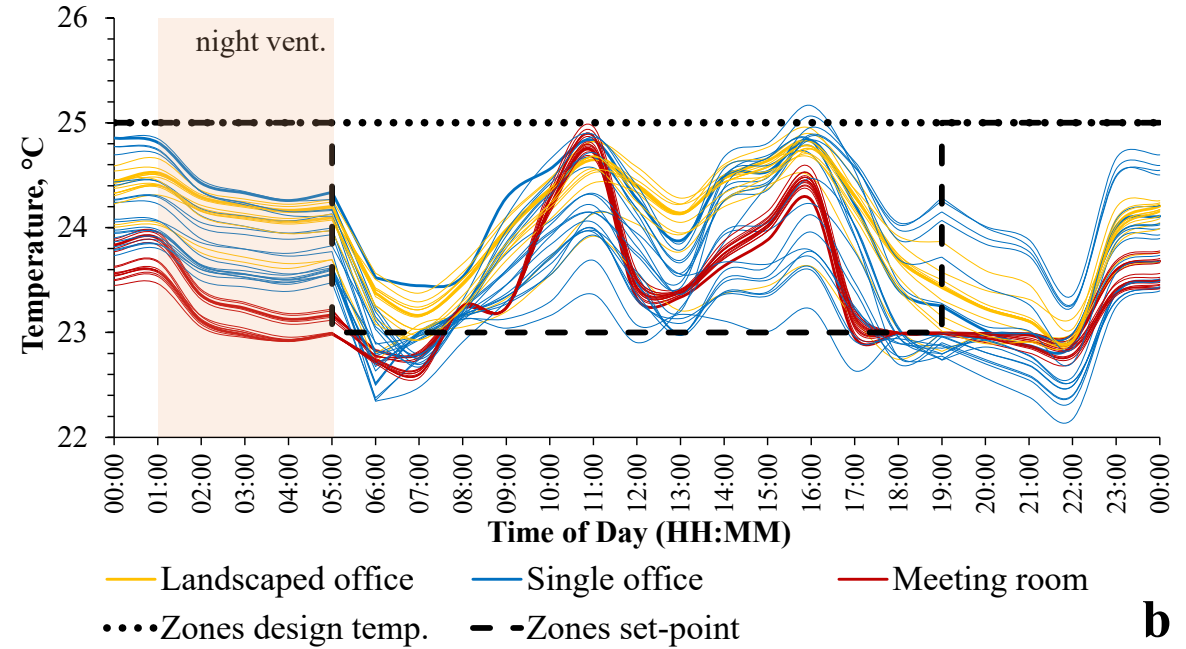
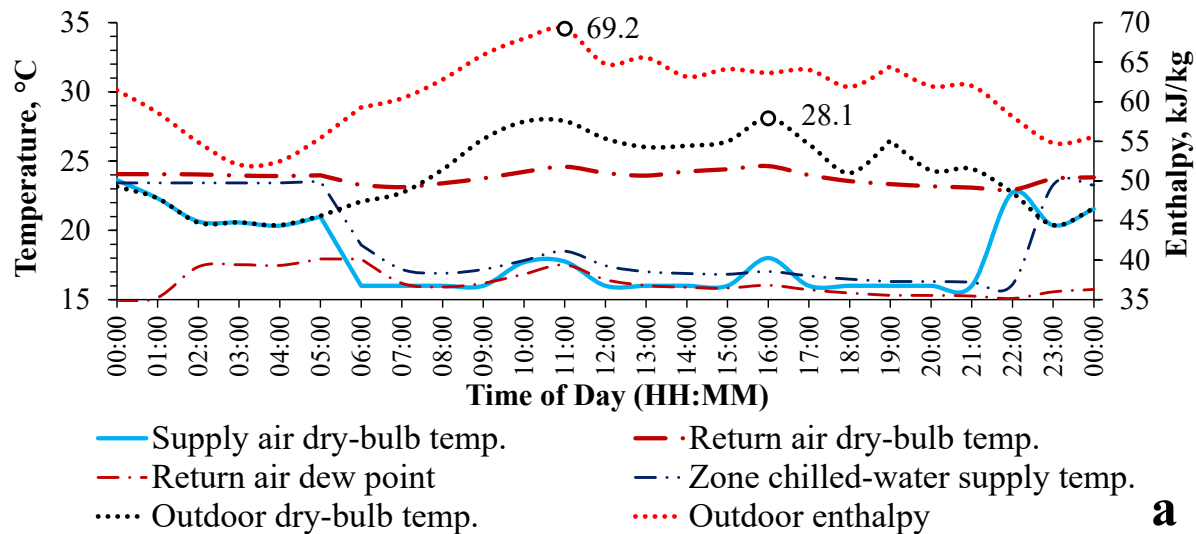


JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

DCV-süsteemi ülekuumenemise risk 2022. aasta kliimatingimustes

Arvutulikud tingimused: Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg; Sissepuhkeõhk: 16 °C (DB), 9.0 g/kg

Nominaaltingimustele dimensioneeritud eeljahutusega DCV-süsteem vastas EN 16798 (Cat II) nõuetele ka ekstreemsete välistingimuste korral (69.2 kJ/kg).



ENERGIATÕHUSUS

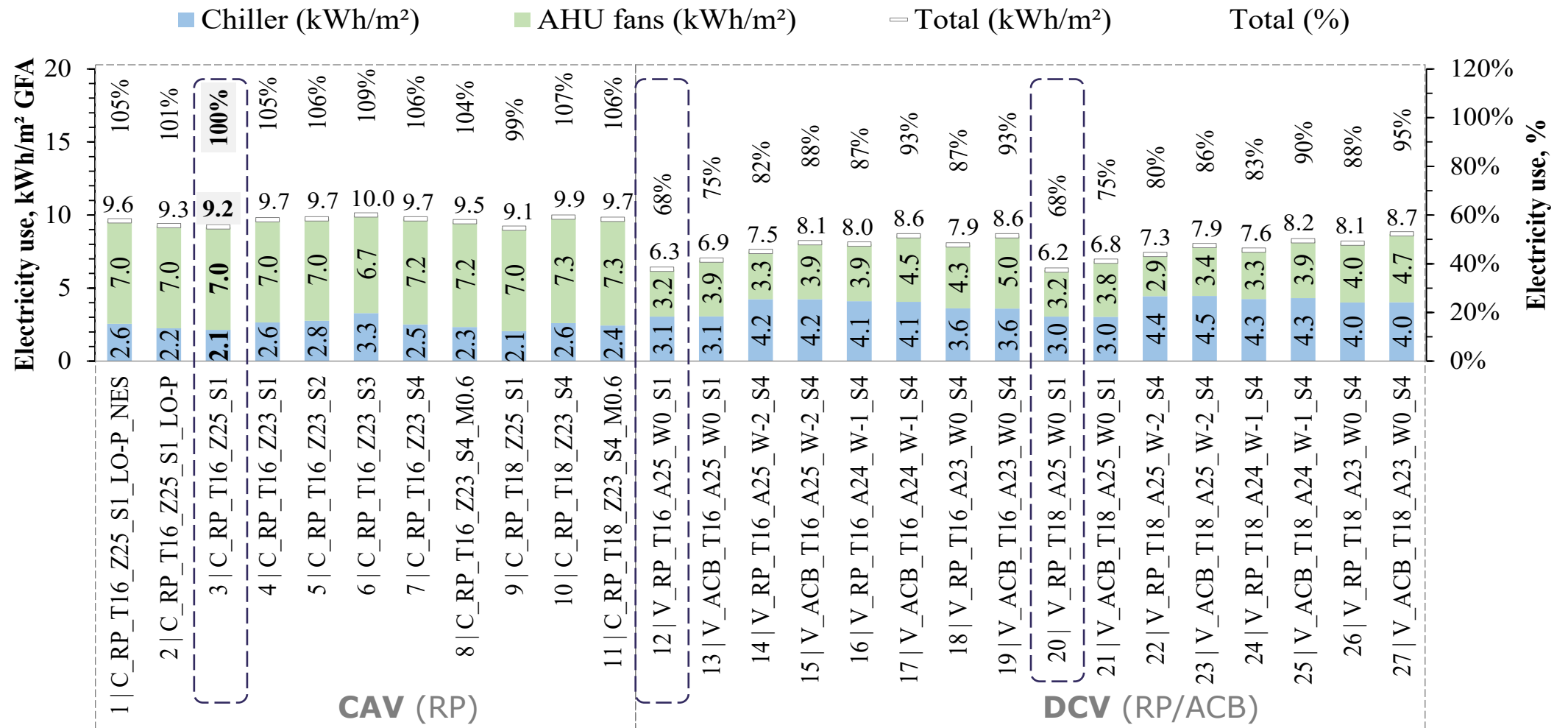
Jahuti ja AHU ventilaatorite elektritarbimine

- Aastane elektritarbimine hinnati dünaamiliste IDA ICE simulatsioonidega, kasutades Eesti TRY 1990–2020 kliimaandmeid.
- Jahuti energiatarve saadi otse simulatsioonidest (SEER = 3.5).
- Ventilaatorite energiatarve arvutati simuleeritud õhuvooluhulkade põhjal, kasutades staatilise rõhu juhtimist.
- **ACB:** täiendav rõhukadu $\Delta p = 60 \text{ Pa}$ ning pikendatud AHU tööaeg kütteperioodil.

ENERGIATÕHUSUS

Jahuti ja AHU ventilaatorite elektritarbimine

- DCV vähendas aastast elektritarbimist kuni ~32% võrreldes CAV-süsteemidega.



INVESTEERINGU- JA EKSPLUATATSIOONIKULUDE ANALÜÜS

Kulueeldused ja lähteväärtused

1. Kulude alus

Balti- ja Põhja-Euroopa turu võrdlusväärtused

Hinnatase: märts 2026 (käibemaksuta)

Meetod: hoonepõhine kaalutud keskmise meetod

2. Külmaajaam (Chiller+ Dry-cooler)

Jahutussüsteemi maksumuse regressioon
projekteeritud jahutusvõimsuse alusel

Sisaldab: *jahutit, kuivjahutit, pumpasid,
vabajahutust ja automaatikat.*

Lähteväärtused:

515 €/kW jahutusvõimsuse kohta

145 €/kW ärajuhtitava soojuse kohta

3. Ventilatsioonisüsteem

Kulufunktsioonid projekteeritud
õhuvooluhulga alusel

CAV: $1.33 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \text{ GFA}$

DCV: $1.10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \text{ GFA}$

VAV-klapi maksumus: 550 € / tk

4. Terminaalseadmed (lõppseadmed)

RP: $C = 2.23 \cdot Q_{\text{cool}} + 13.27 \text{ €/W}$

ACB: $C = 0.97 \cdot Q_{\text{cool}} + 6.93 \text{ €/W}$

5. Jahutustorustik:

RP: $0.18 \cdot Q_{\text{cool}} + 8 \text{ €/m}^2$

ACB: $0.14 \cdot Q_{\text{cool}} + 7 \text{ €/m}^2$

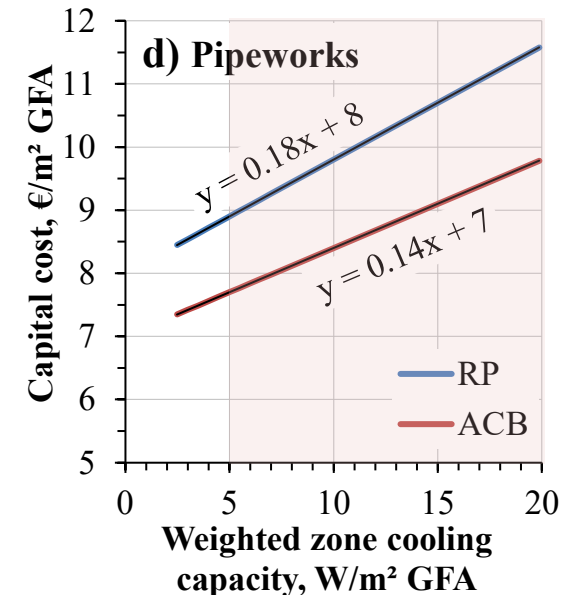
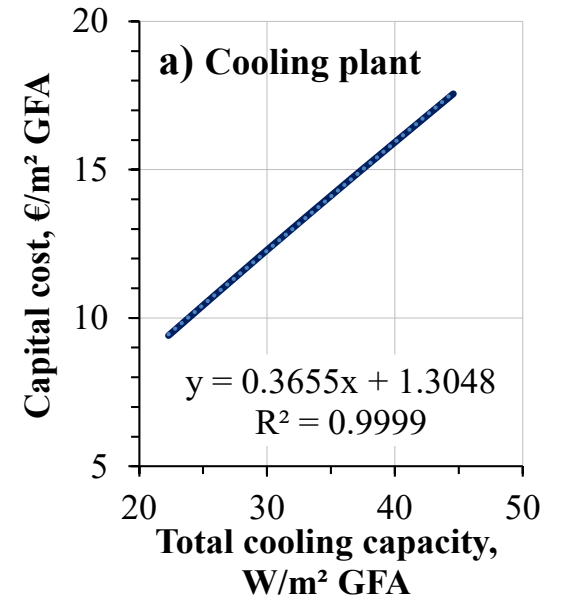
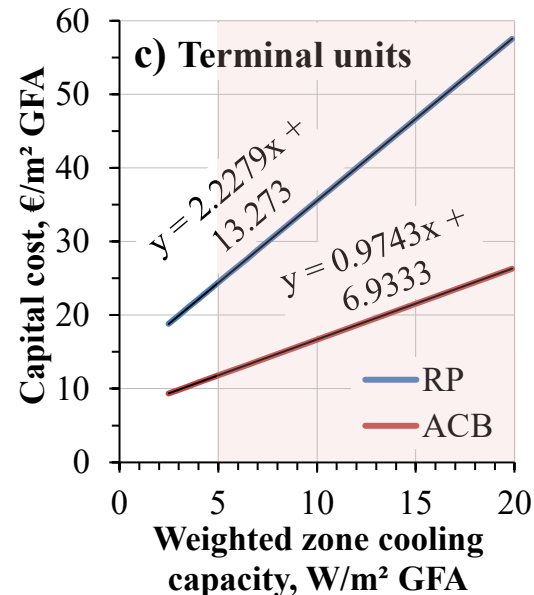
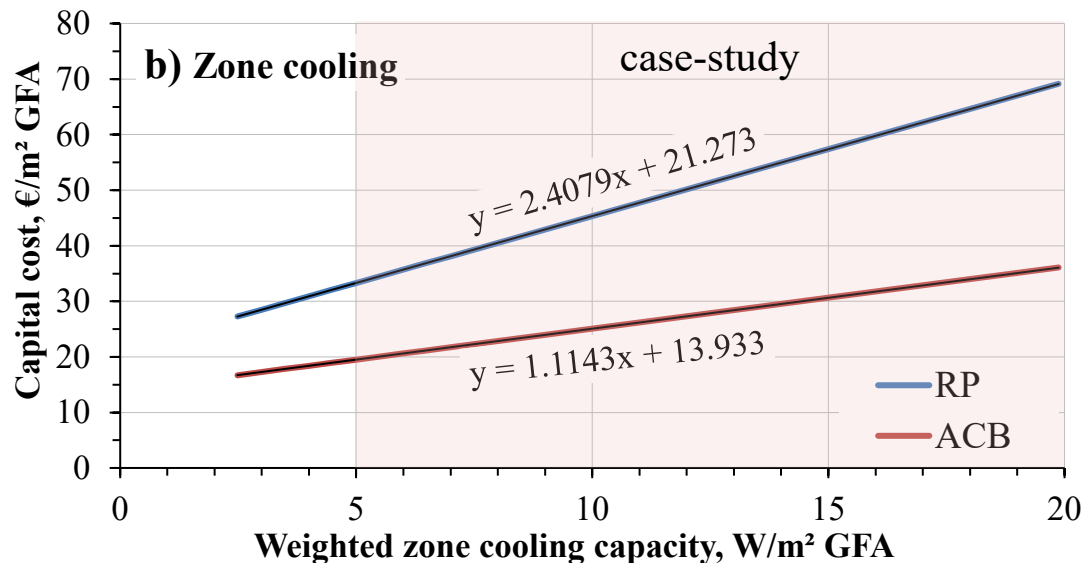
CAPEX-i määramatus: $\pm 10\text{--}20\%$

Elektrihind **0.15 €/kWh** (sisaldab energia-, võrgu- ja riiklikke tasusid)

INVESTEERINGU- JA EKSPLOATATSIOONIKULUDE ANALÜÜS

Jahutussüsteemide CAPEX korrelatsioonid

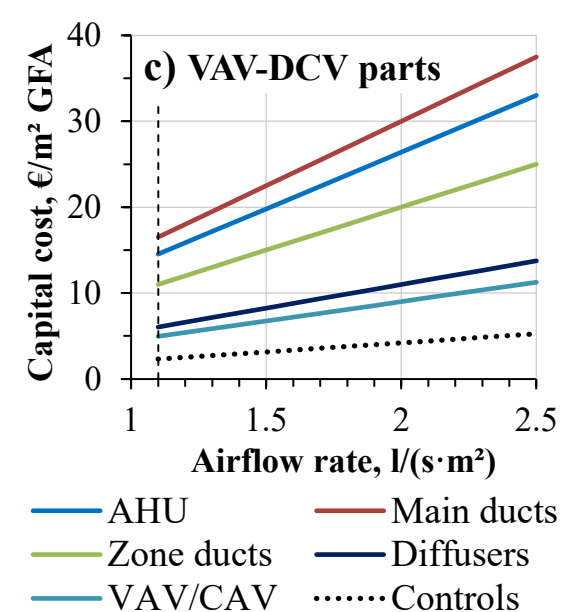
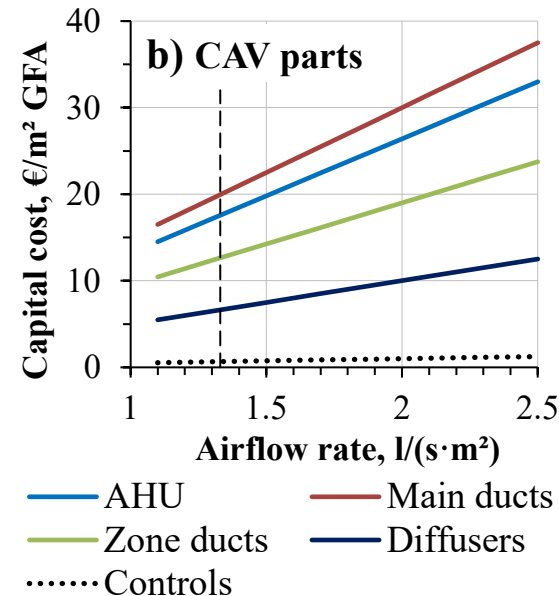
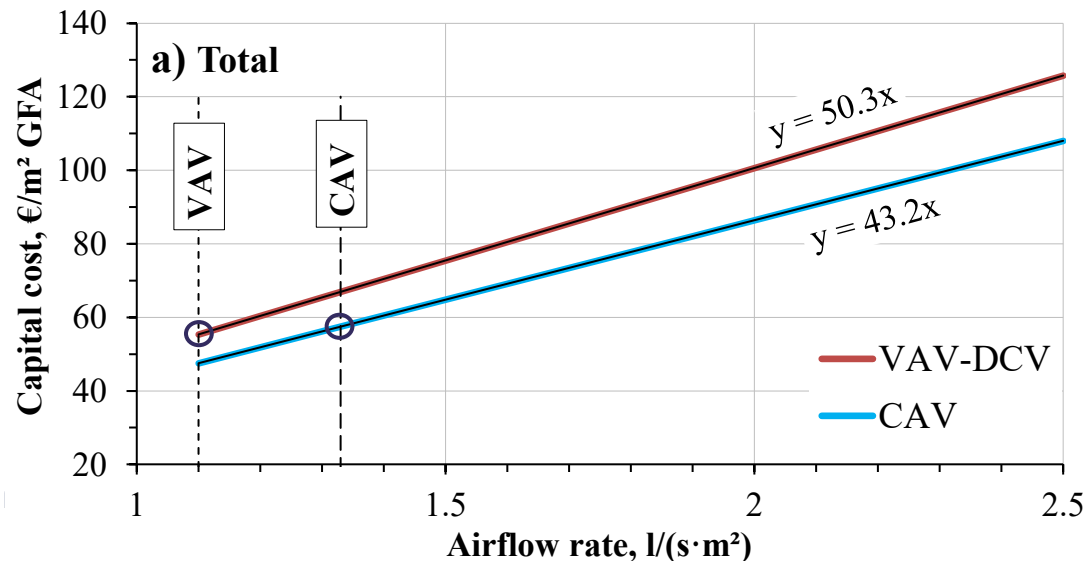
- RP süsteemidel olid kõrgemad terminalseadmete ja torustiku CAPEX kulud kui ACB süsteemidel.
- Terminalseadmete kulud mõjutasid kõige rohkem RP ja ACB süsteemide koguinvesteeringu erinevust.



INVESTEERINGU- JA EKSPLOATATSIOONIKULUDE ANALÜÜS

Ventilatsioonisüsteemide CAPEX korrelatsioonid

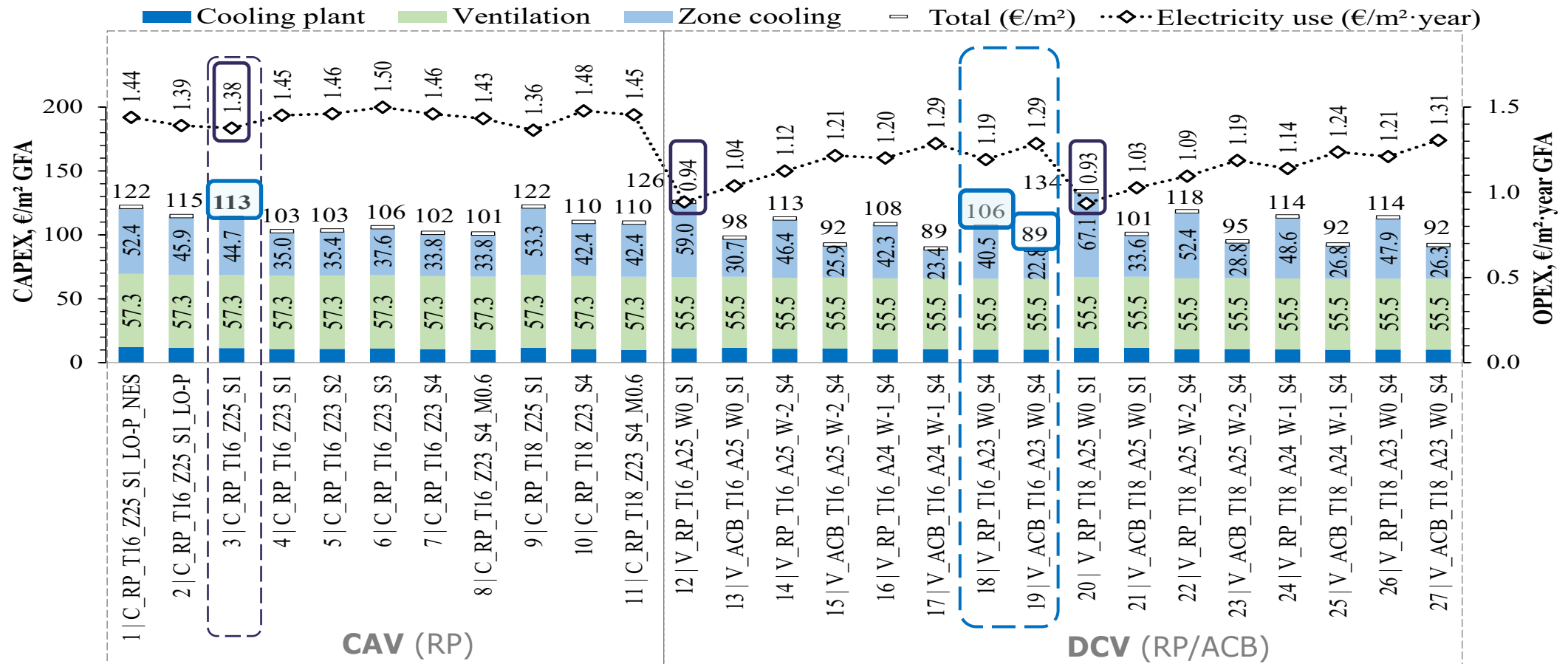
- VAV-DCV süsteemidel olid kõrgemad juhtimis- ja terminalseadmete kulud kui tavapärastel CAV süsteemidel.
- Vähendatud õhuvooluhulgad võimaldasid VAV-DCV süsteemides madalamat ventilatsioonisüsteemi koguinvesteeringut võrreldes tavapäraste CAV-ga.



INVESTEERINGU- JA EKSPLOATATSIOONIKULUDE ANALÜÜS

CAPEX ja OPEX kokkuvõte

- CAPEX sõltus märkimisväärselt terminalseadme tüübist ja juhtimisstrateegiast.
- DCV süsteemid saavutasid madalama aastase OPEX-i kuni ~32%.
- DCV CAPEX jäi tänu väiksemale õhuvoolule CAV-ga võrreldavaks.



KOKKUVÕTE

- Välisõhu tingimused 27 °C DB, 55.5 kJ/kg olid eeljahutusega piisavad EN 16798-2 (IEQ II) nõuete täitmiseks ka ekstreemsetes välistingimustes (69.2 kJ/kg).
- Eeljahutusega DCV vähendas jahutuse tippvõimsust ~11% võrreldes CAV-ga.
- Eeljahutus vähendas tsoonijahutuse vajalikku võimsust kuni 49%.
- DCV vähendas kogu energiatarbimist:
 - kuni 25% ACB puhul
 - kuni 32% RP puhul
- Väiksemad õhuvooluhulgad hoidsid DCV CAPEX-i CAV-ga võrreldaval tasemel.

- ❖ Lukastsuk, J.; Mikola, A.; Kurnitski, J.; Thalfeldt, M.; Mustakallio, P.
Capacity of a cooling system with active chilled beams at different air flow rates. E3S Web of Conferences, 672, 03013 (2025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567203013>
- ❖ Lukaštšuk, J., Thalfeldt, M.
Impact of Sorption Recovery Wheel Control Method on Cooling Capacity in a Nordic Office Building. In: Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress – CLIMA 2025, pp. 411–421. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06810-1_42
- ❖ Lukastsuk, J.; Kurnitski, J.; Thalfeldt, M.
Measured performance of cooling systems in nearly zero-energy office buildings during extreme summers and optimal cooling sizing. Energy & Buildings 353 (2026) 116829. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116829>
- ❖ Lukastsuk, J.; Kurnitski, J.; Thalfeldt, M.
Future office ZEB design principles for cooling and demand-controlled ventilation: comparison of radiant panels and active chilled beams. Journal of Building Engineering (submitted, under review)

KOKKUVÕTE

Energiatõhusa jahutussüsteemi dimensioneerimise põhialused:

- Dimensioneerimise välisõhu tingimused:
min. 19 °C (DB) - max 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg; pilvisus "0"
- Eeljahutus:
seade arv 23 °C → ≤25 °C tsooni temperatuur (tipukoormuse ajal)
- CO₂-TE DCV juhtimisstrateegia vastavalt:
EN 16798-1



TÄNAN ETTEVAATLUSE EEST !

Jevgeni Lukaštšuk

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

taltech.ee/en

Directive (EU) 2024/1275 (EPBD recast)

Article 7

1. Member States shall ensure that new buildings are **zero-emission buildings** in accordance with Article 11:

- (a) from 1 January 2028, new buildings owned by public bodies; and
- (b) from 1 January 2030, all new buildings;

Article 13

5. Member States shall require non-residential zero-emission buildings **to be equipped with measuring and control devices for the monitoring and regulation of indoor air quality**. In existing non-residential buildings, the installation of such devices shall be required, where technically and economically feasible, when a building undergoes a major renovation. Member States may require the installation of such devices in residential buildings.

DCV airflow control logic

For spaces equipped with DCV, ventilation airflow rates were modeled to ensure compliance with Indoor Environmental Quality Category II (IEQ II) throughout system operation. Accordingly, the minimum outdoor airflow rate in occupied zones was maintained at $0.7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, corresponding to the airflow required to dilute emissions from building materials. The maximum airflow rate ($q_{a,tot}$) in spaces with DCV was calculated based on the design occupant density expressed as the floor area per person, according to CEN 16798-1 (IEQ II) using Eq. 1

$$q_{a,tot} = q_{a,occ} \cdot \frac{n}{A} \cdot O_{\max} + q_{a,mat} \quad (1)$$

Where:

- $q_{a,tot}$ is the design outdoor airflow rate per unit floor area ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$);
- $q_{a,occ}$ is the outdoor airflow rate per occupant ($7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{person}^{-1}$);
- n/A is the occupant density ($\text{person}\cdot\text{m}^{-2}$) for offices 1 person per 10 m^2 , and for meeting rooms 1 person per 2.1 m^2 ;
- $O_{\max}$ is the maximum hourly occupancy level according to the zone profile; 0.7 for landscaped offices and 1.0 for meeting rooms;
- $q_{a,mat}$ is the airflow rate required to dilute emissions from building materials ($0.7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$).

The CO_2 setpoint corresponding to the maximum outdoor airflow rate was calculated using Eq.2

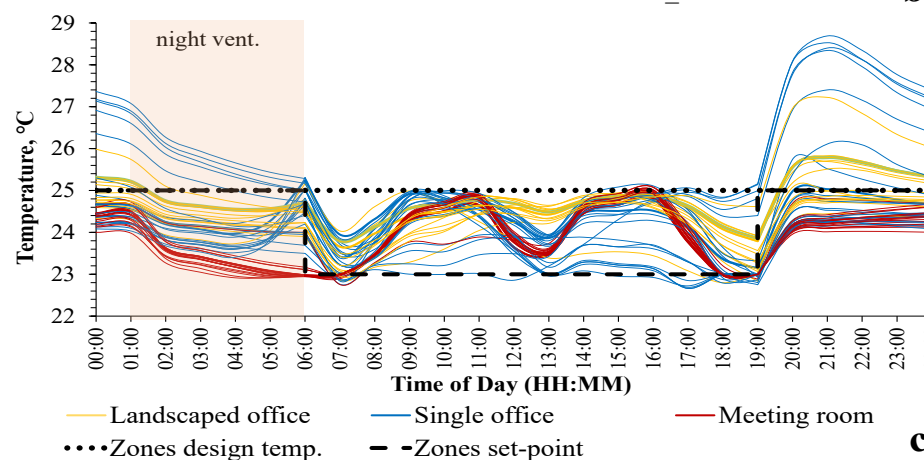
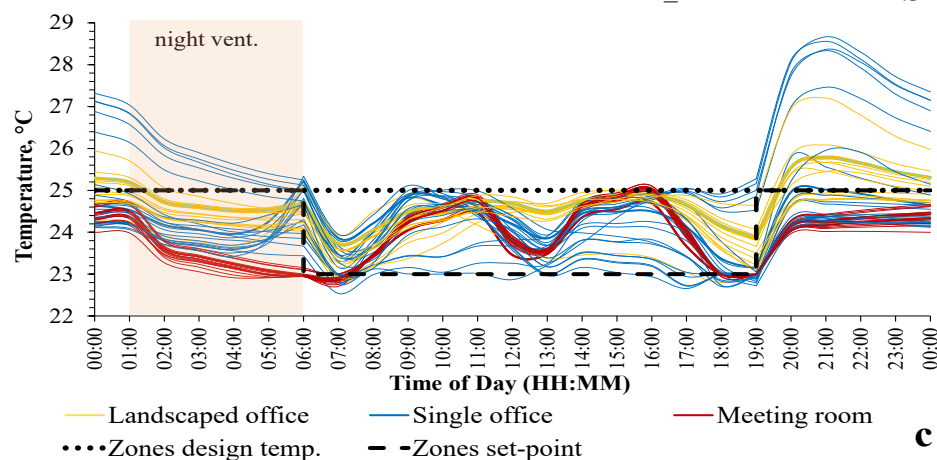
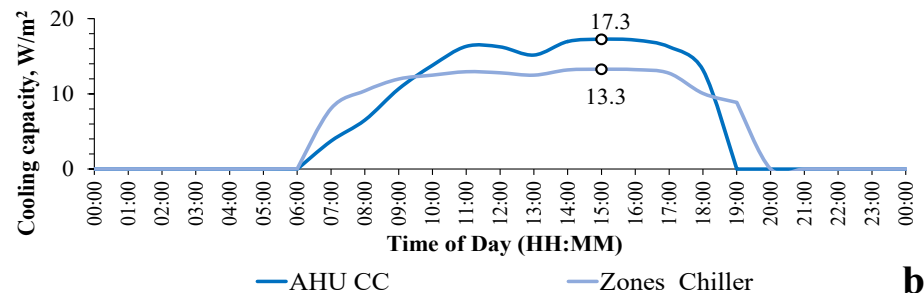
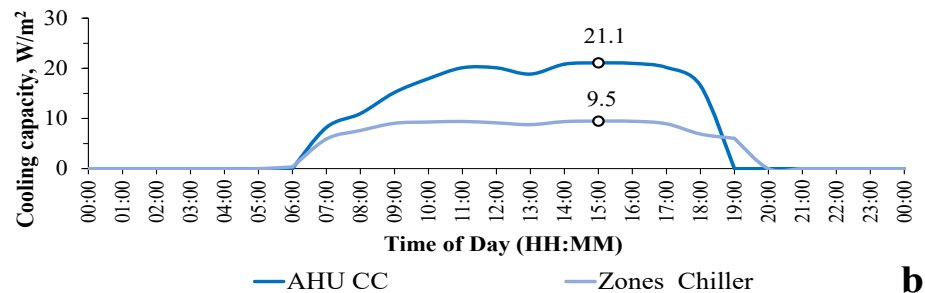
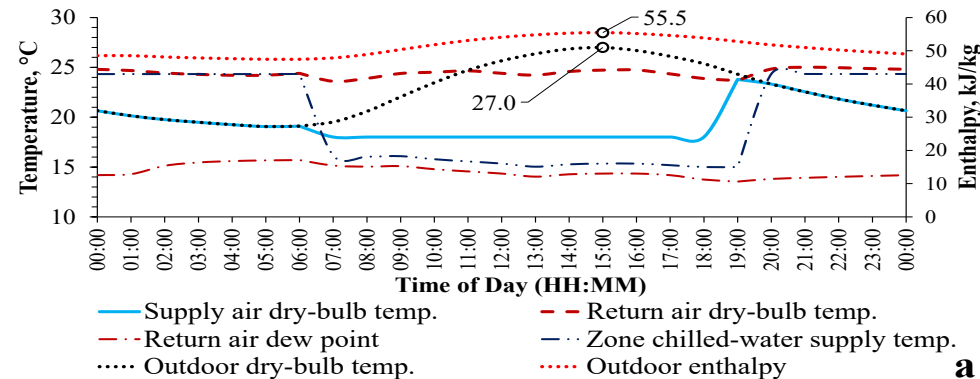
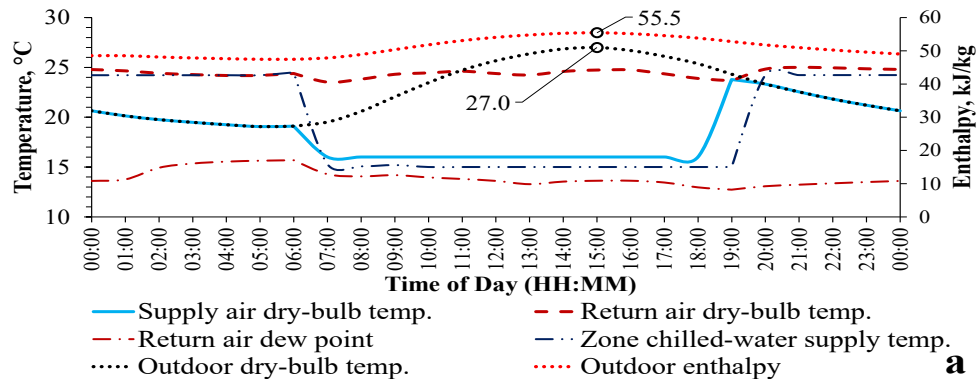
$$CO_{2,set} = CO_{2,out} + \frac{m_{CO2,occ} \cdot \frac{n}{A} \cdot O_{\max}}{3.6 \cdot q_{a,tot}} \cdot 1000 \quad (2)$$

Where:

- $CO_{2,set}$ is the CO_2 setpoint concentration (ppm);
- $CO_{2,out}$ is the outdoor CO_2 concentration (400 ppm);
- $m_{CO2,occ}$ is the CO_2 generation rate per person ($20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{person}^{-1}$).

JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

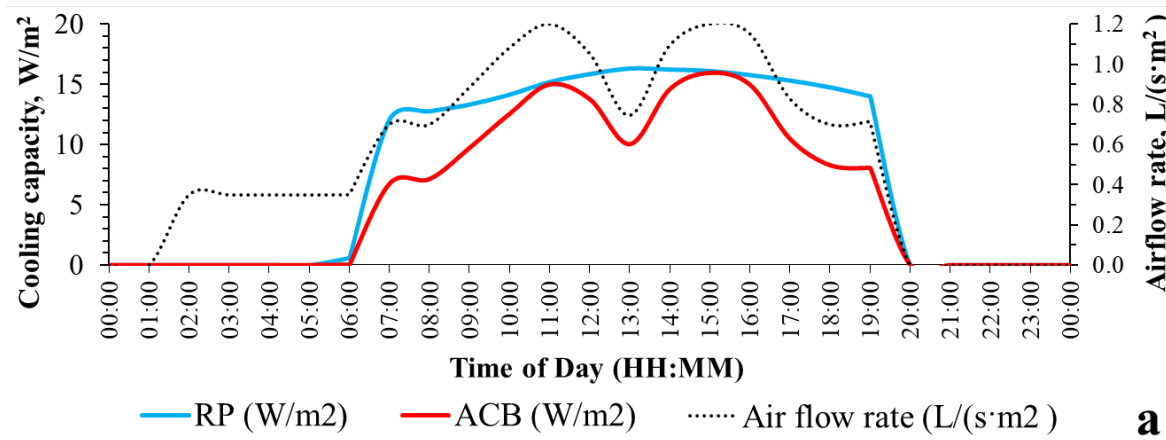
Jahutuskooormuse dünaamika projekteerimispäeval eeljahutusega DCV-süsteemides (RP)



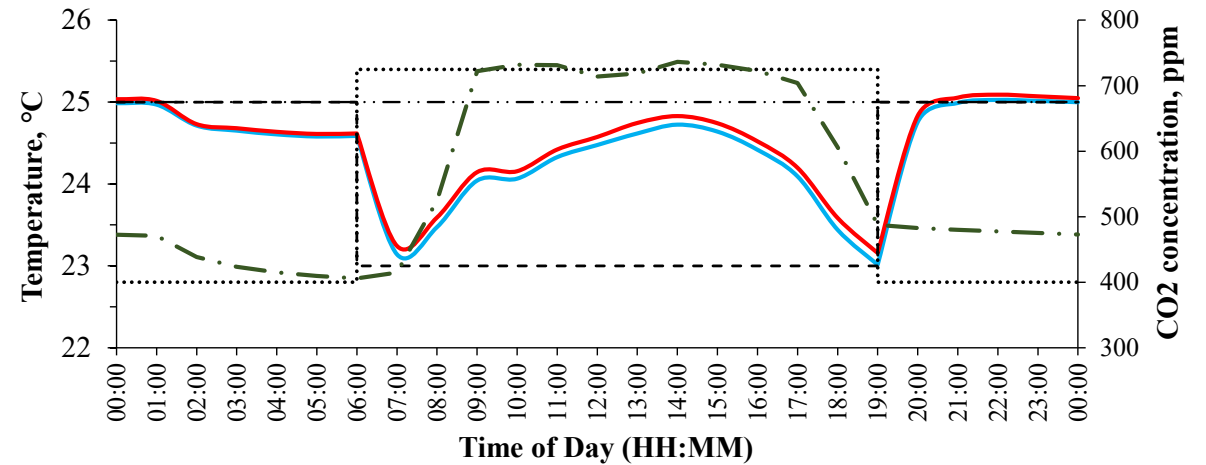
JAHUTUSKOORMUSE ARVUTUSED

Lõppseadmete töö DCV-süsteemis õhuvooluhulkade muutuste korral

- Mõlemad süsteemid tagasid soojusliku mugavuse ja nõutud siseõhu kvaliteedi.
- RP jahutusvõimsus püsis DCV õhuvoolu muutustest hoolimata suhteliselt stabiilne.
- ACB jahutusvõimsus sõltus tugevamalt õhuvooluhulgast ning vähenes madalama õhuvoolu perioodidel reduced-airflow periods.



a

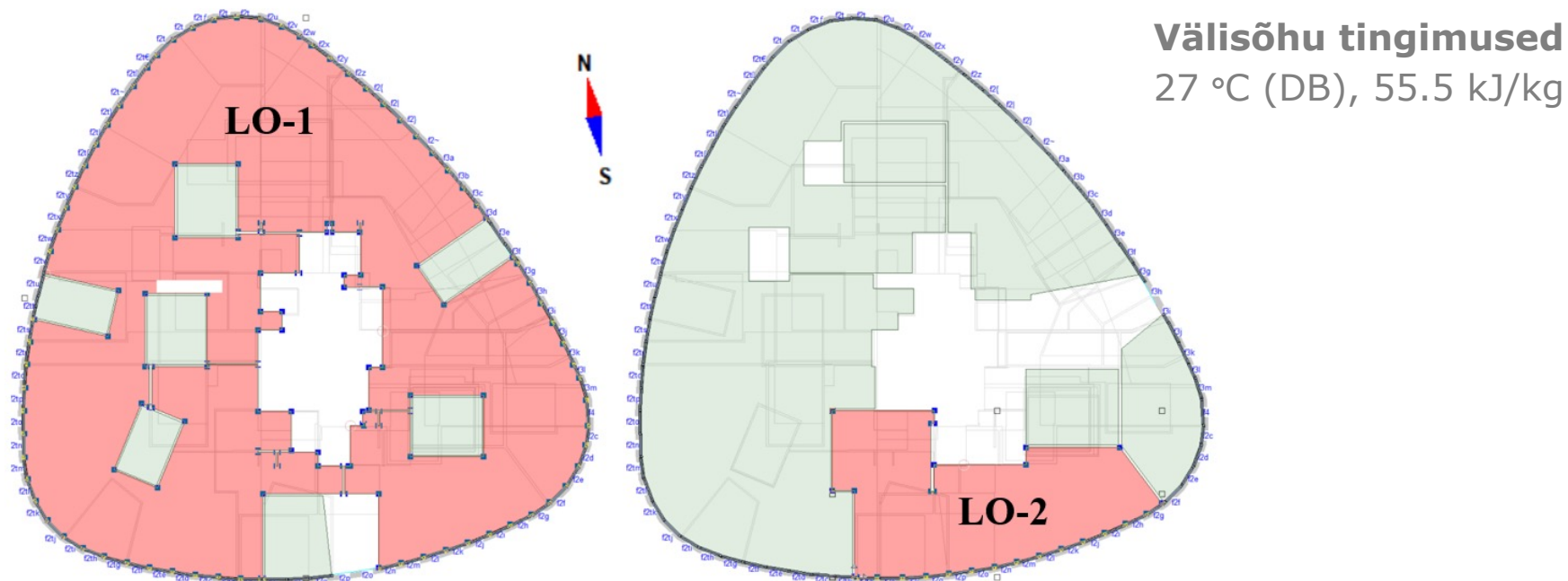


b

SISEKLIIMA RISKI ANALÜÜS

Soojusliku mugavuse ja IAQ riski analüüs DCV-süsteemis suurendatud sisekoormuste korral

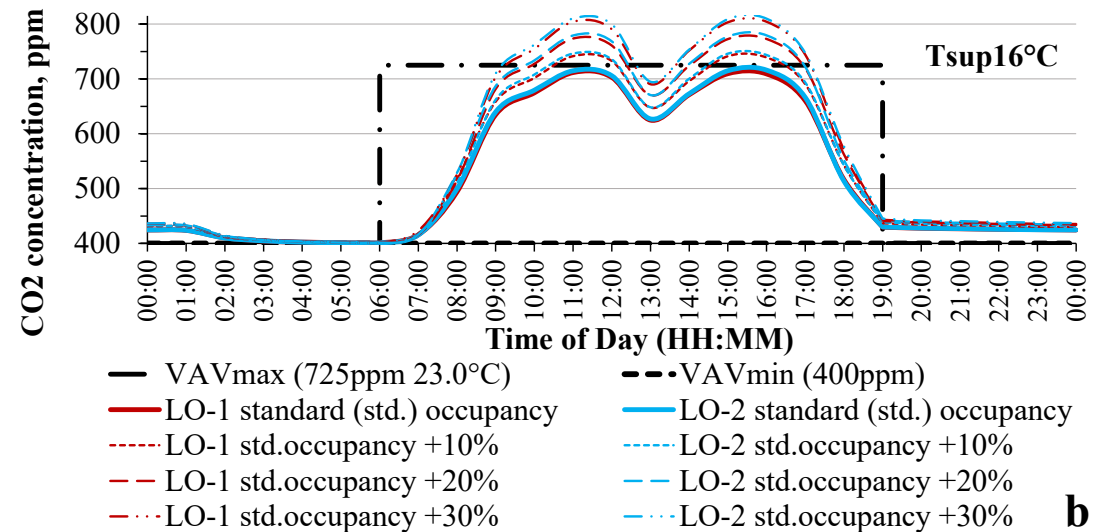
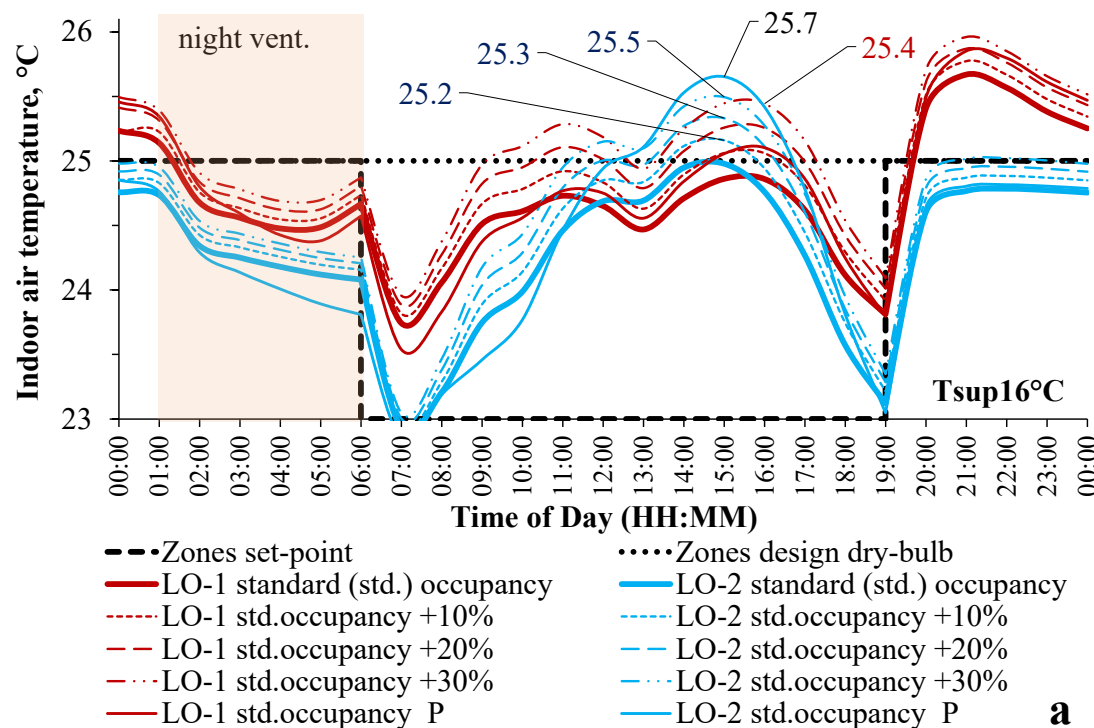
- Analüüsiks valiti kaks tüüpilist avatud kontori tsooni: **LO-1** (727.1 m², 7. korrus) ja **LO-2** (147.3 m², 4. korrus)
- Seadmete ja valgustuse sisemisi soojuskoormusi suurendati standardsete kasutusprofiilide suhtes **+10%, +20% ja +30%.**
- Lisaks analüüsiti **ripplaega** lahendust, et hinnata vähendatud soojusmassi aktiveerimise mõju.



SISEKLIIMA RISKI ANALÜÜS

Soojusliku mugavuse ja IAQ riski analüüs DCV-süsteemis suurendatud sisekoormuste korral

- Soojuslik sisekliima püsis üldiselt vastuvõetav kuni ligikaudu **+20%** kasutuskooormuse suurenemiseni, kus temperatuuri ületused olid vaid **~0.3 K**.
- Vähendatud soojusmassi aktiveerimine (ripplagi) ja +30% kasutuskooormus vähendasid soojusliku mugavuse varu, eriti väiksemas LO-2 tsoonis.



Projekteerimistingimused

Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg

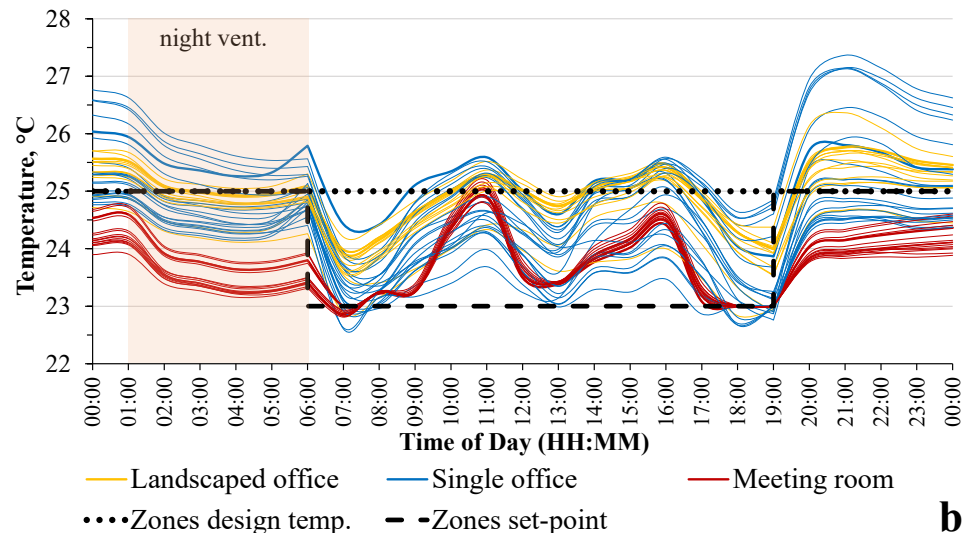
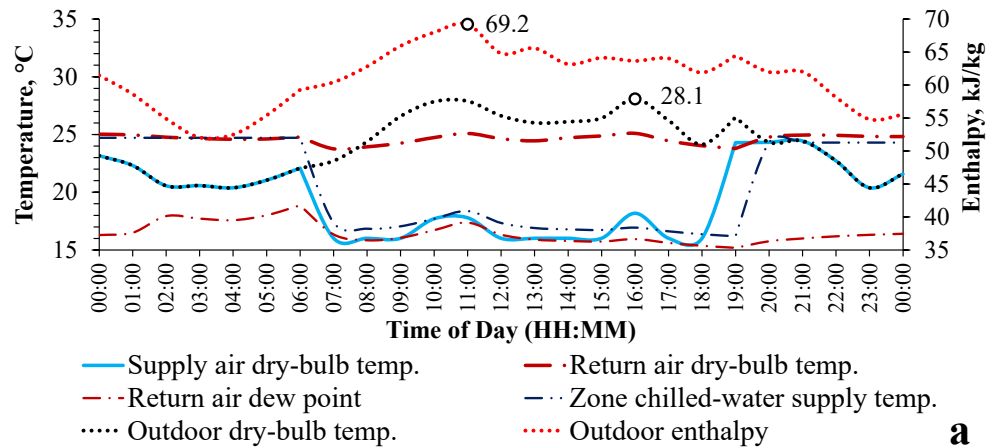
Sisepuhkeõhk: 16 °C (DB), 9.0 g/kg

SISEKLIIMA RISKI ANALÜÜS

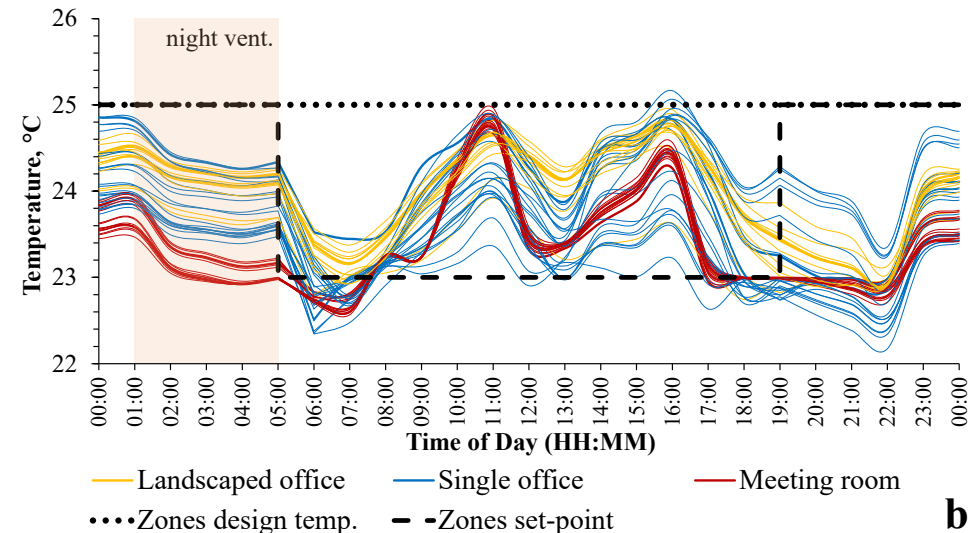
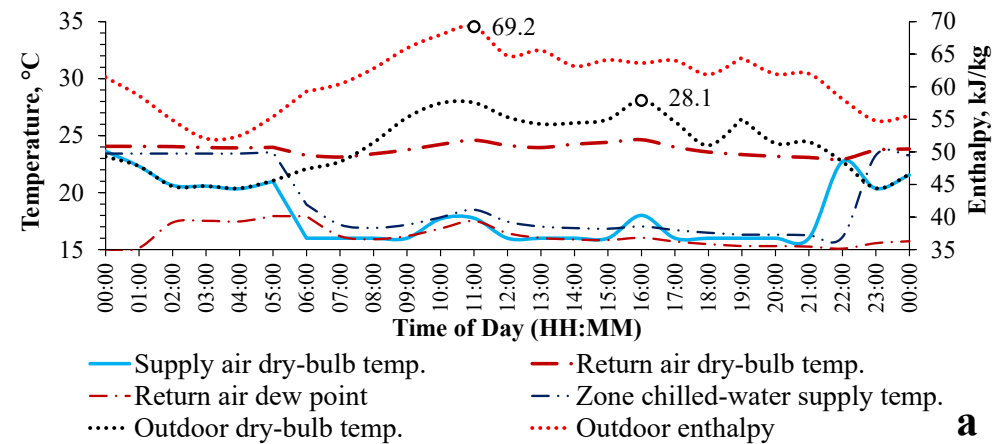
Ülekuumenemise riskianalüüs DCV-süsteemis ekstreemsetes välistingimustes (2022)

Projekteermistingimused: Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg; sissepuhkeõhk: 16 °C (DB), 9.0 g/kg

AHU töögraafik S4



AHU töögraafik S5



SISEKLIIMA RISKI ANALÜÜS

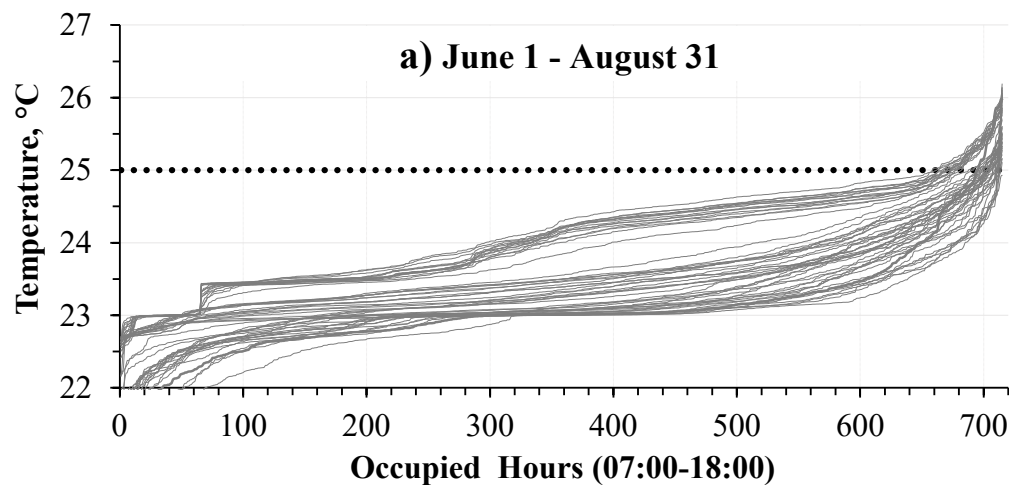
Ülekuumenemise riskianalüüs DCV-süsteemis ekstreemsetes välistingimustes (92-päevane simulatsioon)

- Soojuslikku mugavust hinnati **2022. aasta** suveperioodil eeljahutusega vähendatud jahutusvõimsuste korral.
- Hindamine põhines standardi **EN 16798-2 (IEQ II)** nõuetel projekteeritud sisetemperatuuriga **25 °C** (operatiivtemperatuur ≤ 26 °C).
- Kriteerium: kõrvalekalle **$\leq 12\%$** tööajast (07:00–18:00)
Riigipühi (24. juuni ja 20. august) käsitleti mitte-tööpäevadena.

	Juuni	Juuli	August
Tööpäevad	21	21	25
Töötunnid	231	231	253
Lubatud kõrvalekalle: 12% tundidest	28	28	30

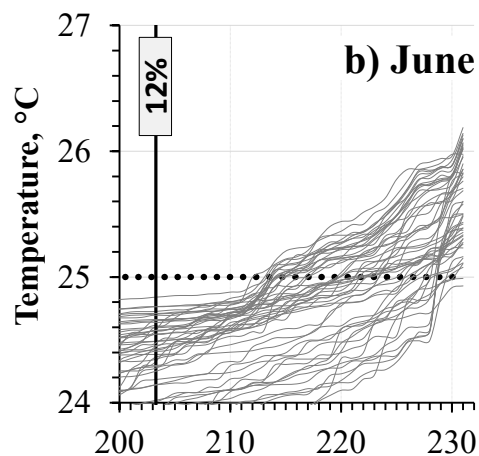
SISEKLIIMA RISKI ANALÜÜS

Ülekuumenemise riskianalüüs DCV-süsteemis ekstreemsetes välistingimustes (92-päevane simulatsioon)



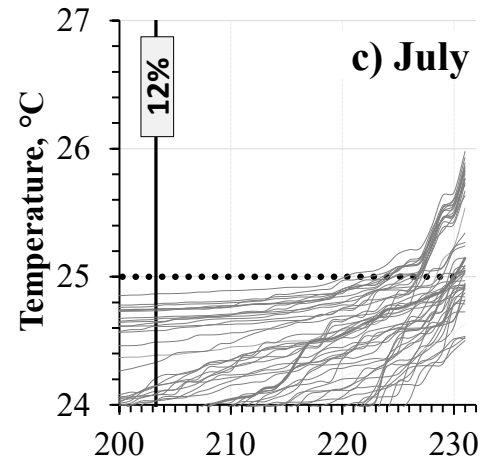
..... Design temp.

— Zone temp. - IDA-ICE



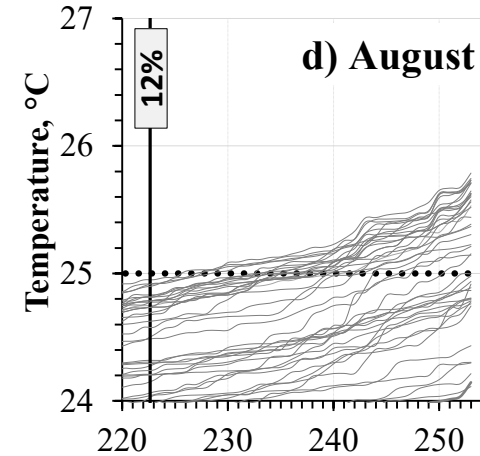
..... Design temp.

— Zones temp. - IDA-ICE



..... Design temp.

— Zones temp. - IDA-ICE



..... Design temp.

— Zones temp. - IDA-ICE

Nominaaltingimused

Välisõhk: 27 °C (DB), 55.5 kJ/kg

Sissepuhkeõhk: 16 °C (DB), 9.0 g/kg

AHU töögraafik: S5

**Vähendatud jahutusvõimsusega
dimensioneerimislahendus vastas
standardi EN 16798-2 (IEQ II)
igakuisele ülekuumenemis-
kriteeriumile ($\leq 12\%$ h).**

Soojuslik sisekliima jahutusperioodil

CBE Thermal Comfort Tool for EN-16798 <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>

Inputs

Select method: PMV method

Air temperature
25 °C

☐ Use operative temp

Mean radiant temperature
25 °C

Air speed
0.25 m/s

Relative humidity
55 %

Relative humidity

Metabolic rate
1.2 met

Seated, quiet: 1.0

Dynamic clothing insulation
0.5 clo

Trousers, long-sleeve shirt: ↕

Create custom ensemble

✓ Complies with EN-16798

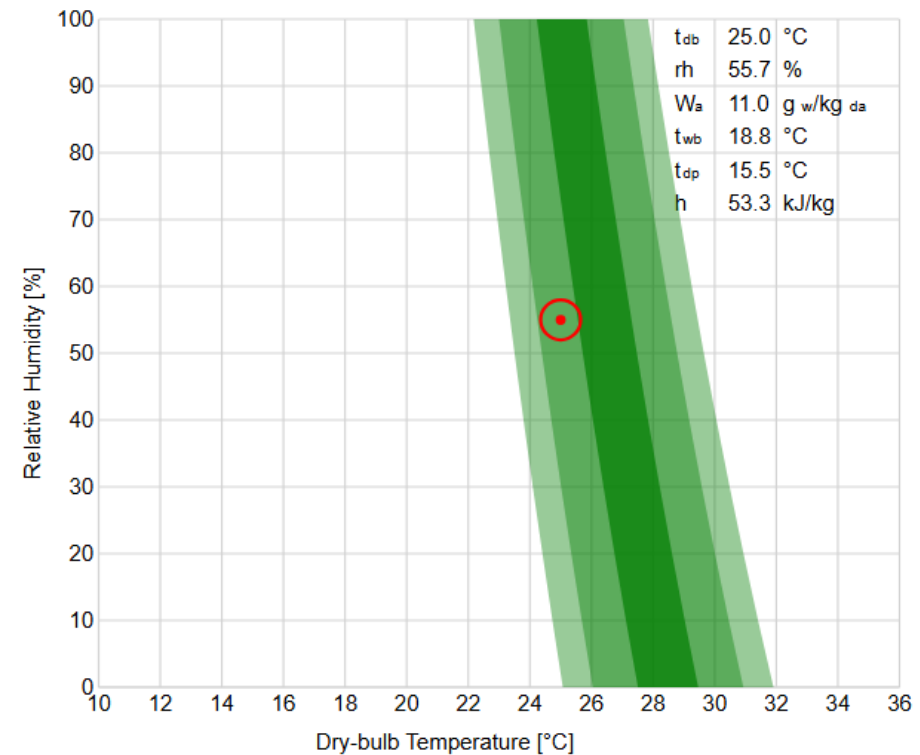
PMV = -0.33

PPD = 7 %

Category = II

Relative air speed = 0.31 m/s

Relative humidity vs. air temperature



Soojuslik sisekliima jahutusperioodil

CBE Thermal Comfort Tool for EN-16798 <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>

Inputs

Select method: PMV method

Air temperature: 23 °C

Mean radiant temperature: 26 °C

Air speed: 0.25 m/s

Relative humidity: 55 %

Metabolic rate: 1.2 met

Dynamic clothing insulation: 0.5 clo

Use operative temp: ☐

Relative humidity:

Seated, quiet: 1.0

Trousers, long-sleeve shirt:

Create custom ensemble

✓ Complies with EN-16798

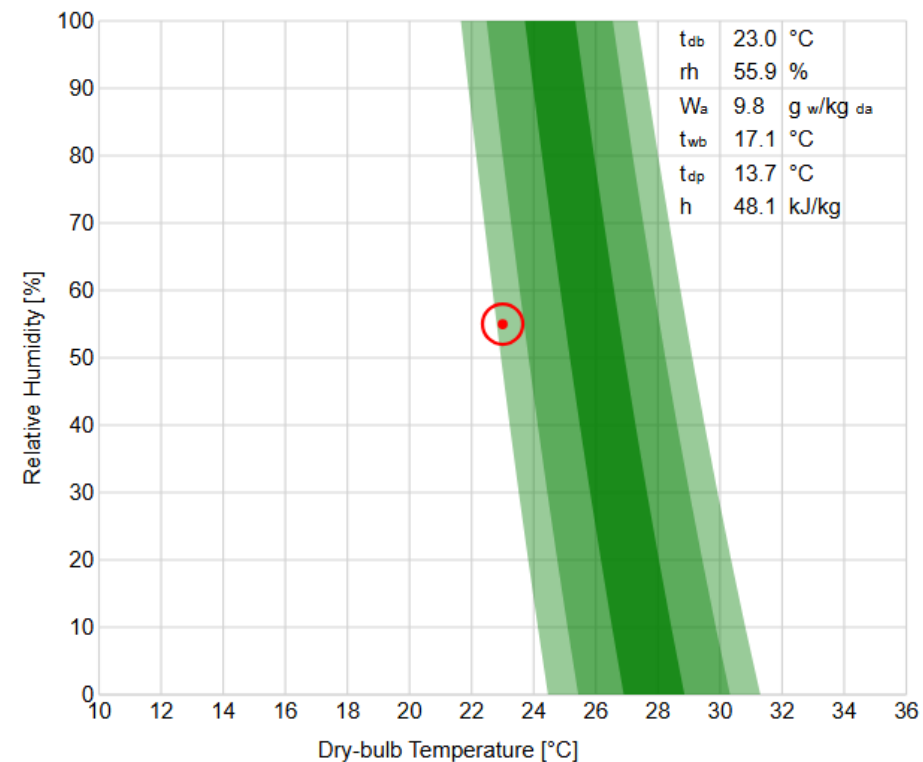
PMV = -0.66

PPD = 14 %

Category = III

Relative air speed = 0.31 m/s

Relative humidity vs. air temperature



SOOJUSLIK SISEKLIIMA JAHUTUSPERIOODIL

CBE Thermal Comfort Tool for EN-16798 <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>

Inputs

Select method: PMV method

Air temperature: 23 °C

Mean radiant temperature: 26 °C

Air speed: 0.16 m/s

Relative humidity: 55 %

Metabolic rate: 1.2 met

Dynamic clothing insulation: 0.5 clo

Use operative temp: ☐

Relative humidity:

Seated, quiet: 1.0

Trousers, long-sleeve shirt:

Create custom ensemble

✓ Complies with EN-16798

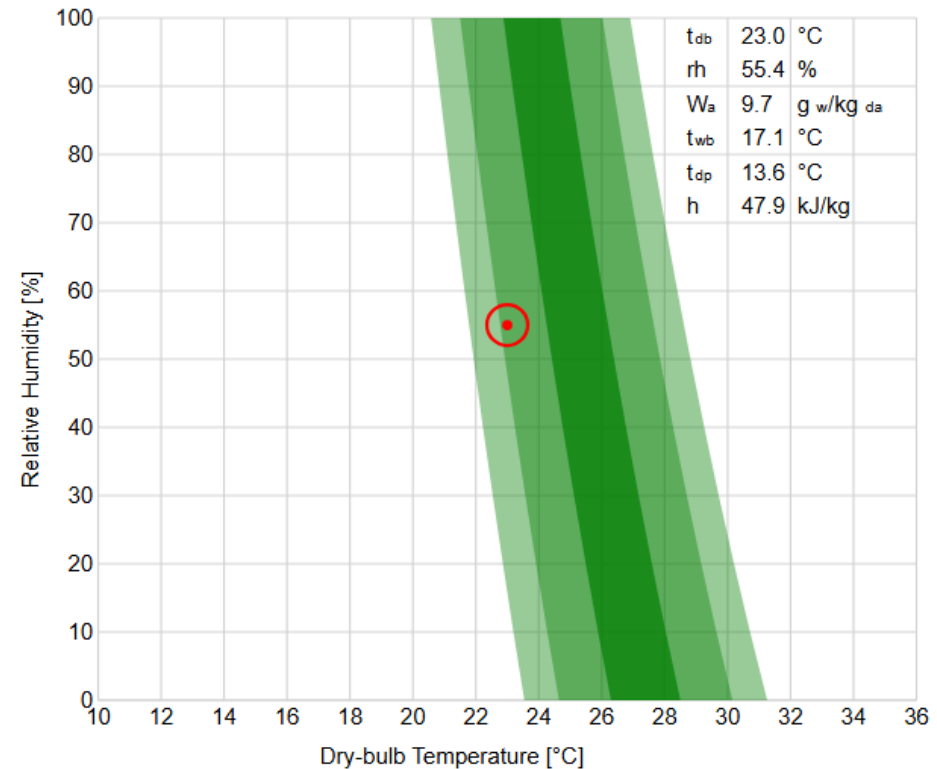
PMV = -0.45

PPD = 9 %

Category = II

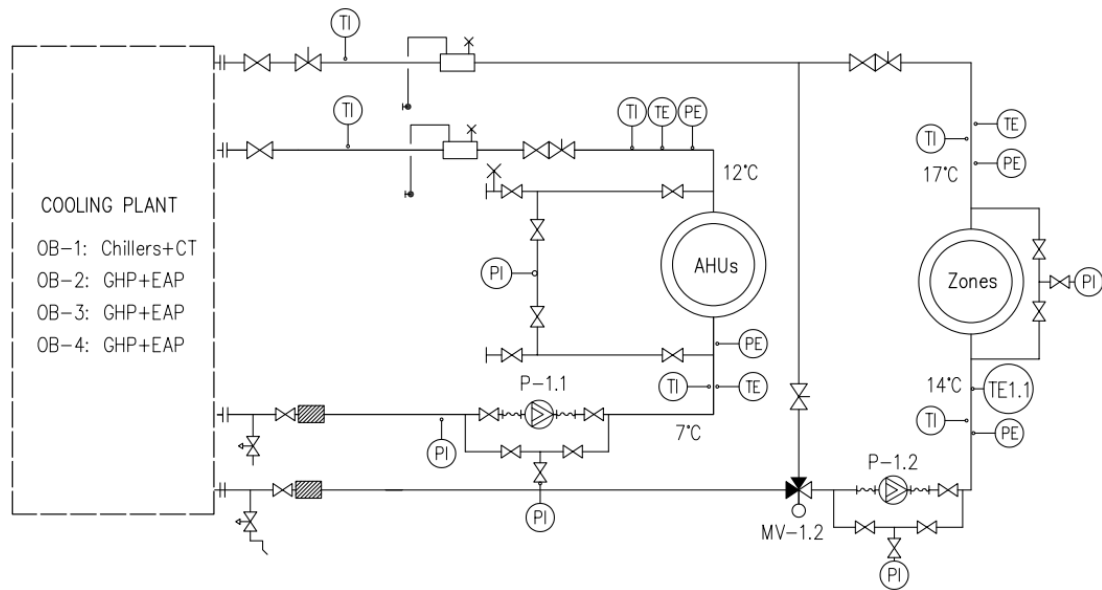
Relative air speed = 0.22 m/s

Relative humidity vs. air temperature



SISEKLIIMA TAGAMISE PÕHISÜSTEEMID UURITUD HOONETES

Külmajaama põhimõtteline skeem



Ventilatsioonisüsteemi põhimõtteline skeem

